

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)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического оборудования

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Методика расчёта химического состава металла швов, выполняемых дуговой сваркой плавящимся электродом, с использованием теории распространения тепла

Студент

В.Е. Красюков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

д.т.н., профессор В.П. Сидоров

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

Тольятти 2020

Содержание

Введение.....	4
1 Расчётные методы определения площади проплавления основного металла при дуговой сварке.....	9
1.1 Общие вопросы расчёта размеров сварочной ванны при дуговой сварке.....	9
1.2 Влияние электродного металла на проплавление основного металла.....	11
1.3 Неподвижные источники тепла.....	18
1.4 Движущийся точечный источник тепла на поверхности полубесконечного тела.....	22
1.5 Движущийся линейный источник тепла в бесконечной пластине.....	25
1.6 Движущийся точечный источник тепла на поверхности пластины.....	27
1.7 Движущийся нормально-круговой источник тепла на поверхности пластины.....	29
1.8 Методики определения химического состава наплавляемого металла.....	31
2 Исследования влияния параметров сварки на площадь проплавления основного металла.....	40
2.1 Компьютерная программа для расчёта размеров сварочной ванны при действии точечного источника тепла на поверхность пластины.....	40
2.2 Исследование влияния мощности дуги, скорости сварки, толщины металла.....	43
2.3 Обоснование методики для определения геометрических параметров сварочной ванны.....	46
2.4 Выводы по 2 главе.....	49
3 Методика проведения экспериментов.....	50
3.1 Оборудование, приборы и материалы для исследования.....	50
3.2 Условия проведения эксперимента и методика его проведения.....	63
4 Описание результатов экспериментов.....	71
4.1 Результаты измерений геометрических параметров шва.....	71
4.2 Расчёт площади проплавления основного металла.....	73
4.3 Расчёт химического состава металла шва и сравнение с данным спектрального анализа.....	79

4.4 Выводы по 4 главе.....	88
Заключение.....	90
Список используемой литературы и источников.....	91
Приложение А Сертификат качества производителя на партию электродов марки ОК 76.18.....	96

Введение

В нефте-газодобывающей и химической отраслях промышленности используется большая номенклатура легированных сталей, как отечественных, так и импортных. Необходимость применения данных сталей обусловлена условиями эксплуатации: агрессивной средой, высокой температурой эксплуатации, избыточным давлением и другими.

Наличие в химическом составе металла легирующих элементов улучшает механические свойства стали. Так, например, содержание кремния в стали повышает прочность, упругость и твердость стали в тоже время, снижая вязкость стали. Присутствие марганца в стали влияет на твердость и прочность, а также улучшает прокаливаемость и свариваемость стали. Наличие хрома способствует повышению износостойкости и увеличению прочности стали. Наличие никеля положительно влияет на прочность, вязкость и твердость, при этом мало влияя на пластичность, но сильно повышая прокаливаемость и коррозионную стойкость стали. Молибден повышает жаропрочность стали, способствует образованию мелкозернистой однородной структуры, улучшает свариваемость и обрабатываемость резанием [1].

Эти механические свойства крайне важны, и их необходимо учитывать при проектировании сварных конструкций. В свою очередь механические свойства стали характеризуются химическим составом металла, поэтому необходимо особое внимание уделять концентрации легирующих элементов.

Особого внимания требует не только химический состав основного металла, но и химический состав сварного шва. При сварке плавлением можно регулировать химический состав шва за счет добавления присадочного металла и металлургических реакций флюсов и защитных газов. Сварной шов представляет из себя некий сплав из основного металла и добавленного металла. Составы сварных швов чрезвычайно разнообразны вследствие разнообразия толщин, основного металла, подготовки кромок и

сборки, параметров сварки, разнообразия сварочных материалов. Так как химический состав наплавляемого металла будет характеризоваться химическим составом присадочного металла и металлургических реакций, необходимо также уделять особое внимание химическому составу сварочных материалов.

На данный момент в России наиболее востребованным способом сварки остается ручная дуговая сварка покрытым электродом. Свидетельствует этому анализ, проведенный руководителем аттестационного центра сварочных технологий г. Тольятти Смирнов И.В., по результатам которого, порядка 65% аттестаций по способам сварки приходится на ручную дуговую сварку покрытым электродом [2].

Такая востребованность ручной дуговой сварки покрытым электродом обусловлена рядом преимуществ над другими способами сварки:

- возможность сварки во всех пространственных положениях.
- возможность сварки в труднодоступных местах.
- относительную дешевизну оборудования.
- низкие затраты при сварке коротких швов и малой серийности свариваемых узлов и конструкций.
- в большинстве случаев обеспечивается высокое качество наплавленного металла.

К недостаткам технологии ручной сварки следует отнести нестабильность параметров, что приводит к повышенной химической неоднородности сварных швов, а, следовательно, и механических свойств, и других эксплуатационных характеристик соединений. При этом во многих случаях эксплуатационная надежность сварных соединений будет зависеть не от усредненных свойств соединений, а определяться самой слабой зоной соединения. Поэтому при сварке большое внимание уделяется предупреждению и затем обнаружению дефектов сварных соединений.

Неоднородности сварных швов при ручной сварке дополнительно способствует такое ее свойство как нагрев вылета электрода. Вылет

электрода при сварке постепенно уменьшается, а электрод достаточно сильно нагревается к концу своего сгорания, и скорость его плавления может существенно увеличиться [3; 4; 5; 6]. Поскольку провар основного металла не изменяется, будет увеличиваться доля участия электродного металла в сварном шве по его длине.

Анализ химического состава наплавленного металла необходим для решения следующих задач:

- определение производителем сварочных материалов их соответствия требованиям стандартов и оформление сертификата соответствия;
- контроль потребителем соответствия сварочных материалов данным сертификата соответствия;
- аттестация сварочных материалов на соответствие требованиям использования на объектах повышенной опасности, подконтрольных Ростехнадзору;
- при создании новых марок сварочных материалов.

Анализ химического состава сварных швов необходим для:

- отработки и оптимизации технологии сварки и контроля за ее соблюдением;
- анализа причин недопустимых отклонений химического состава сварных швов.

Поэтому разработка более простого способа контроля содержания наплавленного металла путем определения содержания дополнительного металла позволит сэкономить значительные ресурсы и создаст предпосылки повышения качества сварных соединений путем контроля за стабильностью их состава.

До сих пор оптимизации химического состава сварных швов при сварке уделялось недостаточно внимания. Это в значительной степени связано с высокой трудоемкостью и затратами для определения химического состава наплавленного металла [7; 8; 9]. Для этого в основном используется многослойная наплавка образцов. Это, по-видимому, во многом связано с

тем, что содержание легирующих элементов и вредных примесей в наплавке должно было выполняться методами химического анализа, также весьма трудоемкими. Стружку для анализа необходимо отбирать на достаточно большой глубине пробы в верхних слоях наплавки.

При химическом анализе сварных производственных швов требуется их разрушение, что в большинстве случаев недопустимо. Поэтому текущий контроль химического состава швов в производстве практически не осуществляется в отличие от неразрушающих методов контроля дефектов.

Создание простого и эффективного метода неразрушающего контроля химического состава сварных швов является весьма актуальной задачей для производства и ремонта ответственных сварных конструкций. При этом по аналогии с неразрушающим дефектоскопическим контролем должны устанавливаться допусковые отклонения по содержанию основных легирующих и вредных элементов. Для этого необходимо предварительное выполнение достаточно большого объема исследований.

Появление портативных спектрометров для определения химического состава металлов во многом меняет картину. Такие приборы становятся все более доступными непосредственно в цеховых условиях, а в ближайшем будущем их доступность увеличится. Однако для такого подхода необходимо создание соответствующей методической базы.

Анализ образования сварного шва как сплава показывает, что такой контроль может быть осуществлен, если будет решена задача надежного определения площади поперечного сечения проплавления основного металла, так как площадь поперечного сечения наплавленного металла определить не так сложно. Недавно в РФ был зарегистрирован патент [10], в котором предлагается путем несложного определения двух размеров сварного шва находить параметры распределения теплового потока сварочной дуги и на этой основе рассчитывать поперечное сечение проплавления основного металла. Однако использование этой идеи и ее применение в производстве требует определенных исследований.

В связи с изложенным выше, данная работа, посвященная адекватности расчетного определения содержания дополнительного металла сварных швов на основе расчета площади поперечного сечения расплавления основного металла с помощью теории распространения тепла, представляется актуальной.

Ее целью является повышения качества сварных соединений путем увеличения производительности контроля их химического состава за счёт использования методики определения площади проплавления основного металла с помощью теории распространения тепла.

1. Расчетные методы определения площади проплавления основного металла при дуговой сварке

1.1 Общие вопросы расчёта размеров сварочной ванны при дуговой сварке

Основной задачей дуговой сварки плавящимися электродами является создания монолитного соединения между изделиями под воздействием нагрева и пластической деформации.

Сама сущность процесса заключается в расплавлении сварочной дугой металла изделия, который также называется основным. Одновременно с основным металлом расплавляется металлический стержень электрода и его покрытие, которые, в виде отдельных капель, покрытых шлаком, попадают в сварочную ванну. В сварочной ванне происходит смешивание основного и электродного металла, а шлак всплывает на поверхность. Затвердевая, сварочная ванна образует металл шва. Поэтому можно утверждать, что форма сварочной ванны определяет форму сварного шва [11].

Сварочную ванну, изображенную на рисунке 1, описывают при помощи ряда параметров: L_B – длина ванны, B – ширина ванны, H – глубина проплавления, H_K – глубина кратера. Очертание зоны проплавления характеризуют относительной глубиной проплавления, которая равна отношению глубины проплавления (H) к ширине ванны (B) или величиной обратной ей – коэффициентом формы проплавления ($\Psi_{пр}$), а также коэффициентом полноты проплавления ($\mu_{пр}$) [12]:

$$\Psi_{пр} = B/H, \#(1)$$

$$\mu_{пр} = F_{пр}/(H \cdot B), \#(2)$$

где $F_{пр}$ – площадь проплавления, мм^2 .

Значение $\mu_{пр}$ по большей части находится в диапазоне от 0,6 до 0,8, а относительная глубина проплавления не превышает 3.

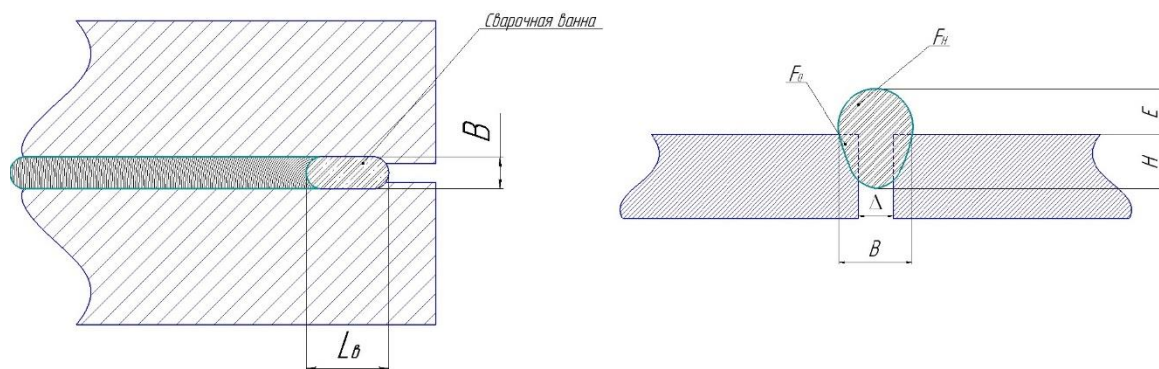


Рисунок 1 – Формы сварочной ванны при дуговой сварке

Очертание сечения наплавки характеризуют коэффициентом формы валика (Ψ_B) и коэффициентом полноты валика (μ_H):

$$\Psi_B = B/A, \#(3)$$

$$\mu_H = F_H/(A \cdot B), \#(4)$$

где A – высота шва, мм;

F_H – площадь наплавки, мм².

Также сварочная ванна может характеризоваться массой (G_B) и продолжительностью нахождения в жидком состоянии (τ_B), эти параметры находятся по формулам:

$$G_B = \tau_B \rho v_{св} F_{ш}, \#(5)$$

Отсюда:

$$\tau_B = G_B / \rho v_{св} F_{ш}, \#(6)$$

где G_B – масса сварочной ванны, г;

τ_B – время нахождения ванны в жидком состоянии, с;

ρ – плотность металла шва, г/см³;

$v_{св}$ – скорость сварки, см/с;

$F_{ш}$ – площадь поперечного сечения шва, см².

Площадь поперечного сечения шва вызывает особый интерес, так как, зная численные значения её составляющих, можно определять химический состав шва, что является одной из задач данной работы.

1.2 Влияние электродного металла на проплавление основного металла

Так как шов состоит из основного и наплавленного металлов, то площадь поперечного сечения шва, аналогично будет характеризоваться площадью сечения основного и наплавленного металла.

$$F_{\text{ш}} = F_o + F_n, \#(7)$$

где F_o – площадь поперечного сечения основного проплавленного металла, см^2

F_n – площадь поперечного сечения наплавленного металла, см^2 .

Количественно смешение основного и наплавленного металлов можно оценивают с помощью доли участия основного металла в металле шва [13]:

$$\psi_o = F_o / (F_o + F_n) = F_o / F_{\text{ш}}, \#(8)$$

где ψ_o – доля участия основного металла в металле шва.

Исходя из формулы (8) можно утверждать, что на долю участия основного металла в металле шва (ψ_o) будут влиять угол разделки кромок, зазор, притупление, выпуклость шва. Геометрические параметры шва, так или иначе, будут иметь отклонения по всей его длине, вследствие различных возмущений. Поэтому при определении доли участия основного металла в металле шва всегда присутствует некая погрешность.

В литературе встречаются обобщенные данные о доле участия основного металла в металле шва при сварке разными способами [13]. Эти данные отображены в таблице 1.

Таблица 1 - Доля основного металла в сварном шве некоторых способов сварки

Вид соединения	Сталь* ¹	Вид сварки				
		Покрытыми электродами	Под флюсом	Электрошлаковая	Наплавка ленточным электродом	
Наплавка валиком	П	0,15-0,40	0,25-0,50	-	0,08-0,20	
	А	0,25-0,50	0,35-0,50		0,15-0,25	
Стык без разделки кромок	П	0,30-0,50	0,35-0,55	0,2-0,4	-	
	А	-		0,3-0,5		
Стык с разделкой кромок (однослойный шов)	П	0,20-0,40	0,25-0,50	-		
	А	0,30-0,50	0,40-0,60			
Корневые швы стыковых многослойных соединений	П	0,25-0,50	0,35-0,60			
	А	0,35-0,50	0,40-0,70			
* ¹ П – перлитная; А – аустенитная.						

Если не учитывать химические реакции и выгорание металла при сварке, то содержание любого химического элемента в сварном шве ($C_{ш}$) можно определить по формуле [14]:

$$C_{ш} = C_o \psi_o + C_d(1 - \psi_o), \#(9)$$

где $C_{ш}$ – содержание элемента в металле шва, %;

C_o – содержание элемента в основном металле шва, %;

C_d – содержание элемента в дополнительном металле шва, %.

Под дополнительным металлом следует понимать – условный сплав, который получается в результате смешивания наплавляемого металла с основным металлом. Этот сплав получается в результате ввода наплавляемого металла в сварочную ванну и металлургических реакций, происходящих в ванне [14]. Содержание какого-либо химического элемента в дополнительном металле можно приближенно определить по формуле:

$$C_d \approx C_n + C_p, \#(10)$$

где C_n – содержание элемента в наплавленном металле, %;

C_p – содержание элемента, добавленное или убавленное в результате металлургических реакций, %.

Содержание элемента в наплавленном металле (C_n) принято определять опытным путем. В литературе описывается ряд способов для определения содержания элемента в наплавленном металле:

- по многослойной наплавке [15; 16],
- по наплавке на медную пластину или в медную форму [13],
- наплавка дугой косвенного действия [17; 43].

Отношение содержания элемента в дополнительном металле (C_d) к содержанию элемента в наплавленном металле (C_n) характеризуются коэффициентом перехода

$$\eta = C_d/C_n, \#(11)$$

где η – коэффициент перехода.

Коэффициент перехода (η) используется, так как в ходе сварки проходят химические реакции шлака с металлом сварочной ванны, который образуется в процессе расплавления покрытия электрода и часть легирующих элементов переходят в шов. Также происходит процесс выгорания (окисление) и испарения некоторых элементов и их уменьшение в составе

шва [18]. Эти процессы тяжело поддаются аналитическому расчёту, поэтому коэффициент перехода определяют опытным путем.

Режим сварки, способ ввода легирующих элементов, окислительные условия в зоне сварки и др. – все эти факторы, так или иначе, влияют на коэффициент перехода, но считать их средством прогнозирования химического состава шва было бы не корректно. Эти факторы вернее назвать характеристикой металлургических условий.

По данным разных авторов, значения коэффициентов перехода при сварке в различных защитных средах отражены в таблице 2 [13].

Таблица 2 – Коэффициент перехода для различных защитных сред

Вид сварки	Коэффициент перехода по элементам			
	C	Mn	Si	Cr
Сварка на воздухе без защиты: проволокой Св-08А проволокой Св-18ХГСА	0,3 – 0,4	0,39 – 0,56	-	-
	0,29 – 0,34	0,63 – 0,69	0,5 – 0,87	0,90 – 0,95
Сварка в CO ₂ : Проволокой 12Х18Н9Т Проволокой Св-18ХГСА Проволокой Св-10ГС	-	0,78	0,78	0,94
	0,79	0,80	0,81	0,94
	0,71	0,55	0,37	-
Сварка в аргоне + 5%O ₂ : Проволокой Св-18ХГСА Проволокой Св-10ГС	0,60	0,69	0,71	0,92
	0,59	0,41	0,32	-
Сварка электродами УОНИ 13/45	-	0,45 – 0,55	0,14-0,27	-

Как следует из этой таблицы, коэффициенты перехода элементов у покрытых электродов могут изменяться в очень широких пределах. В данном случае это представляет исключительно познавательный интерес и не может использоваться для расчета химического состава конкретных сварных швов. Все коэффициенты перехода, указанные в таблице 2, меньше 1. Это означает, что содержание элемента в дополнительном металле меньше, чем в наплавленном. В результате металлургических реакций происходят в основном потери легирующих элементов по сравнению с наплавленным металлом.

Площадь поперечного сечения проплавления основного металла можно определить из разности площади поперечного сечения шва и площади поперечного сечения наплавленного металла:

$$F_o = F_{ш} - F_n \quad \#(12)$$

Площадь поперечного сечения металла шва можно определить по его шлифу, а площадь поперечного сечения наплавленного металла (F_n) можно определить с помощью уравнения сохранения масс [19]:

$$F_n \cdot v_{св} = (1 - \psi_n) F_э \cdot v_э, \quad \#(13)$$

где ψ_n – коэффициент потерь на угар и разбрызгивание;

$F_э$ – площадь поперечного сечения электрода, см²;

$v_э$ – скорость расплавления электрода, см/с.

Преобразовав уравнение (13) получим формулу для расчёта площади поперечного сечения наплавленного металла:

$$F_n = [(1 - \psi_n) F_э \cdot v_э] / v_{св}, \quad \#(14)$$

Скорость сварки и скорость плавления электрода принято определять опытным путем.

Скорость сварки равна отношению длины сварного шва ко времени, затраченному на сварку. Исходя из этого, необходимо зафиксировать время от момента возбуждения дуги до момента окончания сварки.

$$v_{св} = L_{ш}/t_{д}, \#(15)$$

где $L_{ш}$ – длина шва, см;

$t_{д}$ – время горения дуги, с.

