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

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка и обработка материалов давлением и родственные процессы»
(наименование кафедры)

22.04.01 Материаловедение и технологии материалов
(код и наименование направления

подготовки)

Сварка и пайка новых металлических неметаллических неорганических материалов
(направленность(профиль)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На тему: Исследование процессов двусторонней сварки под слоем флюса

Студент С.Б. Двигунов _____
(И.О. Фамилия) (личная подпись)

Научный руководитель О.В. Шашкин _____
(И.О. Фамилия) (личная подпись)

Консультант В.Г. Виткалов _____
(И.О. Фамилия) (личная подпись)

Руководитель программы д. т.н. профессор А.И. Ковтунов _____
(ученая степень, звание, И. О. Фамилия) (личная подпись)

«_____»_____20_____Г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой СОМДиРП
д. т.н. профессор В.В. Ельцов _____
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)
«_____»_____20_____Г.

Тольятти2018

Содержание

ВВЕДЕНИЕ 4
ГЛАВА 1. ПЛАВЛЕНИЕ СВАРОЧНОГО ЭЛЕКТРОДНОГО И ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА 6
1.1 Основные технологические характеристики сварки под слоем Флюса 6
1.2 Производительность расплавления сварочных электродов при дуговой сварки под слоем флюса 13
1.3 Особенности проплавления основного металла при дуговой сварке под слоем флюса 18
1.4 Трубосварочная база со сварочным оборудованием Lincoln Power Wave AC/DC-1000 31
1.5 Трубосварочные базы ССТ-ПАУ и БТС 32
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА 36
2.1. Проплавляющая способность сварочной дуги под флюсом 36
2.2 Влияние рода и полярности на размеры шва 39
2.3. Применение различных схем расчета температурного поля при дуговой сварки под слоем флюса 45
2.4. Расчет эквивалентных эффективных мощностей в зависимости от полярности дуги 50

ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ШВА ПРИ ДВУХСТОРОННЕЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА СИСТЕМОЙ AGW 54
3.1 Оборудование, применяемое при двухсторонней сварке 54
3.2 Метод расчета провара при дуговой сварке под слоем флюса с помощью эмпирических формул 63
3.3 Методика расчета площади проплавления основного металла 65
Заключение 71
Библиографический список 72

Введение

Сварка является одним из ведущих технологических процессов современной промышленности, уровень развития и улучшения которой во многом зависит от уровня техники в машиностроении, строительстве и ряде других отраслей экономики. Сварка дуги под флюсом является очень распространенным методом механически-используемой сваркой под слоем флюса с расходуемым сварочным электродом. Этот метод используется в серийном и массовом производстве. Этим методом выполняются заполняющие слои в угловых сварных швах, а также торцевых сварных швах. Длина эти швов может быть 0,8 м и больше при толщине металла 5 – 100 мм. Но при современном производстве эти методы почти не используются.

В последние годы стали использовать источники дуги с биполярными токовыми импульсами, и именно этот – объект исследования малое использование возможностей современной компьютерной технологии, используемых определения менее затратных методов сварки. Требования к повышению качества и надежности сварных конструкций обеспечиваются за счет выбора нужного для сварки резервуара таких параметров как сварочные материалы и типы сварки, а так же за счет выполнения верного расчета режимов сварки.

Предметом настоящего исследования является использование дуговой сварки под слоем флюса. Она осуществляется главным образом дугами обратной полярности и дугами переменного тока промышленной частоты. Прямая полярность сварки редко используется для больших токов дуги. Данной причиной является блуждание дуги по поверхности сварочного электрода, неустойчивость плавления сварочного электрода. Между тем, плавление сварочного электрода в прямой полярности значительно выше, чем на оборотной стороне. Соответственно в большинстве случаев, когда требуется высокопроизводительное плавление сварочного электрода, рекомендуется использовать прямую полярность дуги.

Такие случаи включают, например, сварку достаточно большой толщины при разрезании свариваемых кромок. Напротив, при сварке без разделки кромок требуется более глубокое проникновение основного металла и более низкое плавление сварочного электрода. В зависимости от типа сварных соединений дуговая полярность должна меняться. Наиболее допустимым способом это может быть достигнуто при использовании источников питания с различными полярностями импульсов тока, регулируемые соотношением между продолжительностью обратной и прямой полярности тока. Данная установка не новшество и используется для сварки алюминиевых сплавов, поскольку присутствуют катодные пятна на продукте. В последнее время аналогичные установки применяются при дуговой сварке под слоем флюса. Вероятность появления данных установок обусловлена наличием эффекта, когда при достаточно высокой частоте чередования полярность уменьшает отрицательные аспекты поведения катодных пятен на стержне сварочного электрода. Использование установок с многополярными импульсами позволяет увеличить возможность одновременной сварки несколькими дугами, поскольку разрабатываются методы временного смещения воздействия тока отдельных дуг. В то же время магнитное взаимодействие дуг уменьшается, их можно сблизить либо увеличить сварочные токи, и, таким образом, эффективность сварки может быть улучшена.

Актуальность исследования обусловлена тем, что существуют определенные трудности в широком использовании установок с многополярными токовыми импульсами. Опциональные методы дуги прямой полярности с плавильными сварочными электродами недостаточно изучены. Нет рекомендаций по выбору параметров сварочного процесса. В расчетах тепловых процессов такой факт, как существенное различие в проникновении изделия на прямую и обратную полярности дуги, не отражался.

Целью данной работы является повышение качества сварного соединения автоматической сваркой под слоем флюса, путём оптимизации параметров сварного соединения.

Глава I. Плавление сварочного электродного и основного металла при автоматической дуговой сварки под слоем флюса

1.1. Основные технологические характеристики дуговой сварки под слоем флюса

Процессе сварки под слоем флюса заключается в том, что перед началом сварки на предполагаемое место сварки насыпается флюс высотой 30 – 50 мм, а затем в зону подается сварочная проволока.

При этом образуется газовый пузырь в верху которого будет образовываться расплавленный поток, а внизу сварочная ванна.

В газовом пузыре будут находится: металл, флюс и газ.

Давление в газовом пузыре в верху будет сохранятся флюсом-хранилищем.

Сварочная дуга будет постоянно отклонятся от своего вертикального положения. Отклонение от вертикального положения будет направлено в противоположную сторону от скорости сварки.

Жидкий метал под действием дугового давления будет отклонятся в обратную сторону от направления сварки. Соответственно расплавленный поток находится почти на поверхности расплавленного металла шва и тем самым прикрывает его плотным слоем.

Хороший контакт между имеющимся металлом и шлаком, а также присутствие пространственное, из окружающей среды, формирует хорошие предпосылки на защиту сварочных ванн таких как, металлургической и тепловой, это и создает хорошие механические свойства сварных [1].

При дуговой сварке под флюсом являются такие основные параметры как: ток, полярность, вылет, диаметр.

А конкретно сила тока и тип тока. Если проволока, то ее диаметр. Так же не мало важное значение имеет и полярность.

Снижая диаметр проволоки уменьшается подвижность колонны дуги и, как следствие, увеличивается проникновение и уменьшение ширины шва (таблица 1).

Таблица 1. Текущие значения дуги, которые обеспечивают один и тот же провар изделия для разных диаметров сварочных электродов

$d_э$, мм	**Провар H, мм**						
	3.	**4.**	**5.**	**6.**	**7.**	**8.**	**9.**
5.	**450**	**500**	**550**	**600**	**725**	**825**	**930**
4.	**375**	**425**	**500**	**550**	**675**	**800**	**925**
3.	**300**	**350**	**400**	**500**	**625**	**750**	**875**
2.	**200**	**300**	**350**	**400**	**500**	**600**	**700**

Примечание: для флюса марки «АН-348А» и марки «Св-08» рекомендуется использовать сварочные электроды малого диаметра для получения узких сварных швов с глубоким проникновением.

Благодаря хорошей защите металла, расплавившегося от воздуха и возможности подачи тока на сварочный электрод вблизи его конца (максимум 70 мм), чтобы предотвратить окисление перегрева и в то же время окисления проволоки ёмкость тока достигает 60А/мм². Ток дуги затрагивает главным образом проникновение, ширина шва немного влияет на силу тока. В дополнение к увеличению теплового эффекта с увеличением тока давление дуги также увеличивается, что приводит к погружению дуги в сварочную ванну и способствует увеличению проникновения.

Погружное дуговое сваривание является наиболее эффективной для дуговой сварки. Токи сварки достигают около 1000А, диаметр сварочной

проволоки электродной - 6мм. Ели нам необходимо получить М р/t = 20 кг/ч, то величина должна быть $\alpha_р$=20г/А час, где

Мр/t - производительность расплавления

$\alpha_р$ - коэффициенте расплавления

Это все намного выше, сравнивая с ручной дуговой сваркой покрытыми электродами.

Автоматическая сварка под слоем флюса может выполняться без разделки кромок при односторонней сварке толщиной до 16 мм, а с двухсторонняя сварка применяется при толщине металла менее 22 мм [24]. В основном использование больших толщин небольшое, это приводит к значительной экономии при обработке кромок и потреблении металла сварочного электрода.

Напряжение дуги «Uд» в основном зависит от состава газов и длины дуги, заполняющих дуговой промежуток. Увеличение «Uд» приводит к повышению подвижности, из-за которого ширина сварного шва – увеличивается, а его выпуклость уменьшается. Проваренное место мало зависит от «Uд».

С помощью эмпирической формулы рассчитывается напряжение дуги (в вольтах) [2].

$$Uд = 20+0,05Iд/d_э^{0,5}\pm1 \quad (1)$$

где «Iд» – ток дуги, А;

«$d_э$» – диаметр сварочного электрода, мм.

Таблица 2. Параметры Uд в зависимости от тока для двух диаметров сварочного электрода

$d_э$, мм	Uд , В	Iд, А
2	32-34	180-300
	34-36	300-400
	36-40	500-600
5	38-40	600-700

	40-42	700-850
	41-43	850-1000

В работе [3] это показывает напряженность электрического поля в колонке дуги наиболее распространенных флюсов марок «АН-348 и ОСЦ-45»

Если сварочную проволоку подавать в зону сварки с постоянной скоростью, то в большинстве случаев он работает со скоростью его подачи, которая определяет ток в этих условиях. Поэтому чем выше будет у нас скорость подачи, тем больше должен быть у нас ток для того, чтобы обеспечить расплавление проволоки.

Если у нас проволока диаметром от 3 до 6 мм, то для нее рассчитанные токи устанавливаются в пределах от 400 до 1200 А, а скорости подачи проволоки должны соответствовать скорости от 0,5 до 3,0 м/мин (от 30 до180м/час (таблица 3).

Если у нас проволока диаметром от 1,6 до 2,5 мм, то для нее рассчитанные токи устанавливаются в пределах от 200 до 600 А, а скорости подачи проволоки должны соответствовать скорости от 3 до 12 м/мин (от 30 до 180м/час (таблица 3).

При использовании автоматы 1-го типа производительность расплавления находится в пределах до 40 кг/час, а для второго типа уже 2-го до 28кг/час.

Большой выхода сварочного электрода приводит к большему его нагреву, а следовательно, и скорости плавления. Глубина проникновения несколько снижена. В работе [3] применительно к ГОСТ 8713-89 указано, что односторонние сварные соединения имеют толщину до 10 мм, двусторонние – до 20 мм. В соответствии с режимами приведенными в [8] для 1 прохода без обрезки краев, как правило, стыковые соединения выполнены из стали толщиной 12-15 мм. Зазор образуется для получения полного проникновения и

нужной выпуклости шва между краями соединяемого соединения, который зависит от толщины металла.

Если толщина металла листов от 10 до 15 мм, то зазор должен находится в пределах от 1 до 3 мм, а если толщина металла листов от 21 до 30 мм, то зазор должен находится в пределах от 3 до 6 мм – это при условии в стыковых соединениях без режущей кромки.

Чтобы предотвратить прожоги, применяют стальные или медные пластины (подкладки) или флюсовые подушки, которые устанавливают с обратной стороны сварного шва.

Двусторонняя дуговая сварка под слоем флюса стыкового соединения позволяет получить качественное сварное соединение. Таким образом, стальные листы толщины до 22 мм могут быть сварены без разделки кромок. Если невозможно поддерживать зазор между краями меньше 1 мм, как при односторонней дуговой сварки под слоем флюса.

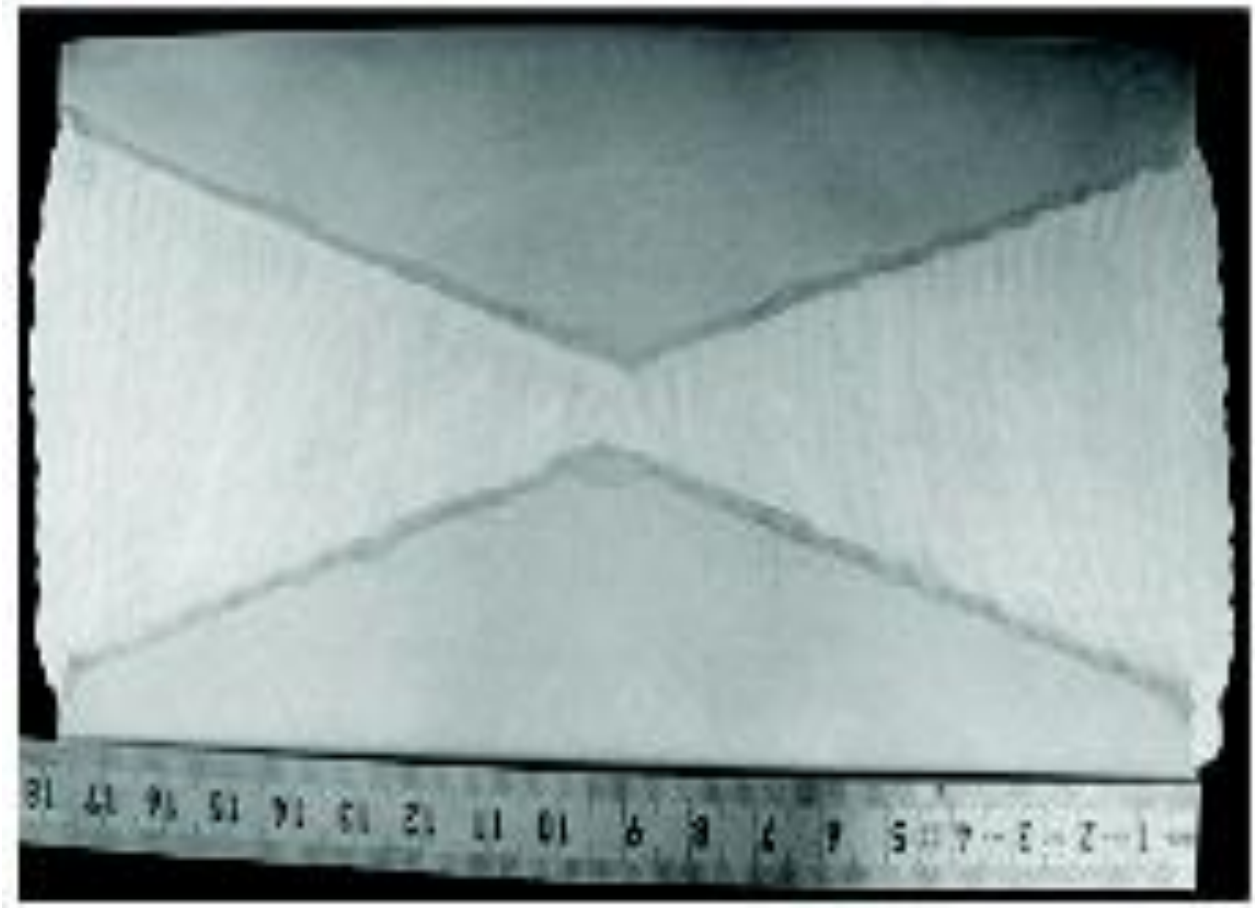


Рис. 1 -Макрошлиф образца сварного соединения, выполненного автоматической сваркой под слоем флюса.

При этом требования к точности сборки менее строги, чем при сварке соединений односторонним швом. При правильном применении технологии сварки практически не имеет таких дефектов: несплошности перекрытия между валиками, шлаковые включения или поры.

Чтобы предупредить попадания жидкого металла в зазор и образование прожогов, первый слой двустороннего шва необходимо сваривать на флюсовой подушке. Техника сварки на флюсовой подушке такая же как при сварке стыков односторонним швом.

Таблица 3. Ориентировочные режимы двусторонней сварки без разделки кромок, с обязательным зазором (диаметр проволоки 5 мм)

Толщина листов, мм	Зазор в стыке, мм	Iсв, А	Uд, В		Uсв, м/с
			Переменный ток	Постоянный ток обратной полярности	
14	3-4	700-750	34-36	32-34	30
16	3-4	700-750	34-36	32-34	27
18	4-5	750-800	36-40	34-36	27
20	4-5	850-900	36-40	34-36	27
24	4-5	900-950	38-42	36-38	25
28	5-6	900-950	38-42	36-38	20
30	6-7	950-1000	40-44	-	16
40	8-9	1100-1200	40-44	-	12
50	10-11	1200-1600	44-48	-	10

Если техническими условиями предусмотрены жесткие допуски на величину усиления шва, то стыковые соединения сваривают двусторонним швом с разделкой кромок чаще всего двусторонней (Х-образной). Режимы сварки таких стыков (для обоих швов) приведены в табл. 3. Первый шов сваривается на флюсовой подушке.