Скорость расплавления электрода равна отношению длины расплавленной части электрода ко времени расплавления электрода. В данном случае скорость плавления электрода определяется аналогично скорости сварки. Фиксируется время от момента возбуждения дуги до момента ее затухания.

$$v_{э} = L_{э}/t_{д}, \#(16)$$

где $L_{э}$ – длина расплавленной части электрода, см.

Коэффициент потерь на угар и разбрызгивание ($\psi_{п}$) характеризуется разницей между коэффициентом расплавления электрода ($a_{р}$) и коэффициентом наплавки ($a_{н}$).

$$\psi_{п} = [(a_{р} - a_{н})/a_{р}] \cdot 100\%, \#(17)$$

где $a_{р}$ – коэффициент расплавления электрода, г/(А·ч);

$a_{н}$ – коэффициент наплавки, г/(А·ч).

Эти коэффициенты зависят от вида, способа, параметров и режима сварки. При ручной дуговой сварке коэффициенты расплавления и наплавки находятся в интервале от 7 до 10 г/(А·ч), но могут возрастать до 17 г/(А·ч) и

более при увеличении плотности тока. При ручной дуговой сварке плавящимся покрытым электродом, коэффициент потерь на угар и разбрызгивание составляет от 0,03 до 0,1 [20]. Коэффициенты расплавления и наплавки далеко не всегда включаются в паспортные данные электродов, что создает затруднения для расчета химического состава швов.

Коэффициент расплавления электрода (a_p) можно найти при помощи формулы, которая в работе [21] приведена к виду:

$$a_p = G_p / I_d t_d = F_3 L_3 \rho / I_d t_d = v_3 \rho / j, \#(18)$$

где G_p – масса расплавленного электродного металла за время горения дуги, г;

I_d – сила тока дуги, А;

j – плотность тока на электроде, А/см².

Коэффициент наплавки характеризует количество наплавленного металла или скорость наплавки:

$$a_n = G_n / I_d t_d, \#(19)$$

где G_n – масса наплавленного металла за время горения дуги, г.

Также определить площадь поперечного сечения наплавленного металла можно путем взвешивания изделия до и после сварки. Определив массу наплавленного металла, среднюю по длине шва площадь поперечного сечения основного металла оценить по формуле:

$$F_{НС} = G_n / \rho L_{ш}. \#(20)$$

Однако процесс определения площади поперечного сечения основного металла в металле шва по формуле (12) является трудоёмким, поэтому предлагается воспользоваться способом определения площади сечения

основного металла с использованием формул распространения тепла в изделии. Данный способ описан в патенте РФ №2704676 Сидорова В.П. «Способ определения площади проплавления основного металла при дуговой сварке» [10].

В этом способе предлагается использовать математическую формулу распространения тепла при сварке. Сварку осуществляют по стыку двух пластин с зазором и без разделки кромок. После сварки проводят измерение ширины шва и глубины проплавления. Глубину проплавления измеряют щупом в небольшом зазоре между пластинами. По измеренным размерам рассчитывают значения соответствующих им коэффициентов в используемой математической формуле. После этого полученные коэффициенты применяют для расчета площади поперечного сечения проплавления основного металла. Данный способ имеет два варианта решения. По одному из вариантов площадь проплавления определяется как произведение средней глубины проплавления на максимальную ширину проплавления основного металла. По другому варианту - как произведение максимальной глубины проплавления на среднюю ширину проплавления сварного шва [10].

Рассмотрим распространение теплоты от разных источников тепла и подберем математическую форму, которая будет описывать процесс распространения тепла при ручной дуговой сварке пластин, плавящимся электродом.

1.3 Неподвижные источники тепла

Нагрев тела осуществляется при помощи разных источников тепла, которые различаются между собой по распределению тепла, времени действия и движению относительно тела. При условии, что теплофизические коэффициенты (λ , a , c_p , α) будут приниматься не зависящим от температуры и будут иметь некоторые средние значения, всё разнообразие источников тепла можно получить, используя формулу мгновенного точечного источника тепла.

Мгновенный точечный источник тепла – понятие абстрактное. Физической схемой, примерно соответствующей мгновенному точечному источнику, можно считать такую, при которой в очень малый объем за весьма малый промежуток времени вводится некоторое количество теплоты Q . Формально такое введение теплоты можно рассматривать как граничное условие при $t=0$, когда вместо распределения температур задается распределение теплоты в теле. Действительно, если принять, что во всех точках тела, кроме одной, теплосодержание равно нулю, а в точке с координатами x_0, y_0, z_0 при $t=0$ содержится количество теплоты Q , то будем иметь случай мгновенного точечного источника [12].

Приращение температуры в точках бесконечного тела при воздействии мгновенного точечного источника выражается формулой:

$$\Delta T = \frac{Q}{C\rho(4\pi at)^{3/2}} e^{-R^2/(4at)}, \#(21)$$

где ΔT – приращение температуры в рассматриваемой точке с координатами (x, y, z) , К;

Q – количество теплоты вводимое в тело, Дж;

$C\rho$ – объемная теплоемкость, Дж/(см³·К);

a – коэффициент температуропроводности, см²/с;

t – время, отсчитываемое с момента введения тепла, с;

R – расстояние от начала координат, где было введено тепло, до рассматриваемой точки, см.

Расстояние от места введения тепла до рассматриваемой точки можно найти по формуле:

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \#(22)$$

где x, y, z – координаты точки, отсчитываемые от точки действия источника тепла.

На поверхности полубесконечного тела, тепло от мгновенного точечного источника будет распространяться аналогично бесконечному телу, согласно уравнения (21). В данном случае тепло будет распространяться вглубь тела, а теплоотдачей с поверхности можно пренебречь. Температура в точках, по сравнению с бесконечным телом возрастает в 2 раза. Формулу (21) можно выразить в следующем виде:

$$\Delta T = \frac{2Q}{C\rho(4\pi\alpha t)^{3/2}} e^{-\frac{(\sqrt{x^2+y^2+z^2})^2}{4at}}. \#(23)$$

Исходя из уравнений (21) и (23) видно, что приращение температуры будет прямо пропорционально количеству введенного тепла. Формула (23) уже имеет практическое значение, так как по ней можно рассчитывать температуру при наплавке на массивные тела.

«Температура точек, находящихся на удалении от точки подвода тепла, сначала будет повышаться, пока не достигнет максимального значения, затем уменьшаться. Чем дальше точка находится от места подвода тепла, тем дольше будет достигаться максимальная температура и ниже будет её значение. С течением времени конечное количество тепла распределится в неограниченном объеме полубесконечного тела и приращение температур всех точек будет стремиться к нулю» [12].

В данном случае источник тепла нагревает металл в конкретной точке. Формула (23) может быть использована для оценки температуры, например, при заварке небольших поверхностных дефектов на массивной детали, или при точечной сварке тонкой детали к толстой. Но она не применима для рассмотрения тепловых процессов при сварке пластин.

«Мгновенный линейный источник тепла представляет собой комбинацию мгновенных точечных источников, действующих одновременно и расположенных по линии» [12].

Приращение температуры в пластине при воздействии мгновенного линейного источника с равномерным распределением тепла по всей толщине пластины при отсутствии теплоотдачи с её поверхности можно получить, преобразуя формулу (21):

$$\Delta T = \frac{Q/\delta}{C\rho 4\pi at} e^{-r^2/(4at)}, \#(24)$$

где δ – толщина пластины, см;

r – расстояние от начала координат, где было введено тепло, до рассматриваемой точки, см.

Так как пластина по оси z ограничена толщиной, а тепло распространяется по плоскости с координатными осями x и y , то формула (8) примет следующий вид:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}. \#(25)$$

Ввиду того что тепло распространяется только в направлении двух осей x и y , распространение тепла в пластине происходит более скованно, нежели в полубесконечном теле. Это выражено медленным изменением температур в пластине.

В редких случаях при расчетах температур в пластинах нельзя пренебрегать теплоотдачей в окружающую среду и её необходимо учитывать. Например, в пластинах с малой толщиной. В данном случае приращение температуры описывается следующей формулой:

$$\Delta T = \frac{Q/\delta}{C\rho 4\pi at} e^{\frac{-(\sqrt{x^2+y^2})^2}{(4at)-bt}}, \#(26)$$

где b – коэффициент поверхностной теплоотдачи, $1/\text{с}$.

Формула (26) учитывает теплоотдачу в окружающую среду, не отражая того, что процесс теплоотдачи проходит на поверхности пластины и температура по толщине неравномерна. Однако в тонких пластинах неравномерность распределения температуры по толщине настолько незначительна, что ей можно пренебречь.

Чем дольше проходит нагрев пластины, тем существеннее становится значение теплоотдачи в изменении температуры.

Так как в данных уравнениях учитывается одновременное введение тепла во всех рассматриваемых точках, то с помощью этих уравнений можно оценивать температуры при контактной сварке тонких пластин, но оценить сварку пластин встык при большой толщине невозможно.

Для описания более сложных процессов распространения тепла, где задействуются движущийся и быстродвижущийся источники, необходимо воспользоваться принципом наложения в формулах (21) и (24).

1.4 Движущийся точечный источник тепла на поверхности полубесконечного тела

Для описания процесса распространения теплоты от движущихся непрерывно действующих источников тепла используют принцип наложения, также называемый, как принцип суперпозиции суперпозиций. Для этого все время действия источника тепла разбивают на бесконечно малые отрезки времени dt . В таком случае действие источника в течении бесконечно малого отрезка времени позволяет описывать его, как действие мгновенного источника тепла. Таким образом, суммируя процессы распространения тепла от мгновенных источников тепла, которые действуют друг за другом в разных местах тела, получают уравнение температурного поля при постоянном действии движущегося источника тепла, что и отображено на рисунке 3.

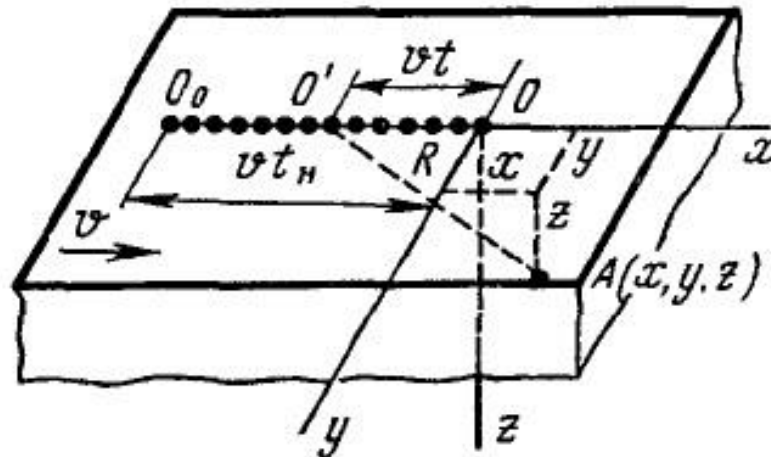


Рисунок 3 – Схема непрерывно движущегося источника тепла на поверхности полубесконечного тела

Просуммировав приращения температур от всех мгновенных точечных источников тепла, которые описываются формулой (21) движущийся точечный источник на поверхности полубесконечного тела будет описываться следующей формулой:

$$\Delta T = \frac{2q}{c_p(4\pi a)^{3/2}} e^{-\frac{vt}{2a}} \int_0^{t_n} e^{-\frac{v^2 t}{4a} - \frac{R^2}{4at}} \frac{dt}{t^{3/2}}, \#(27)$$

где q – эффективная мощность сварочного источника тепла, Вт;
 v – скорость движения источника, см/с;
 t_n – время движения источника, с.

Формула (27) описывает приращение температур в полубесконечном теле на стадии теплонасыщения.

При предельном состоянии, когда после продолжительного действия источника тепла, температура точек в подвижной системе координат перестает изменяться во времени. Такое состояние описывается следующей формулой:

$$\Delta T_{\text{пр}} = \frac{q}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{v}{2a}(R+x)}. \#(28)$$

Если рассмотреть формулу (28) при условии, что скорость источника будет равна нулю, получим формулу стационарного температурного поля в полубесконечном теле:

$$\Delta T_{\text{пр}} = \frac{q}{2\pi\lambda R}. \#(29)$$

В данном случае приращения температуры на расстоянии (R) будут прямо пропорциональны эффективной мощности источника и обратно пропорциональны коэффициенту теплопроводности. Исходя из этого уравнения, можно утверждать, что в предельном состоянии, имея конкретное значение приращения температуры ($\Delta T_{\text{пр}}$), можно определить геометрические параметры шва, такие как длина, ширина и глубина проплавления шва.

Уравнение относительно температуры плавления из (28) является относительно простым, и может рассчитываться без применения вычислительных программ. В уравнении (27) применяется интегрирование, что может затруднять процесс вычисления, поэтому для упрощения проведения расчёта можно воспользоваться специальной вычислительной программой. В отдельных случаях, когда нельзя взять интеграл в уравнении (27), для определения приращения температур можно воспользоваться номограммами, которые встречаются у Фролова В.В. «Теория сварочных процессов» [12].

Формулы (28,29) подходят для описания распространения температуры при наплавке валика на массивное тело, но не подходят для описания сварки пластин встык.

1.5 Движущийся линейный источник тепла в бесконечной пластине

Линейный источник тепла, с равно распределенной по толщине пластины, мощностью (q) движется с постоянной скоростью v . Граничные плоскости пластины $z=0$ и $z=\delta$ выделяют тепло в окружающую среду. Температуру окружающей среды (T_c) примем равной начальной температуре тела (T_n). Схема движущегося линейного источника тепла в бесконечной пластине изображена на рисунке 4.

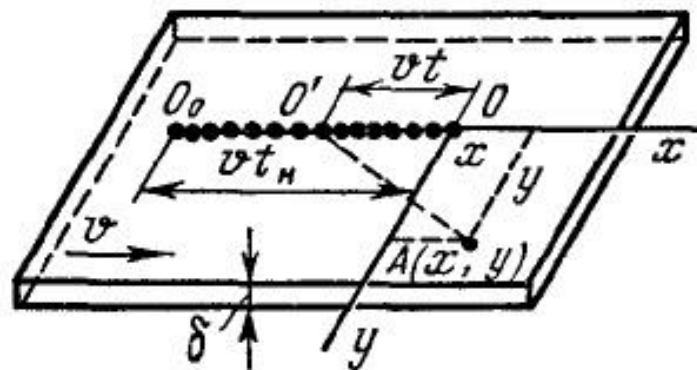


Рисунок 4 - Схема непрерывно движущегося линейного источника тепла в бесконечной пластине

Формула, которая описывает приращений температур в пластине, будет получена по такому же принципу, как в случае с точечным источником тепла в полубесконечном теле. За основу взято уравнение (24) после сложения приращений температур от всех мгновенных точечных источников тепла и выражено в следующем виде:

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx}{2a}} \int_0^{t_n} e^{-\left(\frac{v^2}{4a} - b\right)t - \frac{r^2}{4at}} \frac{dt}{t}. \#(30)$$

Формула (30) описывает приращение температур в бесконечной пластине на стадии теплонасыщения. Предельное состояния, которое еще

называют квазистационарное, достигается при условии, когда время движения источника (t_n) стремится к бесконечности. В этом случае формула преобразуется и принимает следующий вид:

$$\Delta T_{\text{пр}} = \frac{q}{4\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx}{2a}} K_0 \left(\frac{vr}{2a} \sqrt{1 + \frac{4ba}{v^2}} \right), \#(31)$$

где K_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Формула (31), считается справедливой при условии, что тепло распределяется по толщине равномерно. Однако, в действительности из-за наличия теплоотдачи на поверхности пластины существуют некоторые неравномерности распределения температуры. Эта неравномерность будет увеличиваться с увеличением коэффициента теплопроводности (a) и теплоотдачи (b). Исходя из того, что для расчетов приращений температур, теплофизические коэффициенты принимают, как не зависящие от температур и присваивают некоторые средние значения. Поэтому фактический процесс теплоотдачи будет происходить интенсивнее в области высоких температур, а в области низких температур слабее, чем это может определено в расчетах.

При расчёте по (31), функция Бесселя (K_0) можно найти по специальным таблицам и использование специальных расчётных программ просто ускорит процесс вычисления. Что нельзя сказать про уравнение (30). Так как с вычисление интеграла может вызвать затруднение, целесообразнее вычислять по этой формуле с помощью программ.

Формулы (30,31) подходят для описания распространения тепла при сварке тонких пластин. Однако в [10] для определения размеров сварного шва предложено осуществлять сварку с неполным проплавлением по стыку или проводить двухстороннюю сварку стыка. Производить ручную дуговую

сварку тонких пластин, плавящимся электродом, согласно методике [10], не рекомендовано.

1.6 Движущийся точечный источник тепла на поверхности пластины

Данный случай близок к наплавке валика на пластину. Есть три схемы расчета температур, которые зависят от толщины пластины. При тонкой пластине, расчёт проводят, как для линейного источника тепла, так как предполагают, что источник выделяет температуру равномерно по всей толщине пластины. При толстых пластинах отражением теплоты от нижней границы пренебрегают, тогда расчёт ведут по схеме точечного источника тепла на поверхности полубесконечного тела. Если обе схемы не подходят, то используют схему плоского слоя с точечным источником тепла на поверхности, принимая, что обе поверхности не пропускают теплоту.

Используя формулу (27) для определения приращения температур и просуммировав приращение температурных полей от всех точечных источников мощностью q , перемещающихся со скоростью v в предельном состоянии, получим уравнение следующего вида:

$$\Delta T = \frac{2q}{C_p(4\pi a)^{3/2}} e^{-vx/2a} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \int_0^{\infty} \frac{dt}{t^{3/2}} * e^{\left(\frac{-v^2 t}{4a} - \frac{R_n^2}{4at}\right)}, \#(32)$$

$$R_n^2 = x^2 + y^2 + (z - 2n\delta)^2, \#(33)$$

где n – целые числа от $-\infty$ до $+\infty$.

Численное определение приращений температуры проводят по формуле:

$$\Delta T = m \frac{q}{2\pi\lambda\delta} e^{-vx/(2a)} K_0\left(\frac{vr}{2a}\right), \#(34)$$

где m – коэффициент, определяемый по номограмме, изображенной на рисунке 3, соответствующего верхней и нижней плоскостям плоского слоя и выражающего отношение приращений температуры на поверхности плоского слоя, нагреваемого точечным источником, к приращению температуры пластины, вызываемой линейным источником. Для $z=0$ $m>1$, для $z=\delta$ $m<1$.

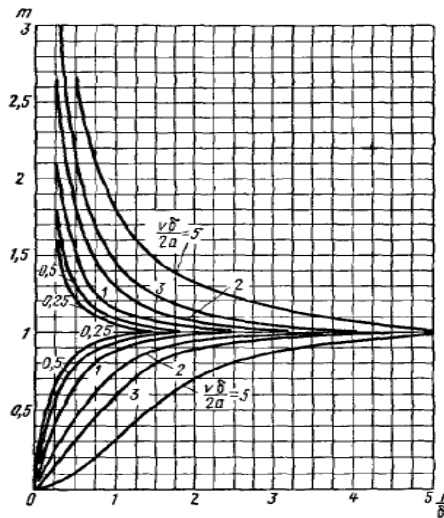


Рисунок 5 – Номограмма для определения коэффициента m

Температурные поля в плоском слое, условно, можно разделить на три зоны. Первая зона, которая прилегает к источнику тепла, распределение температуры не существенно отличается от распределения в полубесконечном теле. Вторая зона является переходной. Третья зона, которая обычно находится на расстоянии в несколько толщин пластины, температура по толщине выравнена и температурное поле приблизительно описывается полем от линейного источника тепла в пластине. Размеры зон могут меняться в зависимости от режимов сварки и свойств металла.

Так как в формуле (32) учитывается многократное отражение тепла, которое стремится к бесконечности, вычисления по ней без применения

специальных вычислительных программ весьма трудоемко и нецелесообразно. Формула (34) вычисляется аналогично (31).

Формула (32) подходит для определения приращения температур при ручной дуговой сварке пластин, плавящимся электродом с неполным проваром. В зависимости от толщины пластины выбирается необходимая схема проведения вычислений.

1.7 Движущийся нормально-круговой источник тепла на поверхности плоского слоя.

Процесс нагрева пластины движущимся нормально-круговым источником рассматривается с использованием принципа наложения, также как для движущегося точечного источника тепла на поверхности бесконечного тела. Схема нагрева плоского слоя поверхностным движущимся нормально-круговым источником тепла, изображена на рисунке 6.

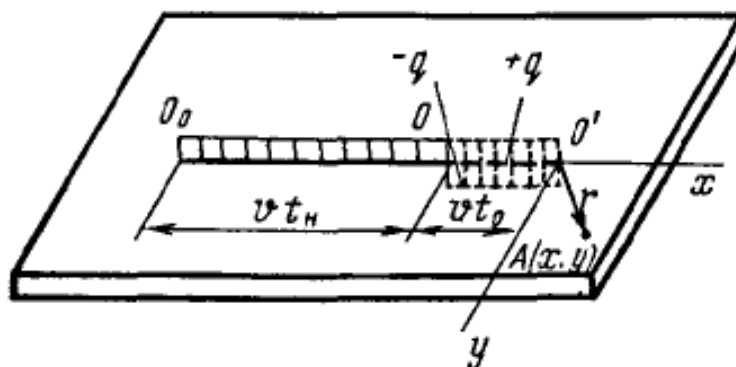


Рисунок 6 – Схема нагрева пластины поверхностным движущимся нормально-круговым источником тепла

Схема тела «плоский слой» может использоваться для расчёта температур при сварке пластин.

Для оценки приращения температур в любой точке на пластине предполагают, что вместе с действительным источником вводится равный по

мощности некий фиктивный источник, который движется с опережением во времени (t_0) на расстояние (vt_0). Учитывая данное условие и принимая за основу формулу (30), представляют в следующем виде:

$$\Delta T = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} e^{\frac{-vx}{2a+bt_0}} \int_0^{t_H-t_0} e^{-\left[\frac{v^2}{4a+b}\right]t - \frac{r^2}{4at}} dt - \frac{q}{2\pi\lambda\delta} e^{\frac{-vx}{2a+bt_0}} \int_0^{t_0} e^{-\left[\frac{v^2}{4a+b}\right]t - \frac{r^2}{4at}} dt. \quad \#(35)$$

Численное определение приращений температуры может быть описано с использованием коэффициента теплонасыщения. Уравнения будут следующего вида:

$$\Delta T = \Delta T_{\text{пр}} e^{bt_0} [\psi_2(\rho_2; \tau_H - \tau_0) - \psi_2(\rho_2; \tau_0)], \quad \#(36)$$

где ψ_2 – коэффициент теплонасыщения;

τ , ρ – безразмерные критерия времени и расстояния от источника тепла до рассматриваемой точки, соответственно.

$$\rho_2 = \frac{vr}{2a} \sqrt{1 + \frac{4ba}{v^2}}, \quad \#(37)$$

$$\tau_H = \frac{v^2 t_H}{4a} \left(1 + \frac{4ba}{v^2}\right), \quad \#(38)$$

$$\tau_0 = \frac{v^2 t}{4a} \left(1 + \frac{4ba}{v^2}\right). \quad \#(39)$$

Определив безразмерные критерии по формулам (37–39), коэффициент теплонасыщения находится по номограмме, изображенной на рисунке 5.

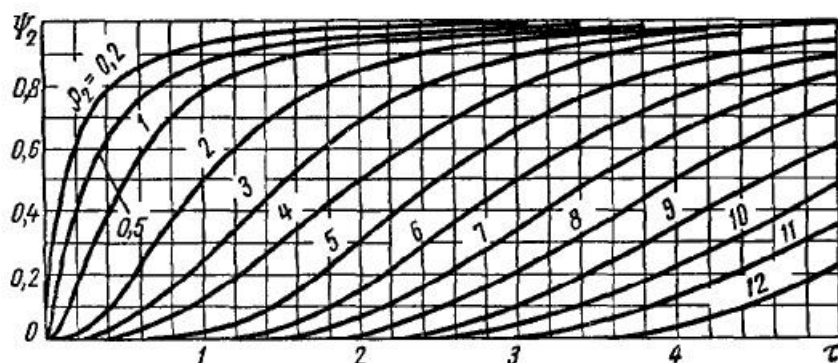


Рисунок 7 – Номограмма для определения коэффициента теплонасыщения, для линейного источника в бесконечной пластине

В предельном состоянии, когда время движения источника стремится к бесконечности, формулу (35) можно выразить следующим образом:

$$\Delta T = \Delta T_{\text{пр}} e^{bt_0} [1 - \psi_2(p_2; \tau_0)]. \#(40)$$

В данном случае, $\Delta T_{\text{пр}}$ можно определить по уравнению (29);

Приращения температуры в формулах (36) и (40) можно найти, не прибегая к использованию вычислительных программ. Что нельзя сказать о формуле (35). В данном случае определить приращение температур без специальных программ невозможно.

Для определения площади проплавления основного металла предлагается использовать формулу движущегося точечного источника на поверхности пластины или формулу НКИ для такой же пластины. Данные формулы учитывают основные тепловые процессы, происходящие в пластинах при ручной дуговой сварке плавящимся электродом. Формула НКИ несколько сложнее, так требуется определять коэффициент сосредоточенности сварочного источника тепла. В данной работе будем применять одну из этих формул, в зависимости от того, какая из них лучше описывает размеры сварного шва. Формула для НКИ превращается в формулу для точечного источника, если в ней постоянную t_0 принять равной

нулю. Поэтому компьютерные программы для расчета температур очень похожи и представлены в [10].

1.8 Методики определения химического состава наплавляемого металла

Химический состав наплавляемого металла можно определить по многослойной наплавке. Часто его называют наплавленным металлом, но это не вполне точно. Однако такое применение уже устоялось и с ним приходится считаться. Этот способ характеризуется тем, что с каждым наплавляемым слоем доля участия основного металла в наплавке снижается. В восьмом слое содержание основного металла будет крайне мало, а химический состав наплавляемого металла будет близок к химическому составу «чистой» наплавки.

Данный способ регламентируется в ГОСТ 9466-75 «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки сталей и наплавки. Классификация и общие технические условия» [15]. Для определения химического состава наплавляемого металла на пластине из стали марки Ст3сп по ГОСТ 380 «Сталь углеродистая обыкновенного качества» [22] или из стали, для сварки или наплавки которой предназначены электроды. Когда испытания проводят для электродов по ГОСТ 10051 «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами» и ГОСТ 10052 «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами» [23; 24], то пластины следует использовать из стали марок 08X18H10 или 12X18H9T по ГОСТ 5632-2014 «Нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные» [25]. При этом производят многослойную наплавку, изображенную на рисунке 8, электродами контролируемой марки. Регламентируемые размеры пластины 120x80x20 мм (с предельным отклонением длины и ширины ± 5 мм, толщины ± 2 мм), площадь наплавки должна быть не менее 80x40 мм. Для электродов

диаметром до 5 мм толщина пластин может быть уменьшена, но не должна быть менее четырех диаметров электрода [15].

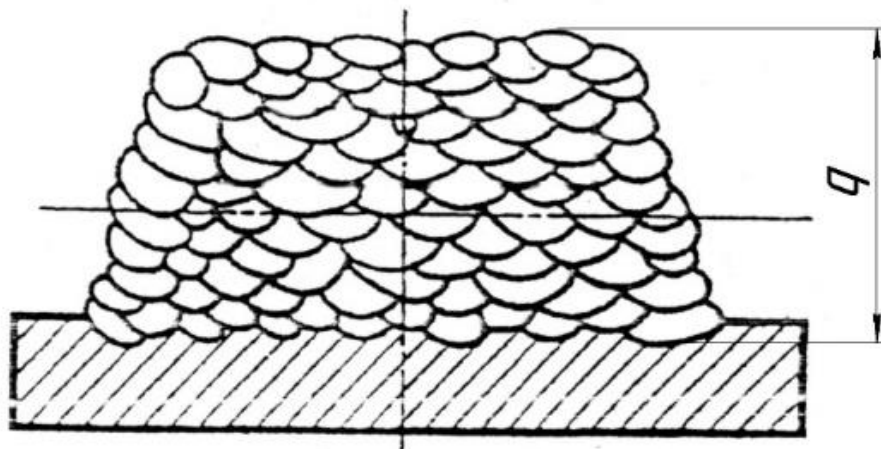


Рисунок 8 – Многослойная наплавка, $q \geq 8$ слоёв

Однако, в литературе [13, с 76] расчётные данные указывают, на то, что доля участия основного металла в многослойной наплавке будет иметь достаточно маленькое значение, чтобы его можно было не учитывать, при наплавке в пять слоёв. Эти данные позволяют снизить трудоемкость при производстве наплавки, не снижая точность определения химического состава.

С того момента технологии активно развивались, открывая новые возможности для анализа, и в настоящее время, используя высокоточные приборы для спектрального анализа, можно обходиться меньшим количеством наплавленных слоев при определении химического состава наплавленного металла.

Для химического анализа наплавляемого металла, пробы отбирают их трех верхних слоев восьмислойной наплавки или с двух верхних слоев пятислойной наплавки. Отбор стружки из наплавленного металла с содержанием углерода менее 0,040% производят соответственно

дополнительным указаниям стандарта или техническим условиям на электроды контролируемой марки.

Непосредственное определение химического состава наплавленного металла, регламентируется:

- ГОСТ 22536.1-88 «Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения общего углерода и графита»;

- ГОСТ 22536.2-87 «Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения серы»;

- ГОСТ 22536.3-88 «Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения фосфора»;

- ГОСТ 22536.4-88 «Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения кремния»;

- ГОСТ 22536.5-87 «Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения марганца»;

- ГОСТ 22536.7-88 «Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения хрома»;

- ГОСТ 22536.8-87 «Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения меди»;

- ГОСТ 22536.9-88 «Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения никеля».

Также можно использовать иные методы, которые позволяют обеспечить точность определения, предусмотренную указанными стандартами.

Для проведения спектрального анализа наплавленного металла необходимо подготовить верхний слой наплавки. Поверхность должна быть ровной и зачищена до металлического блеска. Не допускается наличие грязи или масляных следов на поверхности наплавки. Рекомендуется обезжирить поверхность перед проведением анализа.

Также осуществлять наплавки для отбора проб и определения химического состава наплавляемого металла можно согласно международному стандарту ISO 6847 «Welding consumables — Deposition of a

weld metal pad for chemical analysis» [16]. В данном стандарте рассмотрены виды осуществления наплавки, которые отображены на рисунке 9.

«После каждого наплавленного слоя, образец следует остужать в воде в течении 30 секунд, после чего образец необходимо просушить. Следующий слой следует наплавливать в обратном направлении. Шлак счищается с каждого наплавленного слоя» [16].

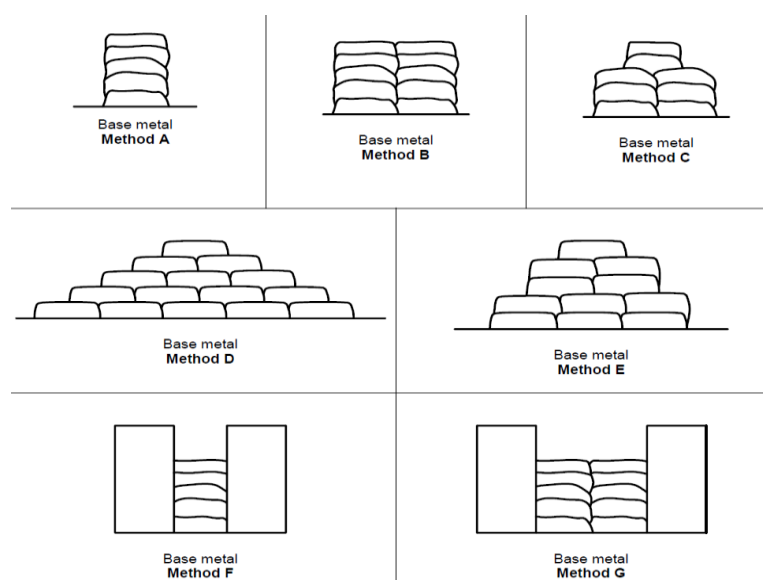


Рисунок 9 – Виды осуществления наплавки по ISO 6847

Рекомендованные размеры металлической пластины для наплавки и размеры сварочных материалов при применении разных способов сварки указаны в таблице 3.

Таблица 3 – Размеры пластин и диаметр сварочных материалов для различных способов сварки

Вид сварки	Диаметр сварочных материалов, мм	Размер пластины	
		Длина	Толщина
РДСПЭ, Аргонодуговая сварка	1,6 – 4 мм	55 мм	10 мм
	4 – 8 мм	65 мм	

Продолжение таблицы 3

Сварка в среде защитного газа	0,6 – 2,5 мм	100 мм	10 мм
Автоматическая сварка	0,6 – 4 мм	100 мм	10 мм
Сварка сочетанием порошковых проволок под слоем флюса	1,2 – 4 мм 4 – 6 мм	200 мм 300 мм	15 мм

Согласно международному стандарту, участок для отбора проб должен быть очищен от возможных загрязнений и механически обработан. Отбор проб следует осуществлять не менее чем с 5 слоя.

Определение химического состава наплавленного металла по многослойной наплавке является весьма точным способом. Однако он имеет и ряд недостатков:

- большая трудоемкость при осуществлении многослойной наплавки,
- большой расход электродов,
- большие затраты электроэнергии.

В литературе встречается упоминание о способе наплавки в медную форму дугой прямого действия [13, с 74]. Данный способ характеризуется отсутствием участия основного металла в наплавке. Исходя из этого, химический состав наплавки будет близок к химическому составу многослойной наплавки. В действительности, малое количество основного металла (меди) будет участвовать в химических реакциях, происходящих в сварочной ванне, но его влияние не велико и позволяет оценить химический состав наплавляемого металла.

В бакалаврской работе автора описаны результаты определения химического состава наплавляемого металла при наплавке в медную форму и на массивную медную пластину, полученные опытным путем [17].

В данных исследованиях автор использовал дугу косвенного действия для осуществления наплавки покрытыми электродами. Преимущество использования дуги косвенного действия в полном исключении проплавления основного металла, что в тоже время снижает долю участия основного металла до нуля. Это достигается в результате того, что в схеме токоподвода отсутствует подвод тока на изделие. Из этого следует, что наплавка образуется в большей степени за счёт наплавляемого металла.

В качестве сварочного материала использовались электроды марки ТМЛ-1У, предназначенные для сварки легированных теплоустойчивых сталей. Сварка проводилась при силе тока дуги равной 100 А, на постоянном токе обратной полярности. В ходе проведения наплавки была получена проба, длина которой составила 31 мм, ширина около 12 мм.

В дальнейшем проба была расплющена на прессе. Поверхность была обработана шкуркой. Химический состав определялся при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра.

По результатам химического анализа, который отражен в таблице 4, можно утверждать, что некоторое влияние основного металла в данном случае присутствует. На это указывает наличие меди в наплавленном металле. Также в наплавленном металле зафиксирован кальций и никель, которые не заявлены производителем электродов. Эти элементы могли попасть в наплавку при недостаточном очищении медной пластины или при непосредственной подготовке пробы для проведения анализа.

Таблица 4 – Химический состав наплавленного металла дугой косвенного действия

Элемент	C	Mn	Si	Cr	Mo	S	P	Ca	Cu	Ni	Fe
Содержание, %	-	0,708	-	1,101	0,445	0,036	-	0,534	0,324	0,082	96,77
Среднее по стандарту	0,08	0,7	0,275	1,0	0,55	0,025	-	-	-	-	-

Данный способ имеет ряд недостатков:

- сложно провести химический анализ из-за малого размера проб,
- невозможно провести спектральный анализ без предварительной подготовки проб,
- высокая трудоемкость подготовки проб,
- высокая стоимость меди.

Также автор в бакалаврской работе описал способы определения химического состава электродного металла с помощью наплавки дугой косвенного действия в медную форму, на алюминиевую пластину и в графитную колодку [43]. Однако результаты анализа химического состава наплавленного металла показали малую точность при применении данных способов.

Анализируя методы определения химического состава в наплавляемом металле (C_n), стоит отметить, что наиболее точным будет метод многослойной наплавки. Трудоемкость этого метода можно снизить, за счёт уменьшения количества наплавленных слоев. На это указывают некоторые расчётные данные в литературе. Также в бакалаврской работе, автором было проведено исследование увеличения процентного содержания легирующего химического элемента происходящие от слоя к слою в наплавке. Результаты показали, что при наплавке третьего и последующих слоев, увеличение процентного содержания элементов резко снижается, а химический состав наплавленных слоев объективно отражает, заявленный производителем, химический состав наплавленного металла.

Если заменить проведение химического анализа на спектральный анализ портативными спектрометрами, то производительность данного метода возрастает в разы, не теряя точности определения химического состава. Данный метод ляжет в основу определения химического состава в наплавляемом металле (C_n), для этой работы.

В данной работе предлагается использовать способ определения площади проплавления поперечного сечения основного металла с

использованием формул распространения тепла для определения содержания химического элемента (C_d) в дополнительном металле. Для этого необходимо произвести наплавку валика по стыку двух пластин с зазором.

Можно отметить, что роль учета влияния основного металла на процессы легирования шва, по-видимому, преувеличена. Как в верхних слоях многослойной наплавки, так и при сварке обычного сварного шва, металл, взаимодействующий с наплавляемым металлом, при сварке низколегированных сталей не менее, чем на 95% состоит из железа. Маловероятно, что столь незначительное увеличение содержания железа в обычном шве может сильно повлиять на протекание металлургических реакций в сварочной ванне. При сварке высоколегированных сталей наплавка должна выполняться на сталь близкого химического состава поэтому можно привести те же доводы.

Поэтому доступное расчетное определение химического состава дополнительного металла сварного шва и сравнение его с составом наплавленного металла может дать много полезной информации о металлургических процессах в сварочной ванне и при хорошем совпадении быть использовано для идентификации качества сварочных материалов.

На основе выше изложенных данных можно сформулировать следующие задачи работы:

- исследовать влияния параметров сварки на площадь проплавления основного металла;
- произвести сварку и наплавку образцов;
- провести необходимые измерения и анализы для расчёта площади проплавления основного металла;
- рассчитать площадь проплавления основного металла и с ее помощью определить химический состав наплавленного дополнительного металла;
- провести сравнительный анализ состава дополнительного металла с результатами, полученными при многослойной наплавке.

2 Исследование влияния параметров сварки на площадь проплавления основного металла

2.1 Компьютерная программа для расчёта размеров сварочной ванны при действии точечного источника тепла на поверхность пластины

«Для определения размеров шва нужно приведенные ранее формулы превратить в уравнения. Для этого в формулах приращение температуры принимается равным приращению температур до температуры плавления. Начальная температура пластин принимается известной T_0 » [10].