Таблица 4. Режимы сварки под флюсом двусторонним швом стыковых соединений с разделкой кромок

Толщина листов, мм	Вид разделки кромки	Порядковый номер шва	Общий угол скоса кромок, □	Ø электрода, мм	Iсв, А	Uдв, В	Uсв, м/с
14	V-обр.	1 2	80 -	5 5	830-850 600-620	36-38 36-38	25 45
16	»	1 2	70 -	5 5	838-850 600-620	36-38 36-38	20 45
18	»	1 2	60 -	5 5	830-860 600-620	36-38 36-38	20 45
22	»	1 2	55 -	6 5	1050-1150 600-620	36-40 36-38	18 45
24	Одно скосная несеметричная	1 2	40 40	6 5	1100 800	36-40 36-38	24 28
30	Х-обр.	1 2	80 60	6 6	1000-1100 900-1000	36-40 36-38	18 20

Таблица 5. Характеристики сварочных автоматов

Модель	Назначение	Диаметр свариваемых конструкций	Высота свариваемых листов, м	Диаметр проволоки, мм	Вес, кг
AGW-1	Обычные резервуары, емкости	мин. 4,5м	1,5-3,2	2,4 3,2 2 x 1,6 (сварка двойной сварочной проволокой)	950
AGW-2					1800
AGW-1 LNG	Резервуары с двойной стенкой для хранения сжиженных газов		2,0 - 4,5		900
AGW-2 LNG					1770
AGWI-D	Универсальная установка, применяющаясядля изготовления резервуаров методом «наращивания» и «подращивания»		1,5-3,2		1100
AGW-1mini	Малогабаритная установка, для сварки небольших резервуаров с тонкими стенками		1.6-3.2		500
AGW-P	Малогабаритная установка, перемещение осуществляется по специальному рельсу,	внешний шов - мин. 2 м внутр. шов -			350

	устанавливаемо на резервуаре	**мин. 4,2 м**			

1.2. Производительность расплавления сварочных электродов при дуговом под флюсовом сваривании

Производительность расплавления сварочного электрода при дуговой сварке оценивается с помощью коэффициента расплавления $\alpha_р$.[2]:

$$\alpha_р=\alpha'_р+\Delta\alpha_р, \quad (2)$$

где «$\alpha'_р$»– составляющая сопоставлена тепло вложениям дуги;

«$\Delta\alpha_р$» составляющая, образуемая нагревом за счет током в «г/(А·ч)».

Для перевода «г/(А·с)» в «г/(А·ч)» нужно первое разделить на 3600.

$$\alpha'_р=11,6\pm0,4 \quad (3)$$

Если сварка постоянным током прямой полярности и переменным током

$$A'_р=A+B\cdot I_д$$

где А и В- коэффициенты эмпирические (4)

В опытах были определены коэффициенты «Ар и В» для сварки под флюсом на переменном, а также и постоянном током прямой полярности.

При проведении опытов использовались сварочные проволоки из низкоуглеродистой стали. А качестве флюса выбирался флюс кислый высоко марганцевый. Если эти значения подставить в формулы, то они будут иметь вид:

Сварка прямой полярности постоянным током

$$\alpha'_р=6,3+(70,2\cdot10^{-3}/d_э^{1,035})I_д;$$

Сварка переменным током

$$\alpha'_р=7,0+(70,2\cdot10^{-3}/d_э^{1,35})I_д.$$

График зависимости для процента расплавления на разных полярностях показан на рисунке 2.

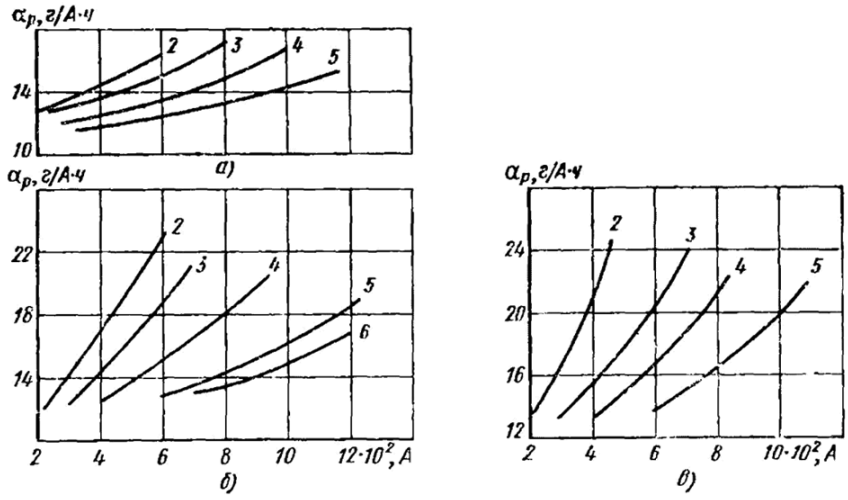


Рис. 2.- Зависимость $\alpha_р$от режима под флюсовой дуговой сварки:

а- ток постоянный обратной полярности;

б- переменный ток:

в- постоянный ток прямой полярности; где цифрами 2-6 указаны диаметры электродов мм.

Если рассматривать кривые рис. 1а можно заметить, что если взять во внимание формулу (2) обратной полярности коэффициент расплавления при нулевом вылете не будет зависит от тока дуги, основываясь на формулу (3) рост «$\alpha_р$» возможно сопоставить на счет влияния подогрева вылета. В литературных источниках мало информативного материала по исследованию влияния вылета на подогрев сварочного электрода. При дуговом под флюсовом сваривании вылет не превышает 70 мм.

Протяженность увеличивается с диаметром сварочного электрода. В работе [8] приведено соотношения для сварки в «CO_2» тонкими проводами, когда отношение начала к квадрату диаметра сварочного электрода обязан оставаться постоянным.

Размер второй составляющей выражения (2) коэффициента слияния может быть вычислена из уравнения

$$\Delta\alpha_p=(q_э/Н_э\cdot I_д)3600, \quad (5)$$

Где «$q_э$»-сила, используемая на поддержку тепла вылета сварочной электродной проволоки током; «$Н_э$»-тепло содержание 1 гр. жидких капель сварочной электродной проволоки.

По мнению Ерохина А.А. [9] для низкоуглеродистой сварочной проволоки рекомендуется принимать «$Н_{э=}$ 2100 Дж/г». Значение q следут рассчитывать по формуле Патона Б.Е., представленной в трудах Ерохина А.А. [9].

$$q_{э=0,1884j^2\rho_{0dэ}^2[(\upsilon_{э/a\cdot\alpha\cdot\beta)(e^{-p_2\cdot L-1)-(\alpha T_{п-T0)/p1]} \quad (6)$$

где j- плотность тока в электроде, «А/см^2»

«ρ_0»-удельноеэлектросопротивление сварочной электродной проволоки при «0°С» (для низкоуглеродистой проволоки «$\rho_0=14\cdot10^{-6}$ Ом·см»);

«$d_э$»- диаметр электродной проволоки, мм.

«$\upsilon_э$»- условная скорость подачи сварочного электрода см/с (скорость плавления сварочной электродной проволоки при нулевом вылете);

«а» - коэффициент температурапроводности см^2/с;

«α»- температурный коэффициент электрического сопротивления (для низкоуглеродистой стали $\alpha\approx0,0083°\ C^{-1}$);

β- коэффициент равный $0,24j^2\rho_0/ac\rho$;

с-теплоемкость «кал/г· ° С»;

«ρ»- плотность г/см^3;

«L»- вылет сварочного электрода см;

Тп- температура плавления сварочной проволоки;

T_0- начальная температура сварочной проволоки при выходе из токопровода;

Р1 и p_2- коэффициенты (7).

$$P_{1,2} = -\frac{v_э}{2a} \mp \sqrt{\frac{U_э^2}{4a^2} - \alpha} \quad (7)$$

Коэффициент расплавления приблизительно равен коэффициенту наплавки при механизированных способах под флюсового сваривания, то есть $\alpha_p \approx \alpha_н$. Это связано с тем, что очень мало идет потерь. К потерям относят: нагар и разбрызгивание.

При под флюсовой сварке в защитных газах величина коэффициента наплавки может существенно отличаться от величины коэффициента расплавления в связи с потерями сварочного электродного металла.

Что касается формулы (7), можно отметить следующее. Формула была получена давно, в конце 40-х годов прошлого века и показана в монографии [9] Практически нет никаких результатов в его использовании, за исключением статьи [19], в которой она приводится в другом виде.

В большинстве случаев сварка под флюсом ведется на обратной полярности и переменном токе. Прямая полярность редко используется.

Вероятно все это из-за низкой пространственной устойчивости дуги, вызванной блужданием дуги вдоль стержневого катода.

В НД магистральных газопроводов рекомендуется использовать прямую полярность при токах выше 600 А [25].

На рис. 1, скорость плавления сварочной проволоки в дуге прямой полярности гораздо больше, чем обратная. Для диаметра сварочной проволоки 2 мм при токе 400 А отношение коэффициентов плавления составляет около 1,4 с диаметром 5 мм и током 1000 А, то же самое. Принимая во внимание рекомендацию увеличения тока на прямой полярности на 100 А, можно увеличить скорость течения расплава, изменив полярность примерно на 50%. Такое лучше использовать при выполнении заполнении кромок. При этом условии также будет меньше смешивания базовых и электродных металлов, что позволит использовать менее легированные и дорогие провода для сварки легированных сталей.