«Определение глубины проплавления с помощью программы происходит по следующей схеме. Координата по оси Y задается ($y=0$), так как известно, что вследствие симметрии температурного поля относительно оси X , при этой координате (y) обеспечивается максимальная глубина проплавления. Затем задается точка с координатой ($x=0$) на оси источника тепла и методом дихотомии вычисляется первое значение координаты ($z=H$), представляющей граничную точку с температурой плавления. Программа автоматически изменяет шаг перемещений по оси X до заданной заранее координаты (x_{MAX}), заведомо превышающей координату с максимальной глубиной проплавления. При расчетах положительное направление оси (X) для удобства следует выбрать противоположно направлению сварки, что достигается изменением знака при координате (x) в уравнении, полученном из формулы (32). Действие программы прекращается, когда значения координаты (x) достигается установленного максимума, назначаемого заведомо большим, чем длина сварочной ванны или вручную, когда значения глубины проплавления перестают изменяться или начинают уменьшаться. Из полученных значений глубины проплавления выбирается точка с максимальным значением H_0 . Для определения ширины ванны нужно найти координату y , при которой провар будет равен нулю» [10]. Данная схема определения ширины сварочной ванны наглядно изображена на рисунке 10.

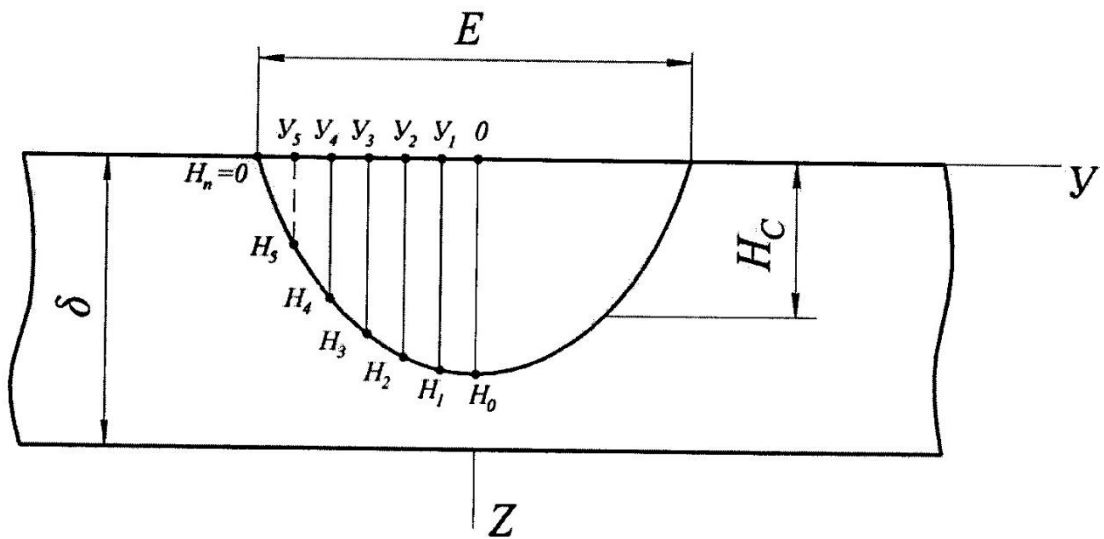


Рисунок 10 – Схема определения ширины сварочной ванны путем измерения провара при разных y

В дальнейшем по полученным результатам глубины проплавления и ширины сварочной ванны можно построить их изображения на координатной плоскости. Изображения глубины проплавления и ширины сварочной ванны отображены на рисунках 11 и 12.

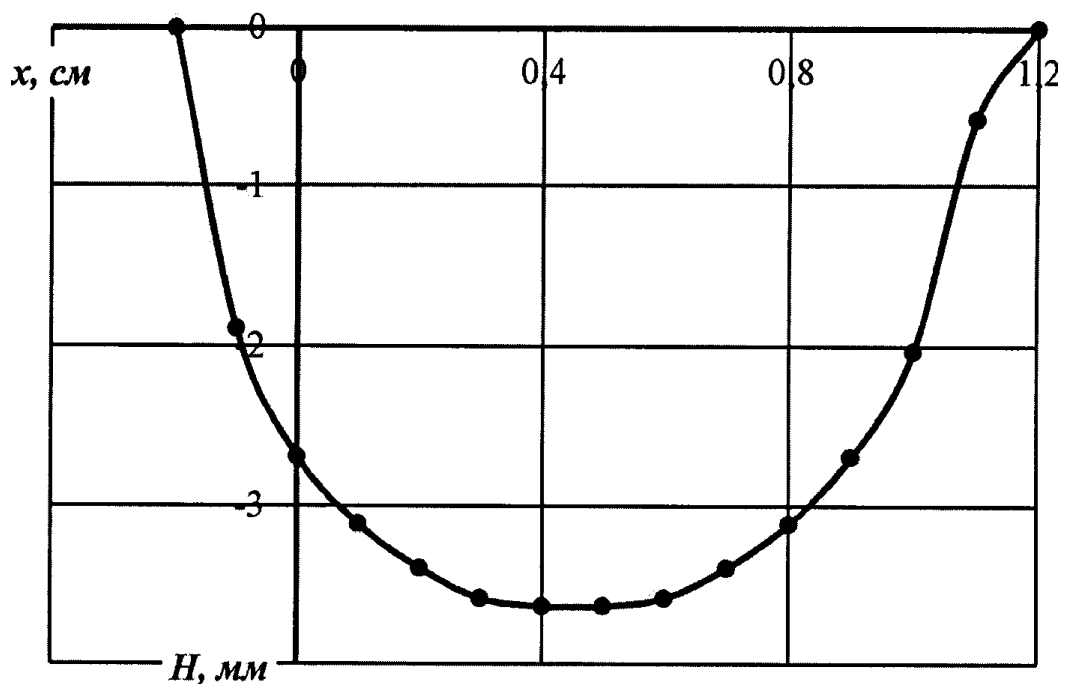


Рисунок 11 – Изображение провара на координатной плоскости XOZ

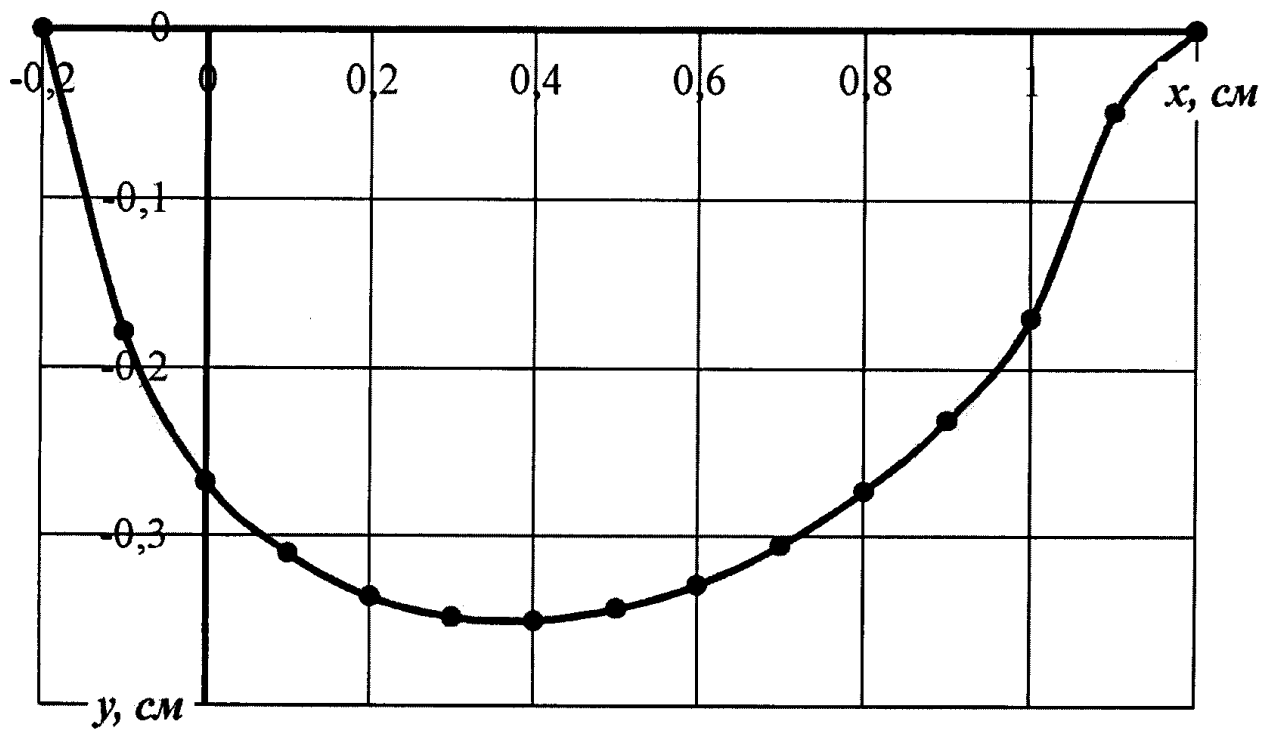


Рисунок 12 – Изображение ширины сварочной ванны на координатной плоскости XOY

Методы решения линейных уравнений типа (32) подробно изложены в специальной литературе и имеются готовые компьютерные программы на разных языках программирования или в программных комплексах типа MatCad. В определенное место таких программ заносятся вычисления по исходной функции, по которой составляется уравнение. Метод дихотомии изложен в [26, с 89].

Некоторой проблемой при использовании формулы (32) для расчета температур при сварке при линейной постановке задачи (теплофизические коэффициенты σ_r , а принимаются не зависящими от температуры) является именно назначение величин этих коэффициентов, так как в действительности они в определенной степени зависят от температуры. Обычно добиваются наилучшей сходимости расчетных и опытных термических циклов, выбирая значения коэффициентов для некоей усредненной температуры в зоне сварки. Рекомендации по выбору такой усредненной температуры в зоне сварки обоснованы пока недостаточно. Однако, если, как в предлагаемом

способе использовать два параметра температурного поля (в предлагаемом способе определения площади поперечного сечения проплавления основного металла это глубина проплавления и ширина сварного шва или две ширины одностороннего шва), то можно получить значения коэффициентов K и a с высокой точностью. При этом отпадает необходимость измерения эффективной мощности сварки и назначения теплофизических коэффициентов. Именно это лежит в основе большинства технических результатов предлагаемого способа. Такой методикой устраняются неточности математической модели, вызванные принятием допущения о постоянстве теплофизических коэффициентов, отсутствии учета их зависимости от температуры и в то же время отпадает необходимость в измерении эффективной мощности сварочной дуги [27; 28].

«Для однозначного определения коэффициентов K и a на номинальном режиме сварки нужно измерить приращения температур в двух точках тела с координатами x_1, y_1, z_1 и x_2, y_2, z_2 . Тогда из формулы (32) можно составить систему уравнений относительно неизвестных коэффициентов K и a . Так как известно, что на границе сварного шва с основным металлом при сварке температура всегда равна температуре плавления, можно использовать ширину сварного шва и максимальную глубину проплавления шва для отыскания постоянных коэффициентов K и a в формуле (32), а затем применять эти коэффициенты при расчете площади поперечного сечения проплавления основного металла. При этом обеспечивается высокая точность определения площади, так как измеренные размеры шва передают его форму, а расчетная формула (32) позволяет с высокой точностью рассчитать промежуточные размеры проплавления основного металла» [10].

2.2 Исследование влияния мощности дуги, скорости сварки, толщины металла на размеры шва

При расчете влияния параметров сварки на размеры шва принимаем базовый режим: скорость сварки ($v_{св}$) 0,15 см/с, толщина пластин (δ) из

низкоуглеродистой стали 6 мм, ток дуги (I_d) 120 А, напряжение дуги (U_d) 25 В.

Принимаем эффективный КПД ручной сварки $\eta=0,75$ [1]. Тогда эффективную мощность можно вычислить по формуле:

$$q = \eta I_d U_d = 0,75 \cdot 120 \cdot 25 = 2250 \text{ Вт, \#(41)}$$

где q – эффективная мощность источника, Вт;

η – эффективная КПД при ручной дуговой сварке;

I_d – сила тока дуги, А;

U_d – напряжение дуги, В.

Теплофизические коэффициенты для низкоуглеродистой стали брались по [29]. Объемная теплоемкость (C_p) равна 5 Дж/(см³ · °С). Коэффициент температуропроводности (a) равна 0,08 см²/с. Температура плавления стали равна 1500 °С. Начальная температура тела бралась равной 20 °С.

Используя программу HNKI [30] рассчитываем влияние скорости сварки на провар. Используем схему точечного источника тепла, поэтому постоянную, характеризующую сосредоточенность источника тепла принимаем $t_0 = 0$. Изменяем координату X на 0,1 см и рассчитываем размер шва []. Потом выбираем максимальный провар.

Результаты вычисления для удобства занесены в таблицы 5 и 6, по которым можно проследить зависимости влияния мощности дуги и скорости сварки на провар и ширину шва.

Таблица 5 – Влияние скорости сварки на провар и ширину шва.

Скорость, см/с	0,15	0,2	0,25	0,3
H, мм	5,03	3,77	3,21	2,92
B, мм	7,89	6,82	6,16	5,69

Таблица 6 - Влияние мощности дуги на провар и ширину шва.

Мощность дуги, Вт	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
Н, мм	2,83	3,02	3,21	3,49	3,77	4,05	4,42	4,99
В, мм	5,46	5,78	6,16	6,49	6,82	7,19	7,57	7,89

По полученным результатам были построены графики 13 и 14, чтобы наглядно проследить зависимости.

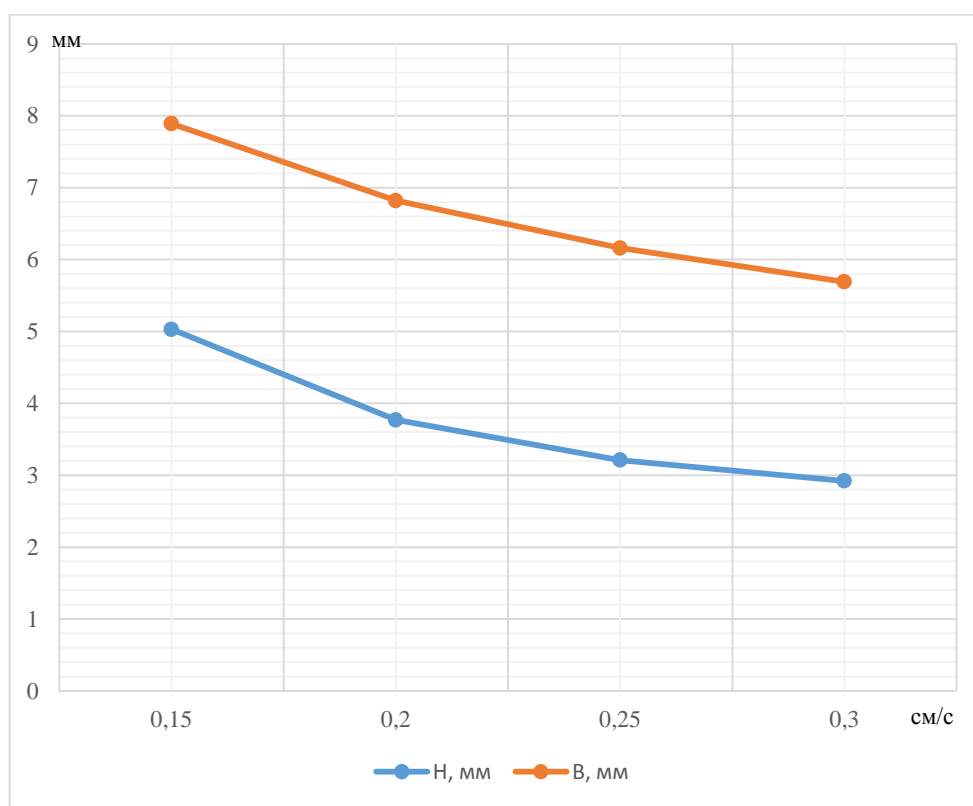


Рисунок 13 – Влияние скорости сварки на провар и ширину шва

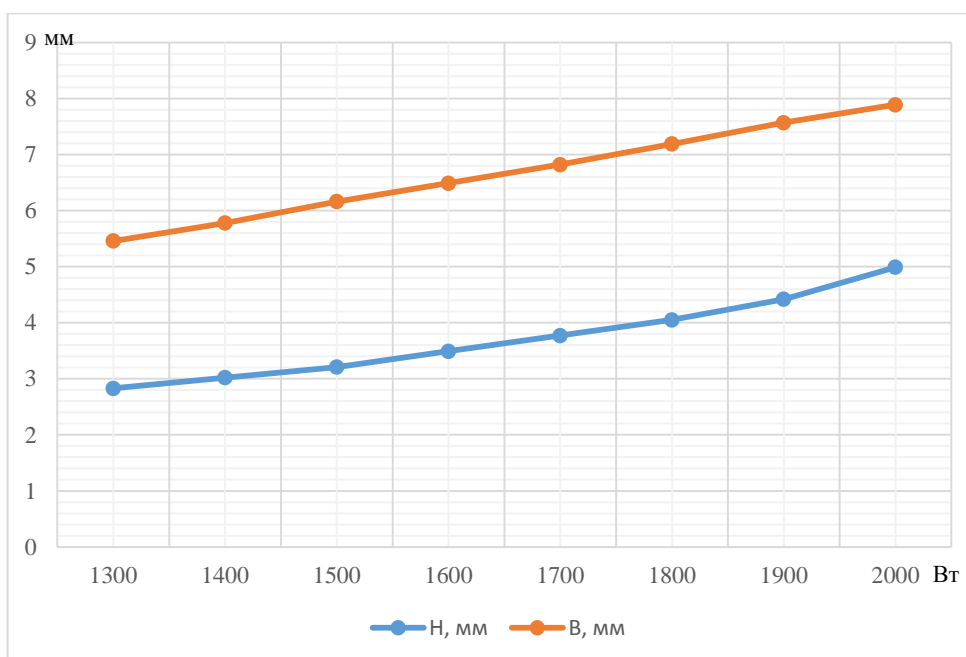


Рисунок 14 - Влияние мощности на провар и ширину шва

Следует учесть, что при измерении влияния скорости сварки на проплавление и ширину шва, мощность дуги была постоянной и составляла 1500 Вт. Также при определении влияния мощности дуги на проплавление и ширину шва, скорость сварки была постоянной и составила 0,25 см/с.

По полученным результатам, можно утверждать, что глубина проплавления и ширина валика имеют прямую зависимость по мощности дуги и обратную зависимость по скорости сварки.

2.3 Обоснование методики для определения геометрических параметров сварочной ванны

Для определения коэффициентов модели применим следующую методику. Зададим все коэффициенты усредненными по литературным данным, и определим по ширине шва эффективную мощность источника тепла. Затем аналогично рассчитаем мощность по глубине проплавления. За результат примем среднее значение мощности.

Мощность сварочной дуги принимаем равной 1500 Вт, скорость сварки равной 0,25 см/с, толщина пластины составила 6 мм. Результаты, полученные в ходе расчётов, занесены в таблицы 7 и 8.

Таблица 7 - Продольное сечение сварочной ванны

X, см	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
H, мм	0	1.05	2.41	2.97	3.21	3.21	2.97	2.32	0.25	≈0

Продольное сечение сварочной ванны по данным таблицы 7, изображено на рисунке 15.