Простая формула приведена в [14] коэффициента слияния на обратной полярности при сварке в двуокиси углерода тонкой кремниево-марганцевой проволоки:

$$\alpha_p = \rho(0{,}23 + 8{,}0 \cdot 10^{-5} L \cdot J) \quad (9)$$

где ρ- плотность сварочного электрода, г/мм^3,

L- вылет, мм;

J – плотность тока, А/мм^2.

В работе [31] для сварки дуговым потоком в среде CO2 приведена несколько другая формула для коэффициента плавления в дуге противоположной полярности$\alpha_p = 9{,}05+3{,}1\cdot10^{-3}SQR(I\cdot L)/D^2$,

В этом случае начальная скорость плавления составляет 9,05 г(А·ч).

Таким образом, информация о начальной скорости плавления и нагревании сварочного электрода в выходе значительно отличается для разных условий сварки.

1.3. Особенности проплавления основного металла при дуговом под флюсовом сваривании

Соответственно, если скорость плавления сварочного электрода больше по прямой полярности дуги, то должно быть меньше доказательств продукта. Для двухсторонних стыковых стыков без скоса ребер существует прямо пропорциональное соотношение между током и проникновением.

$$H = k \times Ic/100, \quad (10)$$

где

H- провар в мм,

I-ток в А.

Коэффициент k зависит от диаметра сварочного электрода от «1,15 до 0,75» для полярности прямой и от «1,45 до 1,1» для обратной полярности. Оказывается, эти данные по обратной полярности выше от «25 до 45%» все зависит от диаметра сварочного электрода. Чем больше диаметр, тем разница в

силе меньше. Оказывается, что разница в проникновениях примерно равна разнице в производительности расплавления электродного металла. Это говорит о том, что из-за изменения полярности можно значительно изменить отношение в сварном шве между основанием и металлом сварного шва.

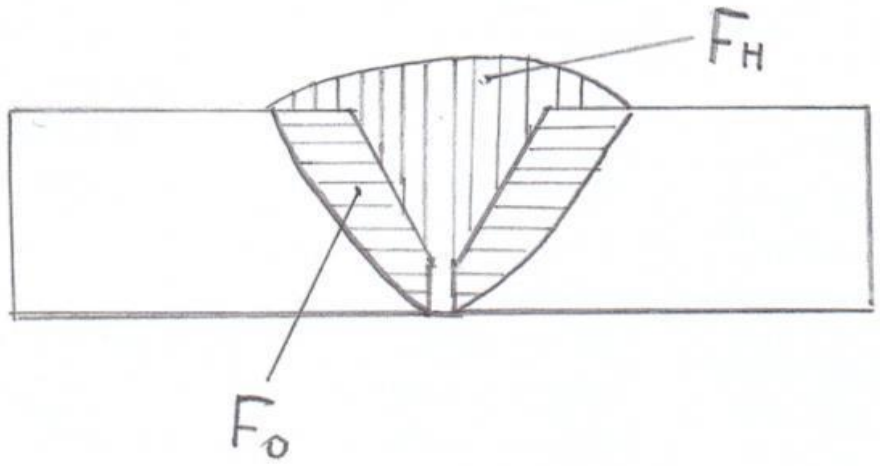
При сварке плавлением сварное соединение в большинстве случаев формируется путем смешивания сварного (основного) металла и дополнительного (наполнитель или электродный металл).

Контроль шва по составу химическому необходим для получения нужных свойств, поскольку в основном применяют дополнительный металл, который отличается составом от состава основного металла.

Так же, химический состав сварного шва контролируется химическими реакциями между сварочными флюсами и защитными газами.

Регулирование химического состава шва является наиболее значимым методом контроля его свойств.

Смешивание основного и вводимого металла с подпружиненной дуговой плавильной сваркой обычно оценивают специальным коэффициентом,



называемым долей основного металла в металле шва ψо (11), (рисунок 3).

$$\psi_o = F_o / (F_o + F_н), \qquad (11)$$

где F_o- площадь поперечного сечения главного металла;

$F_н$ – площадь поперечного сечения наваренного металла

Рис.3.- Коэффициент доли металла

Для экспериментального определения ψо необходимо получить макросечение поперечного сечения сварного шва и определить поперечное сечение дополнительного металла. В случае, если известна секция подготовки к сварке свариваемых кромок, нетрудно определить Fn. Однако в общем случае определение ψо экспериментальными средствами весьма сложно. А значит, что для получения рациональных параметров сварных соединений и режимов их производства необходимо разработать вычислительные методы для определения ψо на основе достижений математического моделирования процессов с под пружинной дуговой сваркой и программного обеспечения.

Если значение ψ_0 известно, то содержание химического элемента в шве причем какого надо $Сэ^{ш}$ можно определить по формуле

$$Сэ^{ш} = Сэ^{О}\ \psi о + Сэ^{Э}(1-\psi о\ ), \qquad (12)$$

где $Сэ^{О}$– содержание данного химического элемента в основном металле;

$Сэ^{Э}$– содержание этого же элемента в наплавленном металле «чистой» наплавки.

Содержание в металле сварного шва элементов определяется путем наложения нескольких осажденных слоев для оптимизации смешивания основания и осажденных металлов.

Самой сложной проблемой в теоретическом определении ψо является определение площади проникновения основного металла Fo. Площадь поперечного сечения металла сварного шва Fn намного легче получить, поскольку она определяется скоростью плавления дополнительного металла, который был достаточно хорошо исследован экспериментально.

Мы использовали силовую установку питания Power Wave AC / DC 1000 от Lincoln Electric (США), который позволил получить высокочастотные импульсы многополюсного тока. Данный силовой источник питания имеет цифровую систему управления, позволяющая создавать различные схемы:
переменного сварочного тока, а та же постоянного сварочного тока. Соотношение прямой и обратной полярности изменялось с шагом в 25% начиная от 0 так и до 100%. Наплавка проводилась на пластинах из стали с3 с

размерами 250х170х12 мм со скоростью 30 м/ч. Напряжение дуги составляло 29 В. Частота импульсов переменного тока составляла 60 Гц. Все данные показаны в таблице 6.

Таблица 6. Данные, полученные опытным путём [4] по размерам сварных швов при наплавке разно полярными импульсами тока

Баланс фаз	Iд, А	Параметры валиков			
		B, мм	g, мм	H, мм	Vэ, м/мин
ПП -100%	500	13,55	3,4	4,2	0,025
	550	16,9	2,45	5,85	0,028
	600	17,0	2,7	6,7	0,031
	650	15,53	3,5	8,8	0,034
ПП -75%	500	15,25	4,75	2,5	0,026
	550	16,7	3,1	5,5	0,031
	600	15,1	3,7	6,4	0,036
	650	15,8	3,9	7,2	0,041
ПП-50%	500	14,9	3,15	3,4	0,029
	550	16,9	4,1	5,5	0,035
	600	15,6	4,5	6,1	0,041

	650	15,1	4,4	7,0	0,047
ПП-25%	500	14,7	4,25	3,15	0,033
	550	16,7	3,2	4,7	0,039
	600	15,3	4,4	5,0	0,044
	650	15,6	4,6	6,5	0,050
ОП -100%	500	15,05	4,65	2,5	0,043
ОП -100%	550	14,58	4,8	4,3	0,048
	600	15,3	5,2	5,5	0,052
	650	14,8	5,3	5,8	0,057

Учитывая исследования [4], с увеличением процента прямой полярности скорость плавления электрода возрастает, а кулинария продукта уменьшается.

Это совпадает с уже известными данным. Авторы предприняли попытки для того, чтобы объяснить данное явление. Известно, что значение жидкостной прослойки в сварочных ванных влияет на приготовление. Они выдвинули гипотезу о том, что разница в доказательствах обусловлена разницей толщины жидкой прослойки, которая зависела от подключения источника к полярности. По полученным результатам, при прямой полярности чем больше количество расплавленного электродного металла, тем больше прослойки жидкого металла в сварочной ванне. Данные [4] подробно проанализированы в [5]. С помощью данных о сверх электродных мощностях, высвобождаемых в дуге по прямой и

обратной полярности, было видно, что разница в проникновении обусловлена различным влиянием на мощность, генерируемой в при электродных областях дуги и переносится металлом жидкого электрода. Разница достигала от 2 до 4 раз, все зависело от режима. В итоге автор пришел [5] к идее о необходимости учитывать в расчетах тепла при сварке расходуемого электрода модель двух источников тепла с разной концентрацией. Кроме того, в продолжении работы [5] в [6], на основе приведенной в работе [4] получили результат, что при изменении полярности дуги общая площадь поперечного сечения сварного шва не изменяется со значительным изменением доли основания и металла сварного шва.

Это дополнительное подтверждение того, что причиной разницы в проникновении является не разница в толщине жидкой прослойки.

Обратим внимание на возможности дуги с импульсами многополярного тока [32].

Получение прогрессивного производства и рационализации процессов открываются позволяет выбирать следующие параметры вольтамперной характеристики: такие как падающая или жесткая:

Прямоугольная либо синусоидальная форма кривой тока;

Диапазон настройки частоты от 10 до 100 Гц;

Корректировка баланса, отношение продолжительности;

Отрицательный полуволновый сдвиг периода нулевой точки кривой тока для задания амплитуды отрицательной полуволны или положительной полуволны;

Рациональная процедура зажигания дуги, которая устраняет нестабильность дуги во время работы переменного тока, а также при постоянном отрицательном токе.