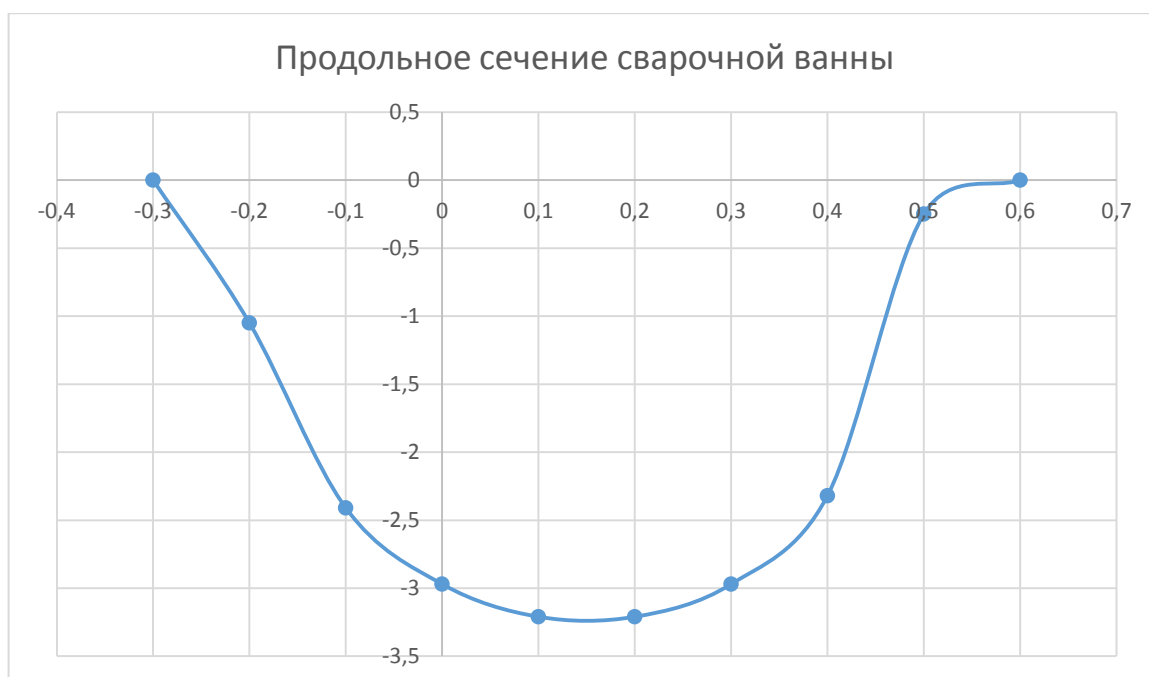


Рисунок 15 – Продольное сечение сварочной ванны

На данном режиме общая длина сварочной ванны на лицевой поверхности пластины составляет 0,9 см, провар 3,25 мм. Впереди оси источника тепла длина ванны 0,3 см и позади оси 0,6 мм. Поперечное

сечение основного металла шва можно получить, строя аналогичные графики при различных значениях (у) и нанося полученные максимальные провары вдоль оси Y [31]. Максимальное время нахождения металла сварочной ванны в жидком состоянии определяется по формуле:

$$t_{ж} = L_{в}/v_{св} = 0,9/0,25 = 3,6 \text{ с, \#(42)}$$

где $t_{ж}$ – время нахождения металла в жидком состоянии, с;

$L_{в}$ – длина сварочной ванны, мм.

Таблица 8 - Поперечное сечение проплавления основного металла

У, см	0	0.1	0.2	0.3	≈0.35
Н, мм	3.21	3.02	2.41	0.67	0

Поперечное сечение проплавления основного металла по данным таблицы 8, изображено на рисунке 16.

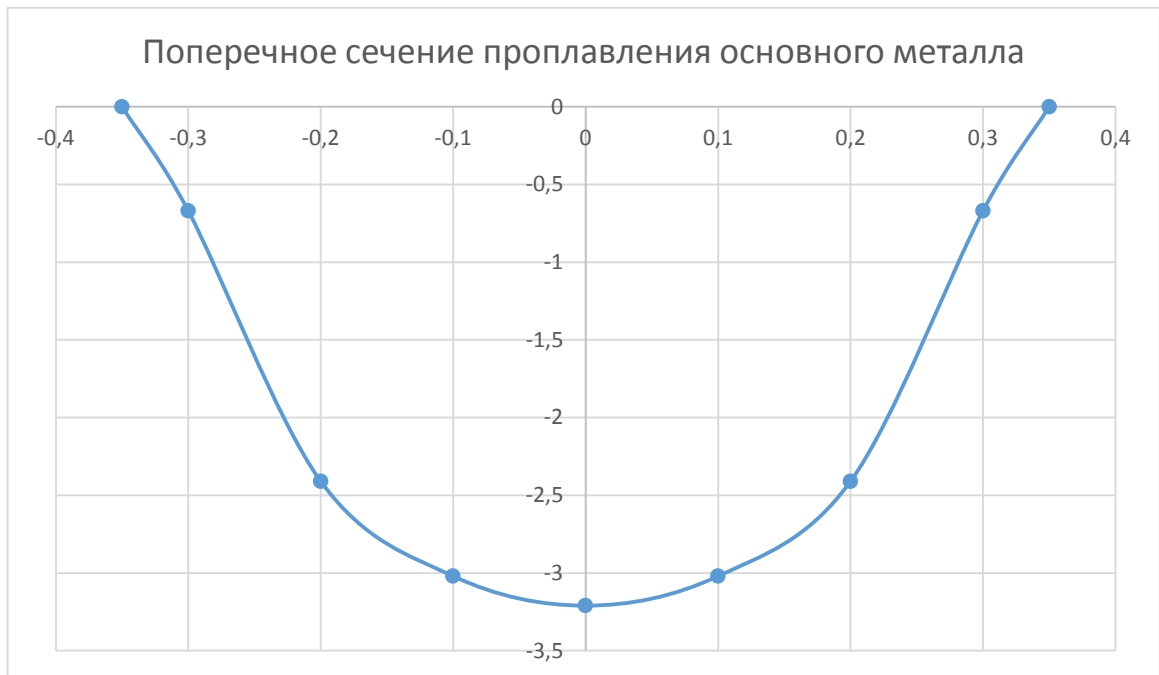


Рисунок 16 - Поперечное сечение проплавления основного металла

По графику изображенном на рисунке 16, можно определить ширину сварочной ванны (сварного шва) $B=0,7 \text{ см} = 7 \text{ мм}$.

Мы задали значения эффективной мощности и скорости сварки в области реальных режимов сварки и получили все основные размеры сварочной ванны, задаваясь усредненными коэффициентами. При определении коэффициентов математической формулы решается обратная задача – по размерам шва определяются коэффициенты. Это позволит устранить недостатки математической модели процесса и для конкретного режима сварки получить достаточно точное значение площади поперечного сечения проплавления основного металла.

2.4 Выводы по 2 главе

Методика определения площади проплавления основного металла с использованием теории распространения тепла при дуговой сварке плавящимся электродом, показывает оптимистичные результаты. На это указывают полученные, по известным значениям теплофизических коэффициентов и режима проведения сварки, размеры глубины проплавления и ширины сварочной ванны, по которым были построены наглядные изображения продольного и поперечного сечения сварочной ванны.

По полученным данным можно весьма просто найти площадь проплавления основного металла и сравнить её с экспериментальными данными. В случае совпадения этих данных появляется возможность упростить процесс расчёта площади проплавления основного металла, используя данную методику, что увеличит производительность вычислений.

Накопление информации при проведении экспериментов с участием разных способов сварки, придерживаясь данной методики, открывает, в дальнейшем возможность, определения площади поперечного сечения проплавления основного металла для проведения неразрушающего контроля химического состава сварных швов.

3 Методика проведения экспериментов

3.1 Оборудование, приборы и материалы для исследования

Для наплавки, в качестве сварочных материалов, были выбраны электроды ESAB ОК 76.18 (Швеция), которые согласно ГОСТ Р ИСО 3580-2009 классифицируются как: ECrMo1 В 42 Н5 [32],

где E – обозначает покрытый электрод для ручной дуговой сварки;

CrMo1 – показывает основу легирования химического состава металла шва;

В – обозначает покрытие электрода – основное;

4 – показывает, что электрод может быть использован на постоянном токе с эффективным переносом металла электрода 120%;

2 - показывает, что можно вести сварку во всех положениях, кроме вертикального положения сверху вниз;

Н – обозначает количество диффузионно-свободного водорода;

5 – наплавленный металл содержит до 5 мл. диффузионного водорода на 100 г. наплавленного металла.

Содержание элементов в наплавляемом металле по [32], отображено в таблице 9.

Таблица 9 – Химический состав наплавленного металла, по ГОСТ Р ИСО 3580-2009

Символ химического состава в соответствии с ГОСТ Р ИСО 3580-2009	Химический состав, % (по массе)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo

Продолжение таблицы 9

CrMo1	0,05- 0,12	0,80	0,40- 1,50	0,030	0,025	0,90- 1,40	0,40- 0,70
-------	---------------	------	---------------	-------	-------	---------------	---------------

Наличие одного значения для элемента указывает на его максимально допустимую величину в химическом составе наплавленного металла.

Механические свойства наплавленного металла, после термообработки при температуре 660-700 °С с выдержкой в один час, указаны в таблице 10.

Таблица 10 – Механические свойства наплавленного металла, по ГОСТ Р ИСО 3580-2009

Символ химического состава в соответствии с ГОСТ Р ИСО 3580-2009	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, Дж/см ²
CrMo1	520	610	24	150

Заявленный производителем химический состав наплавленного металла отображен в таблице 11.

Таблица 11 – Химический состав наплавляемого металла, заявленный производителем

Химический состав, заявленный производителем	Химический состав, % (по массе)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
OK 76.18	0,07	0,35	0,60	0,015	0,02	1,25	0,60

В данном случае производитель указывает приближенные средние значения элементов, которые входят в диапазон по [32]. Значения вредных примесей фосфора (P) и серы (S) являются максимально допустимой величиной для химического состава наплавленного металла.

Параметры сварки, заявленные производителем, указаны в таблице 12.

Таблица 12 – Параметры сварки, заявленные производителем

Диаметр электрода, мм	Сила тока, А	Напряжение, В	Время плавления электрода, с	Отношение массы наплавленного металла к массе электрода, кг	Количество израсходованных электродов на килограмм наплавленного металла, шт
2,5 x 300	70-110	24	52	0,58	88
3,2 x 350	95-150	25	65	0,59	49
4,0 x 450	130-190	27	90	0,64	23

Также поставщик представляет сертификат на химический состав наплавленного металла на партию электродов. Данные химического состава, согласно сертификату, указаны в таблице 13.

Таблица 13 – Химический состав наплавленного металла, указанный в сертификате на партию

Химический состав наплавленного металла, согласно сертификату	Химический состав, % (по массе)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
OK 76.18	0,06	0,41	0,71	0,012	0,007	1,40	0,62

Исходя из данных сертификата, отраженных в таблице 12, можно утверждать, что содержание Si, Mn, Cr и Mo в наплавленном металле, будет иметь значение немного больше, чем заявляет производитель в каталоге. Однако, по ГОСТ Р ИСО 3580-2009 «Материалы сварочные. Электроды покрытые для ручной дуговой сварки жаропрочных сталей. Классификация.» [32] химический состав наплавленного металла, указанный в сертификате, будет полностью соответствовать CrMo1. Данные и форма сертификата качества приведены в Приложении А.

Данные электроды предназначены для сварки хромо-молибденовых, теплоустойчивых сталей с высоким сопротивлением ползучести. Характеризуются стабильным горением дуги с минимальным разбрызгиванием, повышенной стойкостью к образованию трещин и пористости. Сварка должна выполняться преимущественно на обратной полярности. Перед сваркой необходимо прокалить электроды при температуре 350 °С в течении 2 часов.

Если классифицировать химический состав наплавленного металла по ГОСТ 9467-75 «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей. Типы», наиболее

подходящим будет Э-09Х1М [33], химический состав отображен в таблице 14.

Таблица 14 – Химический состав Э-09Х1М

Тип электрода	Химический состав, % (по массе)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Э-09Х1М	0,06- 0,12	0,15- 0,40	0,5- 0,9	0,035	0,025	0,80- 1,20	0,40-0,70

В качестве источника питания использовался Kemppi MinarcTig EVO200, внешний вид которого представлен на рисунке 17. Данный аппарат предназначен как для аргодуговой сварки неплавящимся электродом, так и для ручной дуговой сварки покрытым электродом на постоянном токе. Напряжение в сети 230В, напряжение холостого хода 95В. Диапазон регулировки сварочного тока и напряжения дуги, при ручной дуговой сварке, составляет от 10А/20,4В до 170А/26,8В.



Рисунок 17 – Внешний вид аппарата Kemppi MinarcTig EVO200

Технические характеристики Kemppi MinarcTig EVO200 представлены в таблице 15 [34].

Таблица 15 – Технические характеристики Kemppi MinarcTig EVO200

Напряжение в однофазной сети 50/60 Гц	230 В ± 15 %
Предохранитель (с задержкой срабатывания)	16 А
Минимальная выходная мощность генератора	5,6 кВА
Выходной ток (TIG) ПВ 35 %	200 А/18,0 В (35 %)
Выходной ток (TIG) ПВ 60 %	160 А/16,4 В (60 %)
Выходной ток (TIG) ПВ 100 %	140 А/15,6 В (100 %)
Выходной ток (ММА) ПВ 35 %	170 А/26,8 В (35 %)
Выходной ток (ММА) ПВ 60 %	130 А/25,2 В (60 %)
Выходной ток (ММА) ПВ 100 %	110 А/24,4 В (100 %)
Напряжение холостого хода	95 В
Размеры штучных электродов	1,5 – 4,0 мм
Диапазон сварочного тока и напряжения (сварка ММА)	10 А/20,4 В – 170 А/26,8 В
Диапазон сварочного тока и напряжения (сварка TIG)	5 А/10,2 В – 200 А/18,0 В
Диапазон рабочих температур	-20...+40 °С
Габаритные размеры, ДхШхВ	449 × 210 × 358 мм
Масса (без дополнительного оборудования)	11 кг

Для взвешивания пластин до и после наплавки использовались лабораторные весы марки SARTORIUS LP1200S. Данные весы имеют класс точности I (специальные), позволяют определять массу тел от 0,1 г. до 1200 г,

цена деления составляет 0,001 г. Процесс взвешивания пластин до сварки отражен на рисунке 18.

Технические характеристики SARTORIUS LP1200S [35] представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Технические характеристики SARTORIUS LP1200S

Наибольший предел взвешивания (НПВ), г	1200
Наименьший предел взвешивания (НмПВ), г	0,1
Дискретность отсчета (d), мг	1
Цена поверочного деления (e), мг	10
Класс точности по ГОСТ 24104-01	I специальный
Калибровка	встроенная
Размер чашки весов, мм	Ø130



Рисунок 18 – Лабораторные весы SARTORIUS LP1200S

Для измерения геометрических параметров наплавленного валика использовались измерительные инструменты: линейка и штангенциркуль. Также при измерении использовалась программа Universal Desktop Ruler с заданием масштаба на фотографии и дальнейшем измерении геометрических параметров сварного шва [36].

Для проведения многослойной наплавки была подготовлена пластина из стали Ст3сп, размером 120x80 мм и толщиной 14 мм, по требованиям ГОСТ 9466-75 «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки сталей и наплавки. Классификация и общие технические условия» [15]. Пластина изображена на рисунке 19.

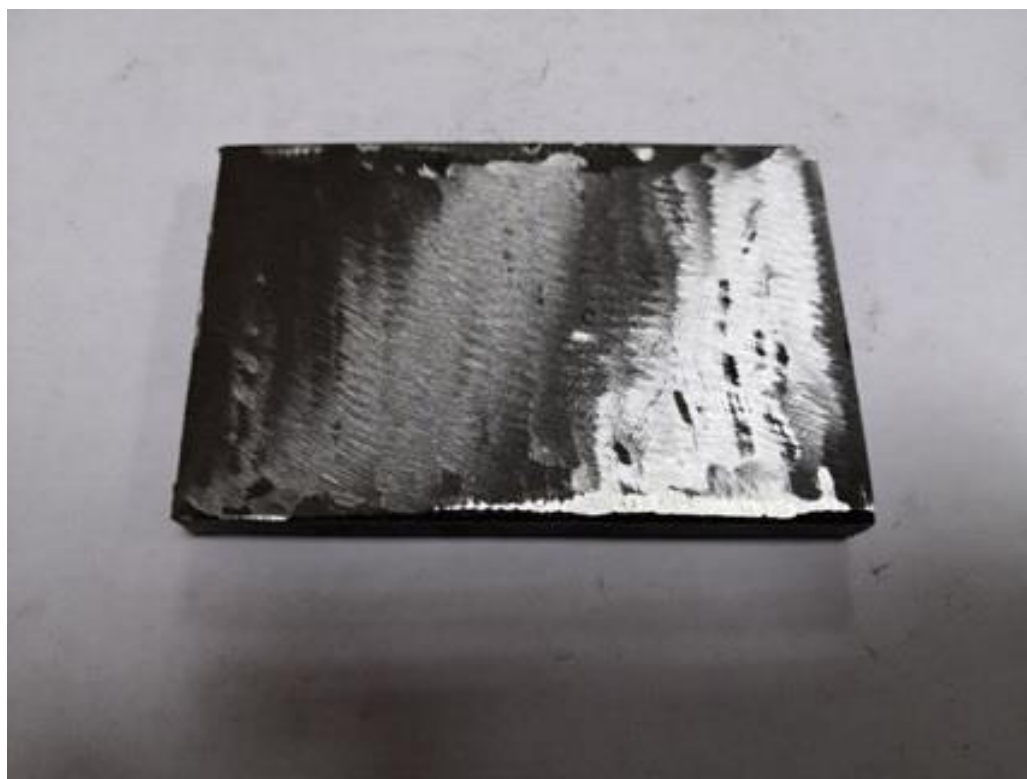


Рисунок 19 – Пластина для многослойной наплавки

По ГОСТ 380-2005 «Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки» [16] Ст3сп классифицируется, как углеродистая сталь обыкновенного качества, где Ст – обозначает сталь, 3 – указывает на

химический состав стали, сп – классифицирует сталь по степени раскисления, как спокойную.

Химический состав стали, регламентируемый по [16], отображен в таблице 17.

Таблица 17 – Химический состав СтЗсп по ГОСТ 380-2005 «Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки»

Марка стали	Массовая доля химических элементов				
	С	Mn	Si	S	P
СтЗсп	0,14 – 0,22	0,40 – 0,65	0,15 – 0,30	0,05	0,04

Допустимая массовая доля хрома, никеля и меди в стали СтЗсп должна быть не более 0,30% каждого.

Также были подготовлены две пластины из стали марки СтЗсп без разделки кромок для проведения сварки с неполным проваром. Пластины имели размеры 100x75 мм с разницей в 2 мм по длине и ширине. Толщина пластин составляет 6 мм. Пластины зачищались от возможных загрязнений и ржавчины по кромкам и на 15-20 мм по обе стороны от стыка.

Для фиксации и обеспечения равномерного зазора по всей длине пластин использовались струбцины.

Анализ химического состава проводился при помощи рентгенофлуоресцентного анализатора X-MET 8000 от компании Oxford Instruments Industrial Analysis, который изображен на рисунке 20. Анализатор предназначен для измерения массовой доли химических элементов в металлах и сплавах.

Технические и метрологические характеристики прибора [37] указаны в таблицах 18 и 19.