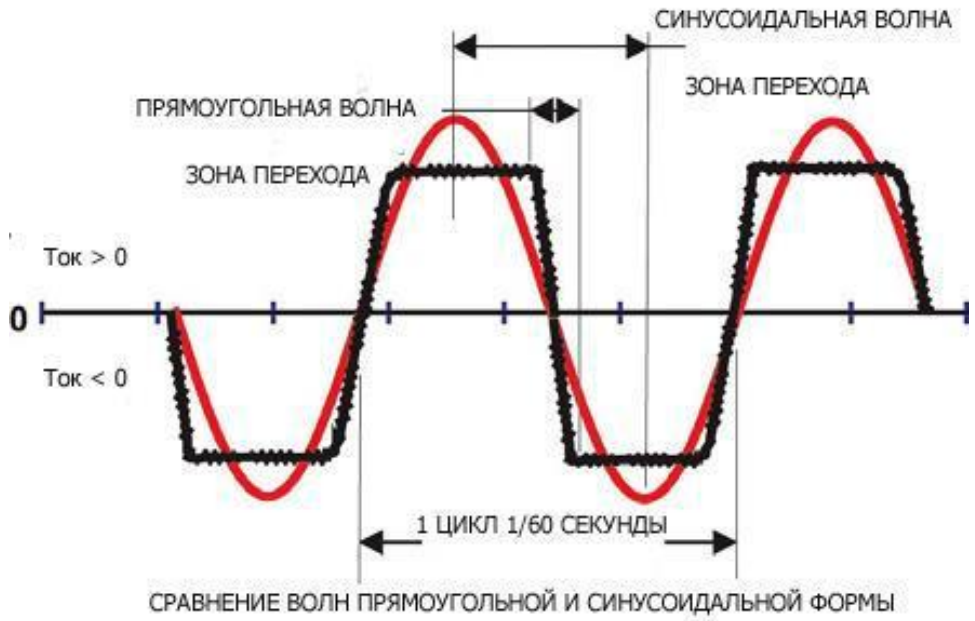


Рис. 4. Сравнение формы токов синусоидальной и прямоугольной формы

Чтобы проиллюстрировать преимущества прямоугольной волны в сравнении с синусоидальной, мы изображаем как текущие кривые на одном графике. Используя частоту переменного тока в 50Гц или частоту переменного тока в 60 Гц имеющаяся синусоидальная волна пересекает ноль 100 раз в секунду при 50 ГЦ или 120 раз в секунду при 60 Гц. Это означает, что переход от одной полярности к другой в обоих случаях теоретически совпадает с той же частотой (рис.5).

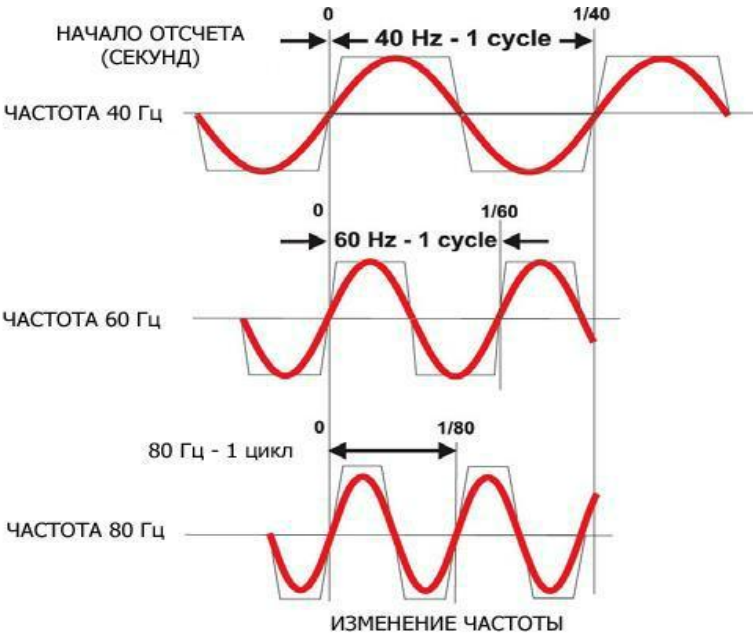


Рис. 5. Схема регулировки частоты синусоидального тока

Как показывает практика, регулируя частоту переменного тока - измененится форма зоны проникновения при изготовлении угловых или стыковых сварных швов, а также для сварки листового металла.

Как это показано на (рис.6).

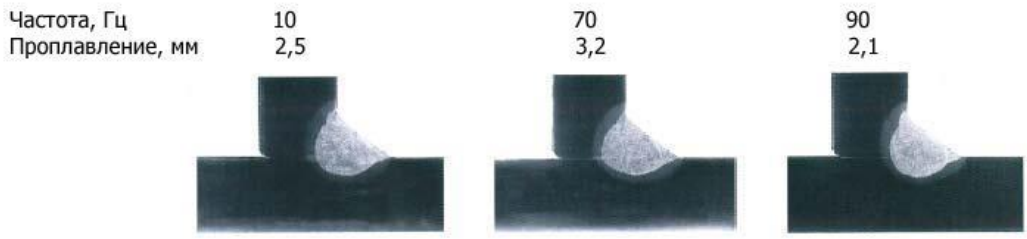


Рис. 6. Угловой шов таврового соединения: смещение нулевой точки волны: 25% положительный полупериод, 10% отрицательный полупериод.

При d= 4 мм, Iд=525 А, , Vc= 1,38 см/с.

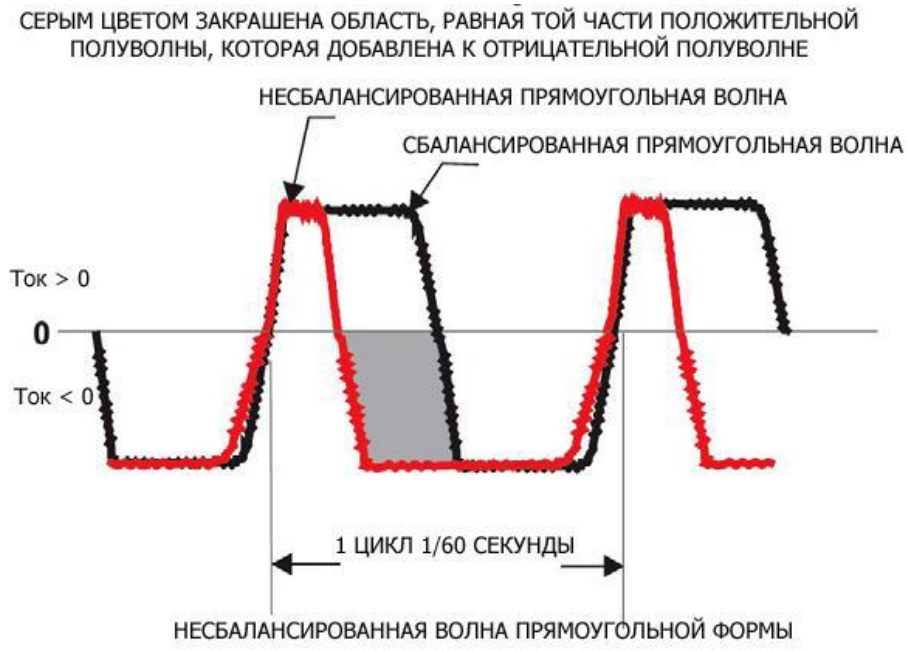


Рис.7. Схема изменения баланса положительного полупериода волны и отрицательного полупериода волны.

Метод баланса позволяет изменить время питания дуги положительным/отрицательным потенциалом. Его величину определяют как долю положительного полупериода по длительности волнового периода и выражают в «%». Например, в приведенной выше схеме черная волна имеет баланс 50%, а красная волна - 25%.

Изменяя отношение положительной и отрицательной полуволн, можно изменить соотношение между фазами осаждения и проникновения. Чем меньше значение баланса (%), тем выше коэффициент осаждения и меньшая глубина проникновения. Этой функции можно регулировать появление ожоги и изменять коэффициент осаждения, создавать новые способы роста скорости сварки.