Рисунок 20 – Рентгенофлуоресцентный анализатор X-MET 8000

Таблица 18 – Технические характеристики X-MET 8000

Метод измерения	Рентгенофлуоресцентный анализ
Способ регистрации	параллельный
Измеряемые элементы	Mg, Al, Si, P, S, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Y, Zr, Nb, Mo, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Hf, Ta, W, Pt, Ir, Au, Pb, Bi.
Количество одновременно определяемых элементов	35
Тип детектора	SDD (кремниевый дрейфовый детектор)
Габаритные размеры, ВхШхД, мм	272x93x210

Продолжение таблицы 18

Масса, кг	1,3
Напряжение питания	5
Время непрерывной автономной работы от аккумулятора, ч	До 12
Размер экрана, мм	57x98
Разрешение экрана	480x800
Мощность эквивалентной дозы в любой доступной точке на расстоянии 0,1 метра от поверхности анализатора, мкЗв/ч не более	1,0
Время измерения выбирается оператором	От 2с до 999с
Диапазон температуры окружающей среды,	От -10 до +50
Диапазон относительной влажности,%	От 20 до 95

Таблица 19 – Метрологические характеристики

Диапазон измерений массовой доли, %, при времени измерения 15 с	Пределы допускаемой относительной погрешности измерений, %
От 0,10 до 0,50	±50,0
Св. 0,50 до 1,00	±30,0
Св. 1,00 до 99,9	±10,0

Анализатор представляет собой рентгенофлуоресцентный спектрометр, принцип действия которого основан на измерении спектра вторичного рентгеновского излучения.

«Первичное рентгеновское излучение, создаваемое рентгеновской трубкой, взаимодействует с элементами анализируемой пробы и вызывает вторичное рентгеновское излучение, спектр которого зависит от элементного состава пробы. Расчет массовой доли анализируемого элемента основан на зависимости интенсивности характеристического рентгеновского излучения от содержания элемента в пробе» [37].

«Основными элементами конструкции анализатора являются: источник рентгеновского излучения, детектор, управляющая электроника и блок питания -скомпонованные в пыле- и влагозащищенном корпусе из ударопрочного пластика» [37].

«В качестве источника рентгеновского излучения используется маломощная рентгеновская трубка» [37].

«Для регистрации рентгеновского излучения служит полупроводниковый высокочувствительный детектор высокого разрешения SDD - кремниевый дрейфовый детектор. Для охлаждения чувствительного элемента детектора применяется устройство Пельтье» [37].

Для разрушения сварного шва, с целью измерения глубины проплавления, использовалась универсальная электромеханическая испытательная машина WDW-300E, предназначенная для испытаний образцов металлов, сплавов и изделий из них, на растяжение, сжатие и изгиб в соответствии с международным стандартом ISO 6892-1998. Испытательная часть машины связана с компьютером и оснащена специализированным программным обеспечением. Наглядно испытательная машина представлена на рисунке 21.



Рисунок 21 - Универсальная электромеханическая испытательная машина WDW-300E

Технические характеристики испытательной машины [38], отражены в таблице 20.

Таблица 20 – Технические характеристики универсальной электромеханической испытательной машины WDW-300E.

Максимальная нагрузка, кН	300 кН
Жесткость силовой рамы, кН/мм	600 кН/мм
Относительная погрешность измерения нагрузки, %	±1%
Диапазон измерения нагрузки, %	0,4 – 100%
Диапазон измерения деформации, %	2 – 100%
Относительная погрешность измерения деформации, %	1%
Разрешение перемещения, мм	0,001 мм
Относительная погрешность измерения перемещения, %	±1%
Диапазон скоростей нагружения, мм/мин	0,005...500 мм/мин, плавная настройка

Продолжение таблицы 20

Пределы допускаемой погрешности поддержания скорости нагружения, %	±1%
Максимальное перемещение при растяжении, мм	600 мм
Максимальное перемещение при сжатии, мм	600 мм
Ширина рабочего пространства для испытаний, мм	575 мм
Захваты	Клиновидные для плоских и круглых образцов и др.
Габаритные размеры, мм	1110x785x2525 мм
Масса, кг	2000 кг
Мощность, кВт	5 кВт
Электропитание	380±10В, 50Гц, 3 фазы

3.2 Условия проведения эксперимента и методика его проведения

Для определения массы наплавленного металла, пластины были взвешены перед сваркой. Суммарная масса двух собираемых встык пластин составила 656,40 г.

Перед сваркой прокаливали электроды при температуре 350 °С в течении 2 часов.

Согласно методике, описанной в [10, с 13], необходимо проводить сварку пластин, вдоль оси стыка, без поперечных колебаний. В данной работе с целью определения влияния поперечных колебаний на химический состав шва выполнялся аналогичный опыт и с поперечными колебаниями. Для осуществления зазора по всей длине стыка, пластина фиксировалась струбцинами. Равномерный зазор равный 1 мм был обеспечен по всей длине стыка. Сборка стыка показана на рисунке 22.

Сварка велась на усредненных режимах, рекомендованных в паспортных данных электродов.

При ручной сварке серьезной проблемой, препятствующей успеху данной методики, является неравномерность скорости сварки. В патенте РФ

№ 2582170 «Способ определения скорости расплавления покрытого электрода» В.П. Сидорова [3] предложен способ повышения точности поддержания скорости сварки, согласно которому для данного электрода вместо скорости сварки должна задаваться длина выполняемого шва. Сварщику проще контролировать именно длину шва. Это стало возможным благодаря установленной зависимости, что время расплавления электрода от тока сварки подчиняется гиперболическому закону [39; 40]. Два коэффициента зависимости легко можно установить при минимальном и максимальном токах сварки, рекомендованных для электродов, фиксируя время расплавления покрытой части электродов.

В опытах сварку производил сварщик 5-го разряда, аттестованный в системе НАКС на ручную дуговую сварку покрытым электродом сталей группы M01(W01) «Углеродистые и низколегированные конструкционные стали перлитного класса с пределом текучести до 360 МПа», M02(W02) «Низколегированные теплоустойчивые хромомолибденовые и хромомолибденованадиевые стали перлитного класса» и M11(W11) «Высоколегированные стали аустенитно-ферритного и аустенитных классов» [41]. Режим сварки отражен в таблице 21.

Таблица 21 – Режим проведения сварки пластин

Способ сварки	Марка электродов	Диаметр электродов, мм	I_c , А	U_d , В	Род тока и полярность
РД	ОК 76.18	3,2	120	24,8	=(+)



Рисунок 22 – Фиксация пластин для проведения сварки

После завершения сварки, пластины зачистили от брызг и взвесили. Масса наплавленного металла при сварке с поперечными колебаниями составила 12,05 г.

Также в ходе сварки с колебаниями было измерено ее время, которое составило 41,97 секунды. За это время получили валик длиной 100 мм. Исходя из этих данных, была определена средняя скорость сварки (v_c), которая составила 0,24 см/с.

При сварке без колебаний, время сварки составило 29,6 секунд. Длина валика составила 96 мм. Отсюда, средняя скорость была равной 0,32 см/с.

Также были проведены измерения геометрических параметров электродов, которые были занесены в таблицу 22. Это может оказаться необходимым при выполнении расчетов по скорости расплавления электродов.

Таблица 22 - Геометрические параметры электродов ESAB ОК 76.18

Порядковый номер измерения	1	2	3	4	5	Среднее значение
Масса электрода, г	34,837	34,813	34,847	34,840	34,959	34,859
Длина электрода, мм	348	350	349,5	351	351	349,9
Ø стержня, мм	3,2					
Ø электрода (включая обмазку), мм	5,55	5,55	5,60	5,5	5,55	5,55

Из таблицы 22 видно, что параметры электродов весьма стабильны, что свидетельствует об их высоком качестве.

Согласно [10], необходимо провести несколько измерений ширины полученного шва и глубины его проплавления по длине шва, а после этого найти их средние значения, чтобы получить достоверный результат. В нашем случае замеры выполняли в 5 точках шва с одинаковым интервалом.

При измерении ширины была использована программа Universal Desktop Ruler [36] с заданием масштаба на фотографии. Данная программа увеличивает точность измерений, так как границы шва могут быть выражены не четко и при измерении простыми инструментами, может возникнуть погрешность, вызванная индивидуальностью зрительного восприятия измеряющего. Процесс измерения ширины валика отображен на рисунке 23.



Рисунок 23 – Однослойная сварка с поперечными колебаниями, при измерении ширины валика

Для определения глубины проплавления, образцы, изготовленные из пластины, разорвали на машине. Для этого, перед разрывом, из пластин, сваренных между собой, подготовили 4 одинаковых образца. Для наглядности шов протравили в азотной кислоте, чтобы глубина проплавления выделялась четче. Разорванные образцы изображены на рисунке 24.



Рисунок 24 – Образцы после разрыва

Также ширину шва и глубину проплавления можно измерить по поперечному сечению шва, не разрушая его на разрывной машине. Для этого шов, протравленный в азотной кислоте, необходимо сфотографировать с максимально возможным разрешением. На фотографии должна присутствовать не меньше одной измерительной линейки для задания масштаба измерения в программе Universal Desktop Ruler. Размещение двух измерительных линеек позволяет откалибровать масштаб измерения. Сначала задается масштаб по одной из измерительных линеек. Масштаб измерения составил 1 мм. Потом для уменьшения погрешности, масштаб

проверяется по другой измерительной линейке. Если масштаб совпадает можно приступать к измерению геометрических параметров шва. В противном случае, перед измерением необходимо вычислить погрешность измерения. Данный метод измерения изображен на рисунке 25.

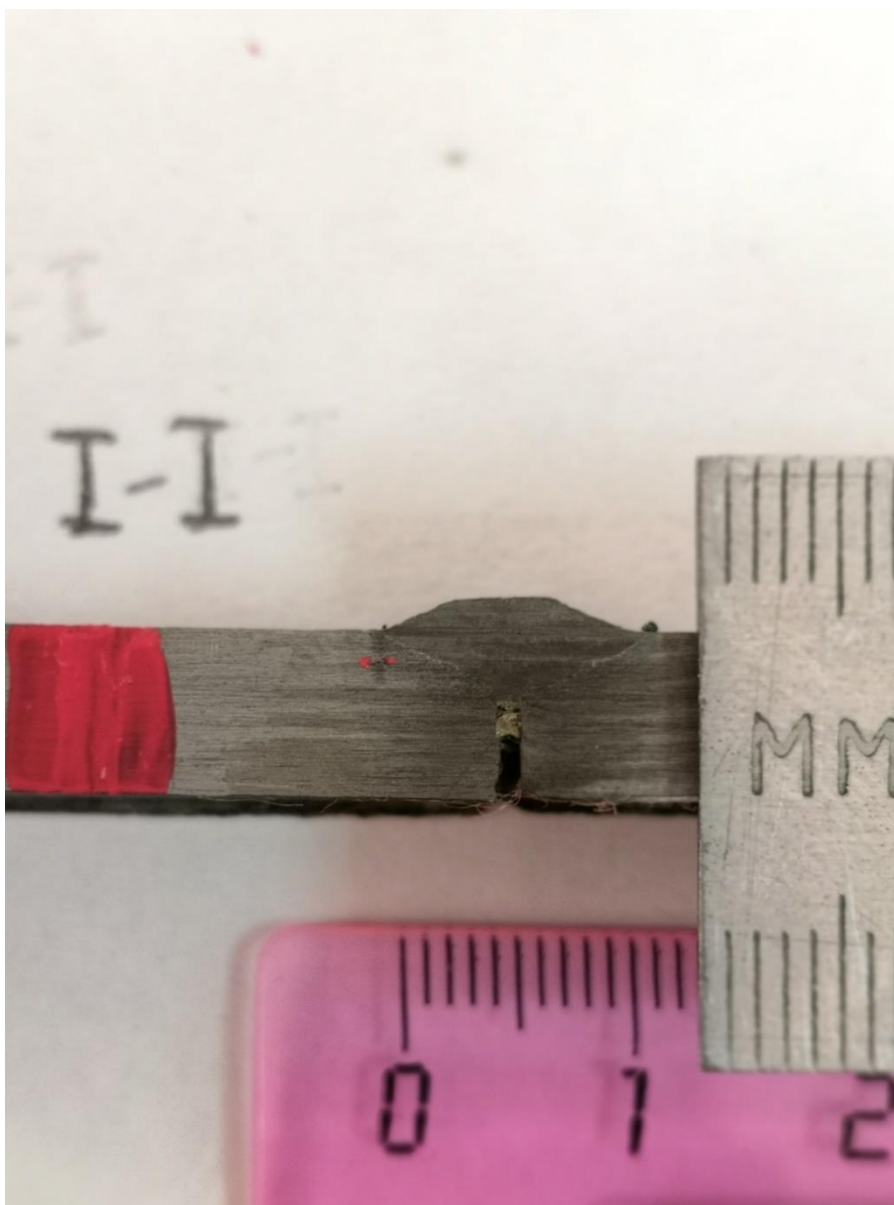


Рисунок 25 – Измерение геометрических параметров шва по поперечному сечению шва

Для измерения геометрических параметров шва, данный способ оказался наиболее удобным и точным.

Также для определения химического состава наплавляемого металла была осуществлена пятислойная наплавка. Площадь наплавки согласно ГОСТ 9466-75 «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки сталей и наплавки. Классификация и общие технические условия», составляет 80x40 мм [15]. Высота пятислойной наплавки составила 11-12 мм.

Наплавка велась на тех же режимах, что и сварка пластин с зазором.

Перед определением химического состава наплавленного металла спектральным методом, поверхность наплавки была зачищена до металлического блеска, что изображено на рисунке 26.



Рисунок 26 – Пятислойная наплавка после зачистки

Распределение химических элементов в наплавленном металле при ручной дуговой сварке по понятным причинам, описанным в первой главе может быть не вполне равномерно. Поэтому анализ химического состава наплавленного металла, в обоих случаях, проводился в 3-х зонах, и в

дальнейшем определялось среднее измерений. Данная схема отбора проб изображена на рисунке 27.

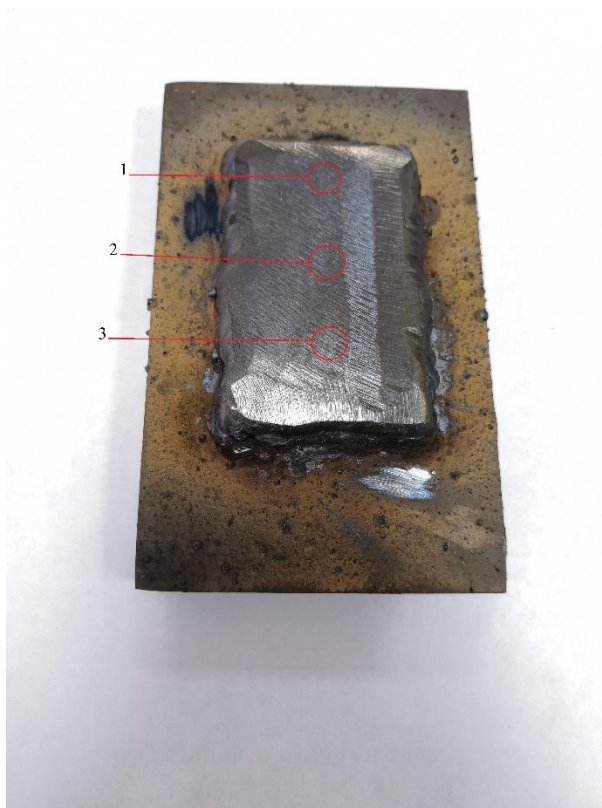


Рисунок 27 – Области проведения анализа на примере многослойной наплавки

По полученным результатам для сварочных образцов вычисляли площадь поперечного сечения проплавления основного металла и долю участия основного металла в металле сварного шва.

4 Описание результатов экспериментов

4.1 Результаты измерений геометрических параметров шва

Результаты измерения геометрических параметров шва при сварке без колебаний для удобства занесены в таблицы 23, 24 и 25.

Также было рассчитано среднее отклонение размеров от среднего значения по абсолютной величине (CAO) [42]. CAO позволяет оценить стабильность размера шва по его длине. CAO аналогичен дисперсии, но вычисляется гораздо проще и нагляднее. Для его вычисления рассчитываются относительные отклонения от среднего значения замеров, а затем складываются их абсолютные величины. Полученная сумма делится на число замеров.

Таблица 23 - Результаты измерения ширины наплавленного валика без колебаний поперечных колебаний

Участок замера	1	2	3	4	5
Ширина валика, мм	8,95	9,25	9,4	8,5	9,15
Средняя ширина валика, мм	9,05				
CAO, %	2,87				

Можно отметить, что замеры ширины достаточно стабильны, значение CAO меньше 3%.

Таблица 24 – Результаты измерения глубины проплавления шва без поперечных колебаний

Участок замера	1	2	3	4	5
Глубина проплавления, мм	2,4	2,3	2,25	2,5	2,45
Среднее значение глубины проплавления, мм	2,38				

Продолжение таблицы 24

CAO, %	3,52
--------	------

Значения CAO для глубины провара несколько выше, что можно объяснить тем, что сварщик не может контролировать провар в той же мере, что ширину шва.

Таблица 25 – Результаты измерения высоты выпуклости валика

Участок замера	1	2	3	4	5
Высота валика, мм	1,55	1,5	1,55	1,5	1,45
Среднее значение высоты валика, мм	1,51				
CAO, %	2,12				

CAO для выпуклости валика имеет минимальное значение из трех размеров шва, что связано с тем, что выпуклость сварщику контролировать легче остальных размеров. В целом CAO всех трех размеров достаточно невелики. Это свидетельствует о том, что и при ручной сварке без поперечных колебаний может быть обеспечена высокая стабильность размеров шва.

Также были измерены геометрические параметры валика при сварке с поперечными колебаниями, которые занесены в таблицы 26 и 27.

Таблица 26 – Результаты измерения ширины шва, с поперечными колебаниями

Участок замера	1	2	3	4	5
Ширина валика, мм	11,75	11,05	12,08	13,33	13,33
Среднее значение ширины валика, мм	12,30				
CAO, %	6,63				

При сварке с колебаниями ширина шва увеличилась на 3 мм, при этом САО возросло более чем в 2 раза по сравнению со сваркой без колебаний. Это объяснимо, так как ранее движение в поперечном направлении отсутствовало, а контролировать еще одно движение сварщику сложнее.

Таблица 27 - Результаты измерения глубины проплавления, с поперечными колебаниями

Участок замера	1	2	3	4	5
Глубина проплавления, мм	2,2	2,1	3	2,7	2,1
Среднее значение глубины проплавления, мм	2,42				
САО, %	14,21				

САО для провара более чем в 2 раза больше, чем для ширины валика, что объясняется повышением погрешности от отклонения электрода от оси шва. Большие значения САО для сварки с колебаниями позволяют утверждать, что этот способ сварки менее пригоден для определения площади проплавления основного металла.

Глубина проплавления швов с колебаниями и без колебаний отличаются незначительно. Сравнение САО швов с колебаниями и без колебаний показывает, что провар без колебаний поддерживается намного стабильнее. Для определения ширины проплавления основного металла следует из ширины шва вычесть зазор, то есть 1 мм.

4.2 Расчёт площади проплавления основного металла

Для определения площади проплавления основного металла по размерам шва используются и приближенные формулы [19]. Поэтому представляет интерес сравнение двух подходов к расчету – приближенного и с помощью формулы распространения тепла при сварке.

Рассчитаем долю участия основного металла в металле шва при сварке без поперечных колебаний. Сначала найдем поперечное сечение проплавления основного металла, как площадь параболы.