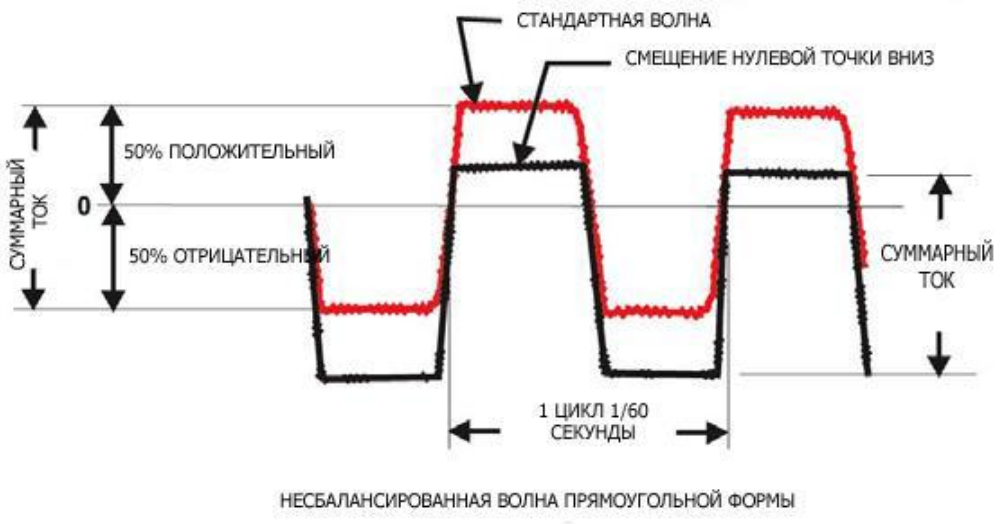


Рис. 8. Схема изменения положительной амплитуды волны и отрицательной амплитуды волны

Данный инструмент очень мощный, позволяющий увеличить фазу проникновения или всплытия. Power Wave AC/DC 1000 дает возможность сдвигать нулевую точку от -25% до + 25%. Повышение положительной амплитуды волны на +25% аналогично увеличивает постоянную составляющей тока положительной полярности, что приводит к более высокому проникновению, и когда нулевая точка смещается в противоположном направлении (-25%), наплавка увеличивается, а проникновение уменьшается.

Настройка фазового сдвига дуг (до 4-х дуг в стандартной комплектации) беря весь диапазон от 0° - 359°. Компьютерное (цифровое) управление помогает установить нужный сдвиг фаз между дугами.

Благодаря функции настройки Power Wave AC / DC 1000 можно менять сдвиг во всем диапазоне от 0° - 359°.

Преимущество источников Power Wave AC / DC 1000. Благодаря этому стало возможным временно объединить несколько машин в сварочный блок для выполнения конкретной задачи сварки, а после завершения работы использовать каждый источник независимо. Благодаря этому оптимизируется процесс. (рис.9).

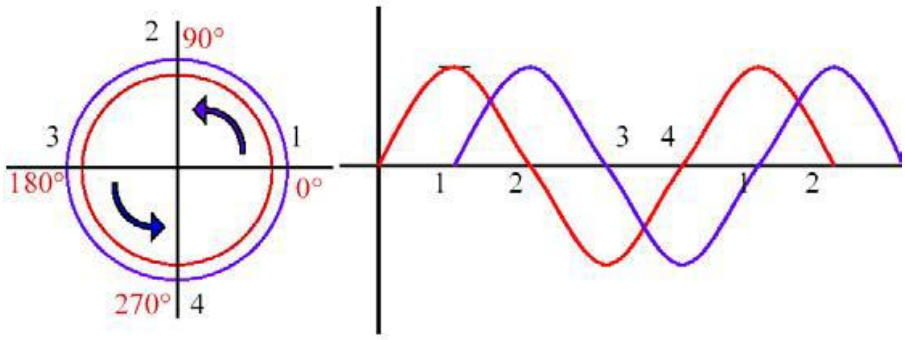


Рис. 9. Схема сдвига фаз между двумя дугами на 90 □

На диаграмме показан сдвиг фазы на 90°. Этот метод обычно используется при работе над двумя дугами. Тогда наблюдается переход через нуль одной волны, что совпадает со значением другой волны, но пиковым, что снижает взаимное влияние сварочных дуг. (рис.10).

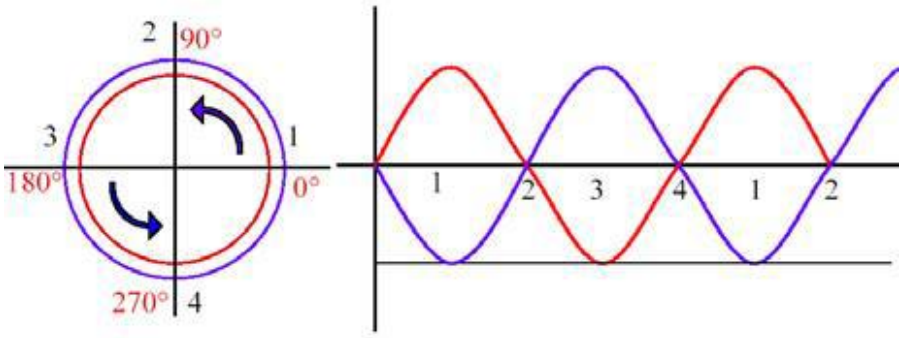


Рис.10. Схема сдвига фаз между дугами на 180 градусов

Когда фазы сварочных дуг сдвинуты относительно друг друга на 180°, четко видно, что они максимально влияют друг на друга, так как они обе имеют в данный момент пиковых значений. Заводской интерфейс системы Power Wave

AC/DC 1000 дает возможность настроить фазовый сдвиг для работы сразу же на четырех дугах, чтобы они не мешали друг другу.

Примеры применения сварочного источника Power Wave AC/DC 1000:

a) Одно дуговая сварка: глубина проникновения или скорость наплавки индивидуально настраивается при дополнительной функции, которые имеются на Power Wave AC / DC 1000, они всегда отличаются от стандартных значений.

b) Правильный выбор функций и правильно настроенные параметры оптимизируют работу источника, экономя энергоресурсы более экономично и значительно улучшая качество сварных швов.

c) Касаемо скорости наплавки и, следовательно, эффективности сварки, график (рисунок 11) показывает все преимущества, которые дает объединение различных функций.

Для примера, при сварке с тем же сварочным током 800 А система ACW / DC Power Wave позволяет увеличить скорость осаждения на 4,7 кг / ч, на все 43%.

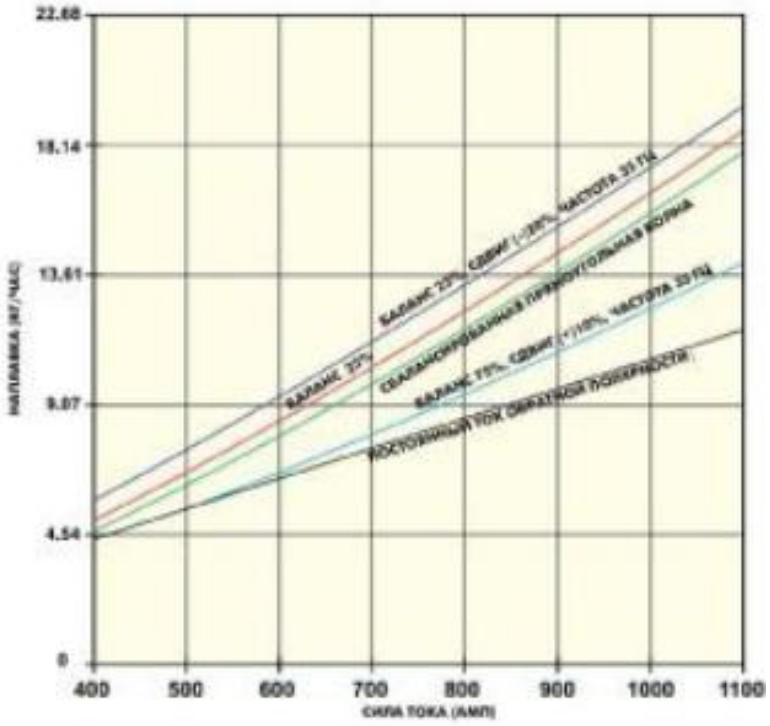


Рис. 11. Характеристики зависимости наплавки от тока дуги для различных балансовых сдвигов

При описании новой технологии дуговой подпиточной сварки невозможно не упомянуть надежность такой сварки и влияние технологических изменений на механические свойства шва. Фактически, увеличение скорости осаждения происходит рост скорости сварки, сокращения энергии в каждом проходе, получение превосходных механических свойств в основном металле или в зоне термического воздействия. Сравнивая результаты, двух разных процедур сварки (сварка переменного тока с прямоугольной волной и DC-положительная сварка) с использованием электрода S2Si при 600 А (табл. 5,6). Сварка проводилась на листах толщиной в 20 мм:

Таблица 5. Сравнение параметров при двух способах под флюсовой дуговой сварки

Режим сварки	Кол-во проходов	Ток , А	Напряжение, В	Подача, м/мин за проход	кДж/м (за проход)	Общая подача, м/мин
Пер. ток, баланс 30%, частота 40 Гц	14	600	32	0,61	1880	0,043
Пост. ток положительной полярности	14	600	28	0,46	2200	0,033

Таблица 6. Результаты проверки механических свойств всех сварных швов

Режим сварки	Предел прочности на разрыв, МПа	Предел текучести, МПа	Удлинение (2 дюйма)	Тест по Шарпи при -51°С	Тест по Шарпи при -29°С
Пер.ток, баланс 30%, частота 40 Гц	567	480	28	77	135
Пост. ток положительной полярности	538	549	30	85	158

Сравнение результатов сварки с использованием двух различных процедур сварки:

1) снижение рабочей энергии за один проход на 16 и более %;

2) скорость сварки увеличилась почти на 43%;

3) скорость осаждения увеличилась почти на 40%;

4) поддержание отличных механических свойств сварной шов.