Площадь параболы будет определяться по формуле:

$$S = \frac{2}{3} \cdot (a \cdot b), \#(43)$$

где a – ширина параболы (ширина шва), мм;

b – высота параболы (глубина проплавления), мм.

По полученным данным, которые отображены в таблицах 22, 23 и 24. Принимаем $a = 9,05$ мм, учитывая зазор равный 1 мм, $a = 8,05$ мм, $b = 2,38$

$$F_o = 2 \cdot (8,05 \cdot 2,38)/3 = 12,77 \text{ мм}^2.$$

Зная высоту выпуклости валика, аналогично найдем площадь поперечного сечения наплавленного металла

$$F_n = 2 \cdot (9,05 \cdot 1,51)/3 = 9,11 \text{ мм}^2.$$

Также необходимо учесть площадь наплавленного металла в зазоре между пластинами.

$$F_n = 9,11 + (1 \cdot 2,38) \approx 11,5 \text{ мм}^2.$$

Отсюда

$$F_{ш} = 12,77 + 11,5 = 24,27 \text{ мм}^2.$$

Зная площади сечений шва и основного металла, находим долю участия основного металла в металле шва по формуле (8)

$$\psi_o = 12,77/24,27 \approx 0,53.$$

Для расчётов химического состава шва без поперечных колебаний можно принять $\psi_o = 0,53$.

По данным таблиц 25 и 26 аналогично рассчитаем долю участия основного металла в металле шва при сварке с поперечными колебаниями. Учитывая зазор между пластинами, принимаем $a = 11,3$ мм и $b = 2,42$ мм.

$$F_{ок} = 2 \cdot (11,3 \cdot 2,42)/3 = 18,23 \text{ мм}^2.$$

Зная массу наплавленного металла из его взвешивания, которая равна 12,05 г, найдем S_n по формуле (20).

$$F_{нк} = 12,05 / 7,85 \cdot 10 = 0,1535 \text{ см}^2 = 15,35 \text{ мм}^2.$$

Также необходимо учесть площадь наплавленного металла в зазоре между пластинами.

$$F_{нк} = 15,35 + (1 \cdot 2,42) \approx 17,8 \text{ мм}^2.$$

Отсюда

$$F_{шк} = 17,8 + 18,23 = 36,03 \text{ мм}^2,$$

$$\Psi_{ок} = 18,23/36,03 \approx 0,51.$$

При сварке с поперечными колебаниями возросла площадь поперечного сечения основного металла и площадь поперечного сечения наплавленного металла. Это объясняется тем, что использование колебаний в значительной степени эквивалентно уменьшению скорости сварки. Скорость сварки с колебаниями уменьшилась на 33,3% с 0,32 см/с до 0,24 см/с.

Значения доли участия основного металла в швах с колебаниями и без колебаний оказались весьма близкими. Отличие от среднего значения всего

около 2% и может быть связано с погрешностью измерений размеров шва. Стоит отметить, что влияние ψ_0 на содержание элементов в шве не столь велико, поэтому погрешность в определении ψ_0 должна оказывать незначительное влияние на конечный результат. Принимаем, что расчет для каждого варианта сварки будем вести для своих коэффициентов ψ_0 , а не по среднему значению.

Полученный результат по ψ_0 подтверждает представление о низкой гибкости однодуговой сварки в отношении ее регулирования и соответственно регулирования химического состава шва. Снижение скорости сварки привело к увеличению как площади сечения проплавления основного металла, так и сечения наплавленного, а ψ_0 изменилось в пределах погрешностей измерений и расчетов.

Как видно из проведенных опытов и расчетов, измерение размеров шва может дать достаточно точные значения площадей. Однако получение провара за счет разрыва нескольких образцов имеет высокую трудоемкость, как и изготовление макрошлифов. Поэтому нужно искать для определения площади провара возможности определения аналитическим путем.

На данном этапе применение аналитического подхода возможно только для сварки без поперечных колебаний, так как методика расчета размеров сварного шва при поперечных колебаниях источника тепла намного сложнее. И в то же время измерения размеров такого шва показали его меньшие перспективы с точки зрения точности измерений.

Воспользуемся методом определения площади поперечного сечения проплавления основного металла с использованием теории распространения тепла. Для расчета применяем схему нормально-кругового источника тепла на поверхности плоского слоя, как более точную - программа HNKI [30]. Принимаем температуру плавления стали СтЗпс 1500 °С, начальную температуру деталей 20 °С, объемную теплоемкость $c_p = 5 \text{ Дж}/(\text{см}^3\text{°С})$, коэффициент температуропроводности $a = 0,08 \text{ см}^2/\text{с}$ [29]. Осевой тепловой поток сварочной дуги принимаем $q_0 = 4200 \text{ Вт}/\text{см}^2$.

Средняя скорость сварки без поперечных колебаний $v_c=0,32$ см/с.
 Принимаем $y = 0$ и по максимальному провару $H_0 = 2,38$ мм отыскиваем эффективную мощность приведенного источника тепла $q_H= 2150$ Вт.

Для данной мощности строим поперечное сечение провара (зависимость максимальной глубины проплавления от координаты y). Данные занесены в таблицу 28.

Таблица 28 – Поперечное сечение проплавления основного металла

У, см	0	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
H_0 ,мм	2,41	2,41	2,32	2,17	1,99	1,75	1,42	1,05	0,05	0

Ширина шва равна 9 мм, так как $H_0=0$ при $y=0,45$ см.

По данным таблицы 28 построим наглядное изображение поперечного сечения основного металла. Поскольку данные в таблице 27 отражают, только половину поперечного сечения, для второй половины сечения возьмем те же значения со знаком минус. Изображение будет располагаться в плоскости YOZ . Так как значения H_0 характеризуют глубину проплавления, значения необходимо брать со знаком минус. Поперечное сечение основного металла, построенное по данным из таблицы 9, наглядно отображено на рисунке 28.



Рисунок 28 – Поперечное сечение основного металла

Для расчета площади поперечного сечения рассчитали среднюю глубину проплавления $H_C = 1,605$ мм. Также учитывали зазор между пластинами и принимали $B_0 = 8$ мм. Тогда площадь проплавления основного металла рассчитывается по формуле:

$$F_0 = H_C \cdot B_0 = 1,605 \cdot 8 = 12,84 \text{ мм}^2, \#(44)$$

где H_C – средняя глубина проплавления, мм;

B_0 – ширина сварочной ванны, с учетом зазора, мм.

После этого определяли приведенную мощность сварочного источника по ширине шва 8,05 мм. Получили приведенную эффективную мощность $q_B = 1950$ Вт.

Рассчитывали среднюю приведенную эффективную мощность по формуле:

$$Q = (q_H + q_B) / 2 = (2150 + 1950) / 2 = 2050 \text{ Вт.} \#(45)$$

Уточненную площадь поперечного сечения основного металла можно учесть с помощью поправочного коэффициента отношения мощностей $2150/2050 = 1,05$

$$F_0 = 12,84 / 1,05 = 12,2 \text{ мм}^2.$$

Площадь, рассчитанная по приближенной формуле, составляла $12,77 \text{ мм}^2$. Разница между двумя этими величинами составляет всего $4,5\%$. Это означает, что при наличии надежной методики измерения размеров шва можно и без аналитической модели с необходимой точностью определять площади. Этому способствует малая степень влияния составляющих площадей поперечного сечения шва на ψ_0 . Например, измеряя не вполне точно ширину шва, мы одновременно увеличиваем сечение наплавленного металла и основного металла, а их соотношение изменяется незначительно.

4.3 Расчет химического состава металла шва и сравнение с данными спектрального анализа

Химический состав пластин для сварки определялся с помощью химического анализа. Полученные результаты занесены в таблицу 29.

Таблица 29 – Результат химического анализа основного металла из стали СтЗсп

Элемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Cu
Содержание, %	0,20	0,20	0,47	0,022	0,02	0,05	0,01	-	-	0,07

Сравнение содержания элементов в пластинах с требованиями по ГОСТ 380-2005 «Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки» [22] приведенными в таблице 17 показывают, что химический состав пластины входит в диапазон допустимых значений. Анализ химического состава

наплавленного металла проводился при помощи рентгенофлуоресцентного анализатора X-MET 8000. Полученные результаты занесены в таблицу 30. В ней же приведены для сравнения данные сертификата на состав наплавленного металла.

Для пятислойной наплавки по каждому элементу рассчитывали среднее отклонение от среднего значения по абсолютной величине (САО) [42].

Таблица 30 – Химический состав наплавленного металла пятислойной наплавки.

Область отбора проб	Химический состав, %							
	Cr	Si	Mn	Mo	Ni	Cu	S	P
1 точка	1,25	0,54	0,73	0,59	0,03	0,05	0,01	0,02
2 точка	1,19	0,51	0,74	0,56	0,05	0,06	-	0,01
3 точка	1,16	0,57	0,71	0,57	0,04	0,05	-	0,01
Среднее значение	1,20	0,54	0,72	0,57	0,04	0,053	-	0,013
САО, %	2,76	3,7	1,85	1,75	16,66	6,66	-	33,33
Данные сертификата	1,40	0,41	0,71	0,62	-	-	0,007	0,012
Δ5/Данные сертификата, %	-14,3	+31,7	+1,4	-8,0	-	-	-	-
Значения согласно ГОСТ Р ИСО 3580-2009	0,9-1,4	≤0,8	0,4-1,5	0,4-0,7	-	-	-	-

Значения САО для первых четырех элементов таблицы примерно на одном уровне. Среднее значение САО для них 2,52 %, что следует признать хорошим результатом. Для трех других элементов САО намного больше. Это связано, по-видимому, с тем, что данные элементы фактически являются примесями. Полученные значения САО подтверждают, что при спектральном анализе в случае ручной дуговой сварки содержания элементов измерения необходимо производить в нескольких точках шва.

Сравнение данных пятислойной наплавки с данными из сертификата показывают определенную разницу. Видимо, в партии сварочных материалов может быть определенный разброс в содержании элементов наплавленном металле. Особенно сильно содержание в наплавке отличается в содержании по кремнию – почти на 32%.

В то же время данные по пятислойной наплавке вполне укладываются в требования стандарта ГОСТ Р ИСО 3580-2009. Этот стандарт допускает возможность изменения содержания элементов в весьма широких пределах.

Аналогично был проведен спектральный анализ химического состава сварного шва при сварке без колебаний и с колебаниями пластин с зазором. Результаты спектрального анализа отображены в таблицах 31 и 32.

Таблица 31 – Химический состав шва, полученного при сварке пластин без колебаний

Область отбора проб	Химический состав, %							
	Cr	Si	Mn	Mo	Ni	Cu	S	P
1 точка	0,65	0,33	0,60	0,26	0,06	0,06	0,04	0,03
2 точка	0,61	0,27	0,55	0,32	0,04	0,05	0,02	0,03
3 точка	0,39	0,46	0,60	0,21	0,06	0,07	0,04	0,04
Среднее значение	0,55	0,395	0,58	0,26	0,05	0,06	0,03	0,03
САО, %	19	19,3	3,6	14	20	10,66	33,33	11,1

Значения САО для шва без поперечных колебаний получили достаточно высокие. Среднее значение по четырем элементам 14%. Для хрома это связано со значительно более низким отклонением замера в третьей точке по сравнению с двумя другими. Для кремния также содержание в третьей точке значительно отличается. Наиболее стабильные результаты имеют место для марганца.

Таблица 32 – Химический состав шва, полученного при сварке с поперечными колебаниями

Область отбора проб	Химический состав, %							
	Cr	Si	Mn	Mo	Ni	Cu	S	P
1 точка	0,58	0,49	0,54	0,29	0,03	0,07	0,06	0,01
2 точка	0,67	0,47	0,65	0,29	0,04	0,05	0,05	-
3 точка	0,69	0,47	0,58	0,30	0,03	0,07	0,05	0,02
Среднее значение	0,64	0,47	0,59	0,29	0,03	0,06	0,05	0,01
САО, %	7,29	1,41	6,77	1,14	11,11	16,66	6,66	50

Сравнение САО при спектральном анализе химического состава сварных швов, полученных при сварке с поперечными колебаниями и без колебаний, наглядно отражено на рисунке 29.

Значения САО при сварке с поперечными колебаниями намного меньше, чем при сварке без колебаний. Среднее значение САО 4,15% более чем в три раза ниже. Это не может быть случайностью. Скорее всего, это связано с лучшим перемешиванием металла сварочной ванны при сварке с поперечными колебаниями.

Сравнительные данные САО химического состава в пятислойной наплавке и в шве при сварке пластин без колебаний и с колебаниями, наглядно изображены на рисунке 30.

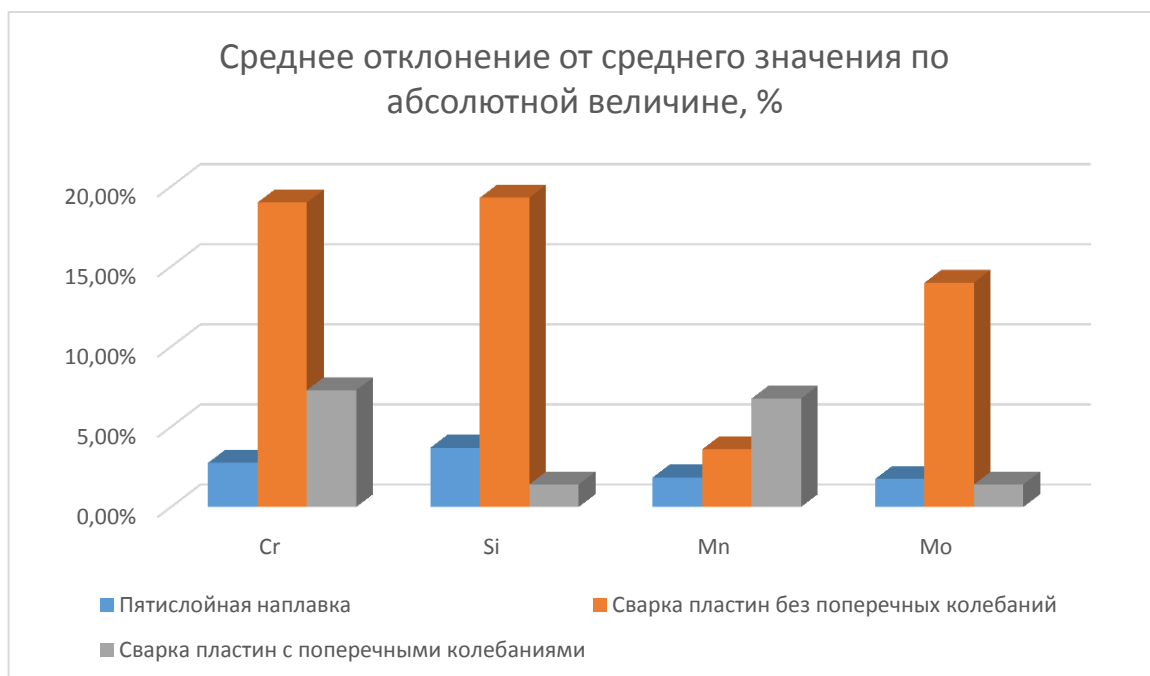


Рисунок 30 – Значение САО основных легирующих элементов в пятислойной наплавке и в швах

Эти данные свидетельствуют, что неоднородность химического состава шва при сварке без поперечных колебаний по сравнению с пятислойной наплавкой и сваркой с поперечными колебаниями в несколько раз больше, что может приводить к структурной неоднородности швов и неоднородности механических характеристик. Поэтому следует искать меры, направленные на повышение однородности состава сварных швов.

В тоже время это показывает, что использование поперечных колебаний существенно повышает однородность химического состава шва. Это связано с более высокой стабильностью средней скорости сварки и лучшим перемешиванием жидкого металла в сварочной ванне при использовании колебаний.

Зная долю участия основного металла в шве, которая получена по расчётным данным, а также химический состав основного металла и химический состав металла шва, определим химический состав дополнительного металла, используя средние значения замеров, по известной формуле [10]:

$$C_d = (C_{ш}/C_o\psi_o)/(1 - \psi_o) \cdot \#(46)$$

Вычислим содержание основных легирующих элементов в шве при сварке без поперечных колебаний

$$Cr = [0,55 - (0,05 \cdot 0,53)] / (1 - 0,53) = 1,11\%;$$

$$Si = [0,35 - (0,2 \cdot 0,53)] / (1 - 0,53) = 0,52\%;$$

$$Mn = [0,58 - (0,47 \cdot 0,53)] / (1 - 0,53) = 0,7\%;$$

$$Mo = 0,26 / (1 - 0,53) = 0,55\%.$$

Аналогично рассчитаем легирующие элементы в шве при сварке с поперечными колебаниями:

$$Cr = [0,64 - (0,05 \cdot 0,51)] / (1 - 0,51) = 1,25\%;$$

$$Si = [0,395 - (0,2 \cdot 0,51)] / (1 - 0,51) = 0,6\%;$$

$$Mn = [0,59 - (0,47 \cdot 0,51)] / (1 - 0,51) = 0,71\%;$$

$$Mo = 0,29 / (1 - 0,51) = 0,59\%.$$

Занесем полученные результаты в таблицу 33.

Таблица 33 – Содержание легирующих элементов в швах

Элемент	Cr	Si	Mn	Mo
Пятислойная наплавка	1,2	0,54	0,72	0,57

Продолжение таблицы 33

Расчет S_d , при сварке без колебаний	1,11	0,52	0,7	0,55
Погрешность расчета Δ , %	- 7,5	- 3,7	- 2,7	-3,5
САО, %	4,35			
Диапазон допустимых содержаний от среднего значения по ИСО, %	± 22	$\pm 33,3$	$\pm 31,5$	± 14
Среднее ИСО И, %	25,2			
K_n	0,173			
Расчет S_d , при сварке с поперечными колебаниями, %	1,25	0,6	0,71	0,59
Погрешность расчета Δ , %	+ 4,2	+ 11,1	- 1	+3,5
САО, %	4,95			
K_n	0,196			

В качестве оценки надежности предлагаемой методики можно предложить следующее. Возможный диапазон изменения содержания какого-либо элемента в наплавленном металле можно оценить отношением отклонений предельных значений от их среднего значения. Эти данные рассчитаны в таблице 33 в строке «диапазон допустимых содержаний от среднего значения по ИСО». За критерий возможной погрешности метода следует принять отношение САО для данной методики к диапазону ИСО $K_n = \text{САО}/\text{И}$. Наиболее объективной будет средняя оценка по всем элементам. Чем меньше будет такое отношение, тем более пригодной должна считаться предлагаемая методика, тем более надежен предлагаемый метод. Для сварки без поперечных колебаний отношение составляет $K_n = 0,173$. То есть диапазон возможных содержаний элементов в наплавленном металле в среднем почти в 6 раз больше САО методики. Также близкое, но несколько большее значение $K_n = 0,196$ составляет данный коэффициент для сварки с поперечными колебаниями.

Результаты химического состава в дополнительном и наплавленном металле, которые отображены в таблице 32, наглядно изображены на рисунке 31.