Следовательно, нужно использовать сварку на переменном токе вместо сварки на постоянном токе с прямоугольной волной. Лучше использовать сварку на постоянном токе с прямой полярностью.

Такие же значения получаются при сварке угловых сварных швов. Но обязательным условием является, правильная установка все параметров.

Сварные швы угловые при толщине листов 8 мм практически не различаются по значению сварочного тока, но скорость сварки с переменным током на 40% выше. Если сравнить оба этих шва, то они имеют отличную форму друг от друга.

Источник питания Power Wave AC / DC 1000 дают возможность для применения многодуговой сварки. До недавнего времени сварка на нескольких дугах, особенно с количеством арки более двух, широко не использовалась, за исключением трубопроката. С выходом сварочных систем Power Wave AC / DC 1000 многие компании стремятся воспользоваться этими новыми возможностями.

1.4 Трубосварочная база со сварочным оборудованием Lincoln Power Wave AC/DC 1000.

Трубосварочная база со сварочным оборудованием Lincoln Power Wave1000 позволяет добиться:

- Повышение производительности и качества сварки;
- Ограничить и практически минимизировать сварку штучным электродом;
- Применять один сварной пост на один стык;
- Осуществлять работы при любых условиях окружающей среды, и даже при пониженных температурах;

- Исключение переточки кромок;
- Экономить сварочные материалы;
- Эффективно эксплуатировать оборудование;
- Снизить требования к уровню подготовки операторов-сварщиков
- Снизить количество высококвалифицированного персонала.

Сварка на трубосварочных базах, увеличивает скорость и темп выполнения работ.

Особенно эффективно применение при холодном климате.

А самое главное сварки под слоем флюса дает возможность поучения высококачественных стыков.

1.5 Традиционные подходы ССТ-ПАУ и БТС.

ССТ-ПАУ - трубосварочная база, состоящая из сборочно-сварочного стенда (СТТ) и полевой авто-сварочной установки (ПАУ)

БТС - база трубосварочная.

ССТ-ПАУ.

В первом периоде работ на сварочном посту выполняют сварку корневого слоя шва и горячего проходы ручной дуговой сваркой электродами. Разделка кромок при этом заводская.

Во втором периоде работ, секция на следующем посту, выполняются заполняющие слои шва и облицовочные слои, автоматической сваркой под слоем флюса.

ПАУ легко использовать в производстве, но имеются ряд требований, без которых процесс получения качества будет невозможен.

Требования предъявляемые к ПАУ:

- должна быть высокая квалификация и культура производства сварщика.

  Но в процессе возникают небольшие трудности, которые влияют на процесс сварки таки как:

- в первом периоде надо производить замену электрода, что увеличивает процесс и время сварки,
- в первом периоде надо внимательно следить за качеством выполнения корневого слоя шва, а также горячего прохода, это связано с тем, что необходимо очень часто зажигать электроды,
- при передаче с одного этапа на другой (с одного поста на другой) происходит остывание сварного шва и возможности даже остывания ниже требуемой межслойной температуру
- при выполнении шва расходуется большое количество сварочных материалов,
- при выполнении сварки очень много времени тратится на зачистку швов, а следовательно, и увеличивается общее время сварки.

Сейчас уже на трубосварочных базах ПАУ на первом этапе применяют сварку в два прохода полуавтоматической сваркой, заменив ручную дуговую сварку электродами.

То есть корень выполняют методом STT, а горячий проход Само защитной порошковой проволокой Innershield. Это сокращает время сварки и повышает качество сварных швов.

Но методом STT - метод сварки проволокой сплошного сечения в среде углекислого газа при переносе капель силами поверхностного натяжения, по этому его применение ограничено.

БТС.

В первом периоде делается обработка торцов под двухстороннюю сварку. Во втором периоде трубы отправляют сварочную станцию, где производят двухсторонняя сварку шва.

БТС, почти вся автоматизирована.

БТС отличается:

- при БТС получается более высокое качество сварки, чем ПАУ,
- БТС почти не зависит от человеческого фактора. И влияние человека почти не оказывает на выполненные сваренные соединения,

- Но повышается значительно стоимость, так как при выполнении сварки требуется внутренняя подварка шва. Внутренняя подварка шва выполняется под флюсом и необходимо иметь ряд приспособлений для приточки кромок.
- Необходимо делать широкое притупление под двустороннюю сварку, соответственно при сварке этого стыка металле шва содержится значительное содержание основного металла, а это в свою очередь влечет за собой снижение ударной вязкости,
- Вызывает проблему позиционирование внутренней сварочной головки, так как для этого необходимо применять телевизионных мониторов,
- Применение телевизионных мониторов требует особого обслуживания, что трудно обеспечить из – за пыли и грязи. А также тяжело применять при низких температурах,
- Трудность наблюдается при передачи с проточки на сварочный пост,
- Трудность сборки флюса из внутренностей трубы

С учётом перечисленного выше была разработана и сконструирована трубосварочная база, позволившая использовать все преимущества автоматической сварки под флюсом. Предложить использование автоматической сварки под флюсом можно из - за внедрения новых технологий управления сварочной дугой (ее формой) (Wave form Control), осуществленной в Power Wave AC/DC 1000.

Регулирование эпюрой сварочного тока, а, отсюда вытекает и управление, тепло вложением в сварочную ванну разрешили проблему вести сварку под флюсом с применением инверторных источников типа Power Wave AC/DC 1000 сразу по стыковой разделке кромок без наложения корневого слоя без опасности прожига соединения. Проведенные эксперименты показали, что формируемый корневой слой является полностью проплавленным швом, а ГПЛ препятствует образованию прожога.

Достоинство данной конструкции в том, что, она, объединила ПАУ его простоту с высоким качеством БТС. При этом добились большой

производительности. Это дало возможность совершенствования при сварке плетей труб, его производства.

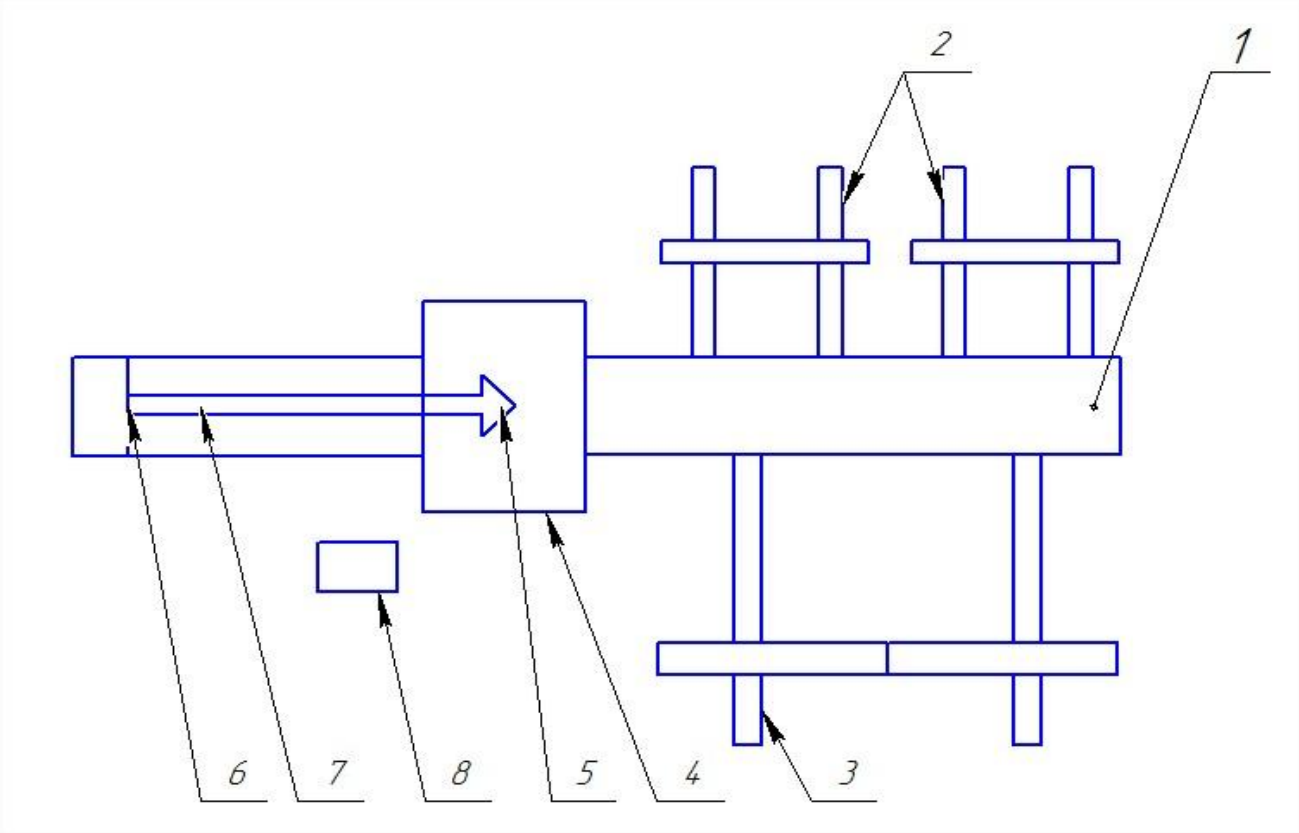


Рис. 12. Схема базы.