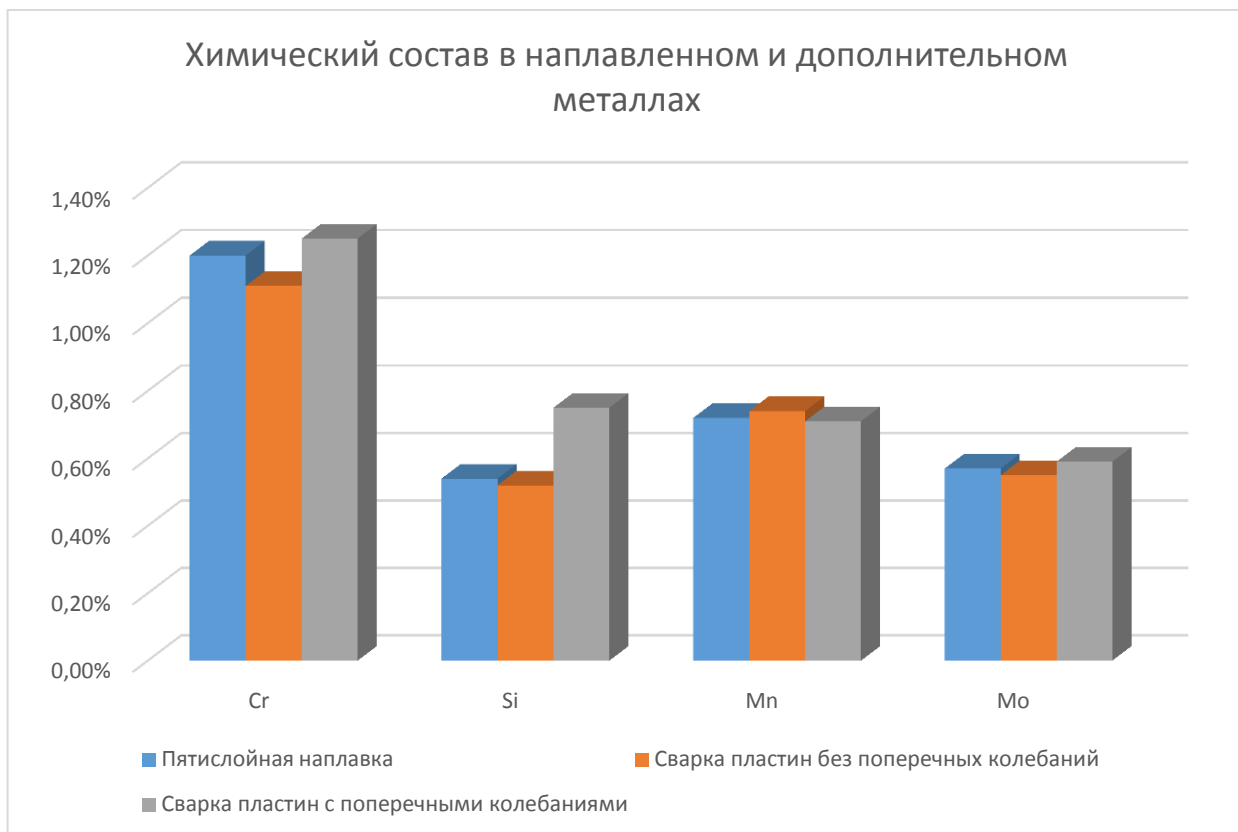


Рисунок 31 – Результаты химического состава наплавленного металла в пятислойной наплавке и дополнительного металла в шве при сварке пластин

Результаты погрешности определения химического состава при расчете дополнительного металла в шве при сварке с поперечными колебаниями и без колебаний, наглядно отражено на рисунке 32.

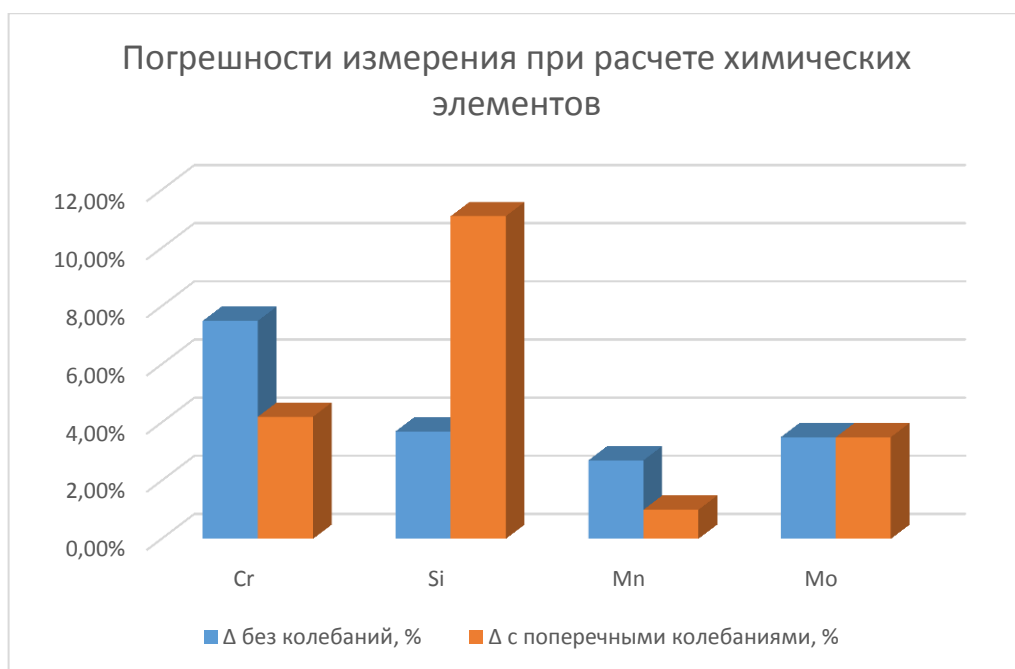


Рисунок 32 – Результаты погрешности определения химического состава при расчете дополнительного металла в шве при сварке с поперечными колебаниями и без колебаний

Совпадение расчетных данных для дополнительного металла при сварке без колебаний и пятислойной наплавки является весьма оптимистичным. Среднее значение САО составляет 4,35%. Также при сварке пластин с поперечными колебаниями среднее САО составляет 4,95%. Это означает, что выполнение однослойной сварки перспективно для расчета химического состава наплавляемого металла без выполнения многослойной наплавки.

В связи с доступностью определения химического состава швов спектральными методами создаются большие возможности по регулированию доли участия основного металла в металле шва и его химического состава, входному контролю сварочных материалов, аттестации сварочных материалов, а также при их разработке. Для этого целесообразно стандартизировать условия проведения испытаний – размеры свариваемых пластин, тока сварки, длину сварного шва.

Поскольку методика определения сечения шва по его размерам дала обнадеживающие результаты при ручной сварке, можно предположить, что при автоматических способах сварки данная методика будет давать еще более высокие результаты.

4.4. Выводы по 4 главе

Результат определения площади проплавления основного металла, в поперечном сечении, с использованием теории распространения тепла, является позитивным. Погрешность определения расчетных данных относительно экспериментальных, составила всего 4,5%. Это указывает на высокую точность определения, при использовании данного метода. Исходя из этого, можно утверждать, что при использовании ручной дуговой сварки плавящимся электродом, без поперечных колебаний, данный метод, может быть взят за основу, при определении химического состава шва.

Результат, полученный для площади проплавления основного металла, в поперечном сечении, при сварке с поперечными колебаниями нельзя считать отрицательным. Так как при подборе формулы, более точно описывающей распространения тепла при сварке с поперечными колебаниями, велика вероятность, получения более точного, расчётного результата.

При этом доля участия основного металла в металле шва по двум рассматриваемым способам сварки отличается незначительно.

Однако, это нельзя сказать про однородность химического состава по длине всего шва. В данном случае, использовать сварочные швы, полученные при сварке с поперечными колебаниями, будет более надежным вариантом. Так как неоднородность химического состава, в данном случае меньше, на это указывает результаты спектрального анализа и среднее значение САО.

Анализируя результаты, полученные в ходе расчетов, можно выдвинуть следующие тезисы:

- доля участия основного металла в металле сварного шва при сварке с поперечными колебаниями и без колебаний отличается незначительно.

- стабильность поддержания основных размеров шва при ручной сварке по двум вариантам может существенно отличаться.

- при сварке с поперечными колебаниями имеет место существенно меньшая неоднородность химического состава шва. Наименьшая химическая неоднородность имеет место при пятислойной наплавке.

- сварка с поперечными колебаниями является более перспективным методом определения содержания легирующих элементов в шве по его измеренным размерам.

Заключение

Цель данной магистерской диссертации заключалась в повышении качества сварных соединений за счёт увеличения производительности при контроле их химического состава, в ходе использования методики определения площади проплавления основного металла с помощью теории распространения тепла.

Из полученных результатов можно утверждать, что использование данной методики даёт весьма точное значение площади сечения расплавления основного металла, при ручной дуговой сварке плавящимся электродом без поперечных колебаний. Погрешность расчётного результата в сравнении с экспериментальным результатом, составила всего 4,5 %. Это несущественно отразится на определении химического состава дополнительного металла.

Результат проделанной работы указывает на то, что использование данной методики позволяет определять химический состав дополнительного металла, в сварном шве, с высокой точностью, не прибегая к разрушению самого шва. Это позволяет усовершенствовать метод определения химического состава наплавленного металла, что немаловажно при входном контроле на производстве; сертификации плавящихся электродов; разработке новых марок плавящихся электродов.

При дальнейшем развитии данной тематики необходимо проведение аналогичных исследований с разнообразными способами сварки. Результаты данных исследований могут лечь в основу создания неразрушающего метода контроля химического состава сварных швов, что является актуальной задачей на данный момент.

Список используемой литературы и источников

1. Никифоров В.М. Технология металлов и конструкционные материалы: Учебник для средних специальных учебных заведений. 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1980 – 360с. ил.
2. Смирнов, И. В. Реализация национальной системы аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства в Средневолжском регионе / И.В. Смирнов, В.П. Сидоров, В.А. Печенкина // В сб. Сварка XXI век – «Теория и методика, повышение качества профессионального образования и аттестация специалистов сварочного производства». Труды Всероссийской конференции. Тольятти: ТГУ. 2002 – С.94-98.
3. Способ определения скорости расплавления покрытого электрода / В.П. Сидоров, В.А. Федякин // Патент РФ на изобретение № 2582170 от 20.04.2016.
4. Сидоров В.П., Федякин В.А., Кутулбаев Р.Б.. Исследование скорости расплавления покрытых электродов / Сварочное производство. 2016. № 1. С. 3-5.
5. Сидоров В.П., Абрамова С.В. Влияние полярности на скорость расплавления покрытых электродов / Сварочное производство. 2016. № 1. С. 18-21.
6. Sidorov V.P., Fedyakin V. A., Kutulbaev R. B. Determination of the melting rate of coated electrodes / Welding International. 2016. T. 30, № 12. С. 968-971.
7. Сидоров В.П., Борисов Н.А. Оценка возможности регулирования рода и полярности тока, доли участия основного металла в шве при сварке под флюсом / Сварочное производство. 2013. № 5. С. 16-18.
8. Kovtunov A.I., Churin S.A. Effect of welding conditions on penetration in mechanized surfacing / Welding International . 2012. Vol. 26, № 9. P. 707-709.

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

10. Сидоров В.П. Способ определения площади проплавления основного металла при дуговой сварке / В.П. Сидоров // Патент РФ на изобретение № 2704676 от 26.11.2018.

11. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности / М. Машиностроение, 1973. 448с.

12. Теория сварочных процессов: Учеб. для вузов по спец. «Оборуд. и технология сварочн. пр-ва» / В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.; Под ред. В.В. Фролова. – М.: Высш. шк., 1988. 559 с.: ил.

13. Сварка в машиностроении: Справочник: В 4 т. / Редкол.: Г.А. Николаев (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1978 – Т.1 / Под ред. Н.А. Ольшанского. 1978. 504 с., ил.

14. Сидоров В.П. Об определении понятия наплавленного металла / В.П. Сидоров // Сварка. Реновация. Триботехника: матер. IX Уральской науч.-практич. конф. (Н. Тагил, 21 января 2019 г.). Н. Тагил, 2019. – С. 53 -57.

15. ГОСТ 9466-75 (СТ СЭВ 6568-89) Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки сталей и наплавки. Классификация и общие технические условия (с Изменениями N 1, 2, с Поправкой) [Текст]. – введ. 1976-01-01 – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997 – 52с.

16. ISO 6847-2000. Welding consumables – Deposition of a weld metal pad for chemical analysis. [Электронный ресурс]: <http://allaboutmetallurgy.com/wp/wp-content/uploads/2016/12/ISO-6847.pdf> (дата обращения: 12.12.2019).

17. Красюков В.Е. Исследование проб от расплавления покрытых электродов дугой косвенного действия / В.Е. Красюков // Выпускная квалификационная работа бакалавра. Тольятти, ТГУ. 2018. – 104 с.

18. Сидоров В.П., Абрамова С.В. Скорость расплавления отечественных и импортных электродов аналогичных марок / Сварка и

контроль. Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 130-летию изобретения Н.Г. Славянова электродуговой сварки плавящимся электродом. Пермь, 18-21 сентября 2018 г. Пермь: Изд-во ПНИПУ. 2018. 364 с. С. 273-278.

19. Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П. Технология и оборудование сварки плавлением. Учебник для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 1977. – 432 с. с ил.

20. Стеклов О.И. Основы сварочного производства: Учеб. Пособие для техн. училищ. М.: Высш. школа, 1981. – 160 с., ил.

21. 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.

22. ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. [Текст]. – введ. 2008-07-01 – М.: Стандартиформ. 2009. – 8 с.

23. ГОСТ 10051-75. Электроды покрытые металлические для ручной дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами. Типы. [Текст]. – введ. 1977-01-01 – М.: Издательство стандартов, 1993. – 12 с.

24. ГОСТ 10052-75. Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами. Типы. [Текст]. – введ. 1977-01-01 – М.: Издательство стандартов, 1993. – 12 с.

25. ГОСТ 5632-2014. Нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. [Текст]. – введ. 2015-01-01 – М.: Стандартиформ. 2015. – 56 с.

26. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. - М.: Наука, 1987 - 240 с.

27. Сидоров В.П., Советкин Д.Э., Мельзитдинова А.В. Математическое моделирование размеров сварного шва / Сварка и Диагностика. 2020. № 2. С. 13–16.

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

29. Кархин В.А. Тепловые процессы при сварке / Изд-ва СПб технического университета. 2015 г.

30. Математическое моделирование энергетических процессов сварки / Лабораторный практикум // Тольятти: Изд-во ТГУ, 2014. – 193 с.

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

32. ГОСТ Р ИСО 3580-2009. Материалы сварочные. Электроды покрытые для ручной дуговой сварки жаропрочных сталей. Классификация. [Текст]. – введ. 2011-01-01 – М.: Стандартинформ, 2010. - 19с.

33. ГОСТ 9467-75. Электроды покрытые для ручной сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей. [Текст]. – введ. 1977-01-01 – М.: ИПК Издательство стандартов, 2005. - 6 с.

34. Kemppi MinarcTig EVO200. [Электронный ресурс]: <https://www.kemppi.com/ru/offering/family/minarctig-evo/> (дата обращения: 15.10.2019).

35. SARTORIUS LP 1200 S. [Электронный ресурс]: <http://www.technicalsystems.ru/Laboratornye-vesy/Laboratornye-vesy-Sartorius-LP-1200-S> (дата обращения: 15.10.2019).

36. Universal Desktop Ruler [Электронный ресурс]: <http://avpsoft.ru/products/udruler/> (дата обращения: 28.11.2019).

37. X-MET 8000. [Электронный ресурс]: <https://profpribor.ru/shop/pribory-nerazrushayushhego-kontrolya/analiz-metallov/rentgeno-fluorescentnyj-analizator-metallov-x-met-8000> (дата обращения: 15.10.2019).

38. WDW-300E. [Электронный ресурс]: <https://t-ndt.ru/katalog/ispitatelnyie-mashinyi/razryivnyie/elektromexanicheskie-razryivnyie-mashinyi/razryivnaya-mashina-wdw-300e.html>

39. Сидоров В.П. Расчет площади провара основного металла при сварке под флюсом / Сварка. Реновация. Триботехника. Тезисы докладов VIII конференции. Нижний Тагил, 02-03 февраля 2017. – С. 36–40.

40. Сидоров В.П. Расчеты параметров сварки плавлением / Тольятти: ТГУ, 2017. – 250 с.

41. Аттестация сварщиков и специалистов сварочного производства: сборник документов. Серия 03. Выпуск 18 / Колл. авт. – М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002. – 144 С.

42. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учебное пособ. для вузов. -2-е изд., – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.

43. Красюков В.Е. Исследование проб от расплавления покрытых электродов в графитовой колодке / Сварка-пайка-обработка материалов давлением: сборник материалов XIV (Тольятти, 18 апреля 2018 года) и XV (Тольятти, 11 апреля 2019 года) студенческих научно-технических конференций / под ред. В.В. Ельцова, А.С. Климова. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2019. – С. 10-13.

Приложение А

Сертификат качества производителя на партию электродов марки ОК 76.18



СЕРТИФИКАТ КАЧЕСТВА (3.1) - Химический состав ОТЧЕТ ПО ИСПЫТАНИЯМ(2.2) - Механические свойства/ INSPECTION CERTIFICATE (3.1) - Chemical analysis TEST REPORT (2.2) - Mechanical properties

Дата/Date: 2015-11-18

Сертификат номер/Cert no: EC24109526 rev. 0

Заказ ESAB/Our order:

Заказ/Your order:

Ссылка/Our ref:

Ссылка на заказ/Your ref:

Код заказчика/Cust no:

NA

Номер факса/Your fax:

Дата заказа/Your date:

e-mail/Your e-mail:

Адрес/Invoice address

Получатель сертификата/Cert receiver

Адрес грузополучателя/Delivery address

ООО ESAB BRU

ПОСТАВКА/DELIVERY

Партия №/Lot no: SB544018

Количество/Quantity: 40 000 KG

ПРОДУКЦИЯ/PRODUCT

Марка/Brand: ESAB
Описание/Desc: ОК 76.18 3.2x350mm 1/2 VP
Позиция №/Item no: 76183230G0

КЛАССИФИКАЦИЯ/CLASSIFICATIONS

SFA/AWS A5.5 E8018-B2
EN ISO 3580-A E CrMo1 B 4 2 H5

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА/MECHANICAL PROPS

Типичные значения/Typical data
- согласно/acc to EN 10204 - 2.2

Стандарт/Standard:

Доп. материалы/Auxiliary:

Состояние/Condition: PWHT 690 °C 1 h

ПРОЧНОСТЬ/TENSILE

Rp0.2	Rm	A4-A5
530 MPa	620 MPa	20 %

УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ/IMPACT

Temp	KV
-20 °C	80 J
-40 °C	50 J

КОММЕНТАРИИ/COMMENTS

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ/

CHEMICAL COMPOSITION

Испытания/Actual results
- согласно/acc to EN 10204 - 3.1

All weld metal

Доп. материалы/Auxiliary:

C	0.06%
Si	0.41%
Mn	0.71%
P	0.012%
S	0.007%
Cr	1.40%
Ni	< 0.1%
Mo	0.62%
Nb	0.01%
Cu	< 0.1%
V	0.01%
As	0.003%
Sb	< 0.01%
Sn	< 0.01%



Продукция поставляется согласно нормам EN ISO 9001.

Сертификат выписывается в электронном виде и действителен без подписи.

По всем вопросам обращайтесь:

42, bldg. 2A, Schepkina str., Moscow 129110, Russia. tel +7(495) 663-20-08 fax :+7(495) 663-20-09

Product supplied under a QA Programme fulfilling the EN ISO 9001 standard.

This certificate is produced electronically and is valid without signature.

Please refer any queries to: (see above)

Химический состав - утверждаю/Validation - Chemical Ана Другие свойства - утверждаю/Validation - Others

Ellen Björgran

Quality Manager

J-P Ernoult

Product Manager

Рисунок А – Сертификат качества производителя на партию электродов
марки ОК 76.18