1-линия сборки и сварки (перемещение трубы до и после сварки, центровка, вращение при сварке); 2-покать приемная (подготовка торцов трубы под сварку); 3-покать скатывания (прием сваренных секций); 4-сварочный пост; 5-центратор; 6-гидростанция центратора; 7-штанга центратора; 8-энергоблок; 9-трубы на приемных

Глава 2. Исследование особенностей проплавления основного металла при дуговом под флюсовом сваривании

2.1. Проплавляющая способность дугового под флюсового сваривания

Для оценки плавильной мощности и эффективности сварочных процессов нужно применять объективные критерии. Анализ данных о режимах односторонней автоматической сварки под слоем флюса на обратной полярности без разрезания краев листов, приведенный в литературе [8], показал следующее: используемые токи намного выше токов при сварке с неплавящимся электродом. Вывод можно сделать такой, что для листов толщиной 4 мм и диаметром сварочной проволоки 2 мм средний ток должен быть 387 А. Следовательно, для листов толщиной 6 мм и диаметром сварочной проволоки 2 мм средний ток должен быть 460 А. Увеличения тока, по-видимому, обусловлена особенностями применения дугового давления при сварке расходуемым электрод. Принимая во внимание большее значение мощности катодной дуги, это приводит к большому увеличению сварной толщины.

Если соединять листы толщине 4 мм, то скорость соединения этих листов будет J = 0,44 см2 / с, это в три раза выше, чем при сварке неплавящимся электродом. А энергия сварки будет равна около E = 22,43 кДж / см2, это в 2,5 раза больше, чем при сварке неплавящимся электродом.

Можно сделать вывод, что сварка плавящимся электродом дает возможность увеличить мощность дуги и а так же и скорость их соединения, но отсюда тепловая эффективность процесса падает, тепловой эффект на металл шва увеличивается.

Предельная толщина без режущей кромки, свариваемая данным методом, с одной стороны, составляет 10 мм. В то время как используется проволока диаметром 5 мм и током 960 А.

J = 1,0 см2 / с, а E = 32,8 кДж / см2

где J - Скорость соединения, см2 / с

E - удельная энергия сварки, кДж / см2

Если взять сварку на переменном токе, при толщине листов 10 мм, при токе 725А, то

J = 0,83 см2 / с

Е =25,9 кДж / см2.

Тогда в рассматриваемом примере заготовки должны быть собраны с довольно большим зазором, а механизм формирования проникновения значительно отличается от корпуса плотно собранными краями. Образование шва во многом связано с проникновением большого количества металлического электрода в зазор. Подтверждает это, что этот метод можно сваривать без резки кромок толщиной 20 мм при токе 975 А. Тогда величина J должна быть J = 0,83 см2 / с, а Е увеличивается до 42,7 кДж / см2.

Особый интерес представляет анализ режимов двухсторонней сварки под поточной дугой. Сварка проводилась на сварочной проволоке переменного тока 5 мм. В анализе использовалось предположение, что режим однопроходной сварки обеспечивает 50% -ное проникновение толщины пластины. Сварка первого прохода производится примерно на 30% меньше рабочей энергии, чем вторая. Поэтому для оценки потребления энергии выбрана половина суммы токов и скорости сварки. В результате Е одного прохода Е = 43,4 кДж / см2 была получена при J равной J = 0,48 см2 / с. Можно сделать вывод, затраты на энергию при двусторонней сварке намного выше, чем при односторонней сварке.

При сварке этим способом при толщине листов 20 мм достигается удельная энергия сварки 54,7 кДж/см2 при скорости соединения J=0,58 см2/с. Максимальная свариваемая, данным методом, толщина 22 мм.

Также был проведен анализ режимов тандемной двухдуговой, односторонней под поточной сварки пластин переменного тока толщиной 8 и 14 мм с использованием флюса-медного вкладыша. В процесс было определено, что значительное увеличение J = с 1,78 см2 / с до 2,66 см2 / с при толщине листов 8 мм, приводит к увеличению удельной энергии сварки на 11%. Когда толщина листов достигает 14 мм, расход энергии дуги увеличивается, а J

= 4,66 см2 / с достигается E = 28,4 кДж / см2. Проведя анализ с односторонней одно дуговой сваркой в тождественных условиях J увеличилась в 2,5 раза с увеличением удельной сварочной энергии на 40%. Таким образом, изменение диаграммы процесса и использование двухдуговой сварки на зазоре позволяют достичь J в несколько $см^2/с$.

Таким образом двойная двухсторонняя сварка под флюсом дает возможность сваривать без резки краев листы толщиной 30 мм и менее. При двойной двухсторонней сварке скорость соединения увеличивается с увеличением толщины металла. Энергия сварки почти не зависит от свариваемой толщины листов. Сравнивая одностороннюю двухдуговую сварку толщиной листов от 8 до 14 мм скорость соединения уменьшается в 2 раза и более, но в то же время удельная энергия сварки соединения в целом увеличивалась почти в 4 раза. Делаем вывод, что нет необходимости сварки листов небольших толщин двухсторонней двухдуговой сваркой. То же самое, по-видимому, относится к односторонней тандемной сварке малой толщины.

Во время использования двухдуговой сварки со скоростью 140 м/ч сварной шов получается не очень хорошего качества, следовательно, чтобы обеспечить более высокие скорости сварки с образованием качественного шва используются три дуги. Все дуги горят в одной общей ванне. Трехдуговая сварка листов толщиной от 12 до 17 мм обеспечивала скорость соединения в пределах 5-6 см2/с. Дуговые токи имели порядок 1000-1100 А. Значит, что данный диапазон толщин удельной энергии сварки минимален и составляет ориентировочно= 20 «кДж/см2». Значит, мощность сварочного распределения в направлении сварки представляется одним из наиболее эффективных способов увеличения J и снижения E.

Результаты сварки под слоем флюса без разделки кромок сведены в таблице 7.

Таблица 7. Зависимости энергетических характеристик при различных способах дугового под флюсового сваривания

Характеристики способов	Максимальная толщина, мм	Скорость соединения J, см2/с	Удельная энергия сварки E, кДж/см2
сварка дуговая обратной полярности	10	1,0	32,8
Сварка дуговая переменного тока	10	0,83	25,9
сварка двухсторонняя	20	0,58	54,7
сварка двухдуговая односторонняя	14	4,66	28,4
сварка двухдуговая двухсторонняя	30	2,3	113,6
сварка трехдуговая односторонняя	17	6,0	20,0

Из таблицы 7 следует, что производительность сварки будет варьироваться в широких пределах, в зависимости от метода сварки. В случае двусторонней сварки без режущей кромки в качестве ориентира для расчетов следует использовать «J = 0,58 $см^2/с$» и «E = 54,7 $кДж/см^2$».

2.2 Влияние рода и полярности тока на размеры шва

Такие параметры как род тока и полярность тока оказывают большое влияние на форму шва, а также на его и размеры. Если взять сварку обратной полярности на постоянном, то будет видно, что глубина провара в этом случае будет приблизительно в интервалах от 40 до 50% больше, чем в случае сварки прямой полярности на постоянном токе. В этом случае видно, что количество теплоты, выделяемое на аноде, будет отличаться от количества теплоты, выделяемого на катоде. Если же сравнивать все со сваркой на переменном токе, то увидим, что глубина провара в этом случае будет меньше на величину от 15 до 20%, по сравнению со сваркой обратной полярности с постоянным

током. Наблюдается изменение полярности с частотой сто раз в секунду и это приводит к дальнейшему снижению выделения теплоты на металле за то время, когда он является анодом.

Если нам надо изменить ширину шва род и полярность тока, то повлиять на эти величины мы можем следующим образом: если взять прямую полярность при постоянном токе, то ширина шва будет уменьшена если сравнить с обратной полярностью постоянным током ну и так же будем наблюдать, если взять ток, но переменный.

Если использовать прямую полярность постоянный ток при автоматической сварке это увеличивает производительность плавления проволоки.

Если варить на токе переменном шов (его ширина) будет меньше, по сравнению с шириной при сварке на обратной полярности постоянном токе и больше, чем при сварке постоянным током, но прямой полярности.

От требований к формированию шва и марки флюса в основном при сварке трубопроводов применяют сварку выбирают полярность, но ток остается постоянный.

Большим плюсом почему можно применять переменный ток является такой параметр как коэффициент наплавки.

Если применять при постоянном токе «-» полярность, то будем наблюдать такое явление как подогрев предварительный вылета, следовательно, если «-» импульс, но ток постоянный, то видим, что коэффициент наплавки будет 30% и более чем при «+». Если все-таки осуществлять сварку на токе переменном, то наблюдаем следующее, когда полупериод подается ток постоянный «+» полярности (DC+), а на 2-ю половину периода ток постоянный «-» полярности (DC-), коэффициент наплавки повысится на 15%. Отсюда видим, что при сварке 2-мя дугами, что она осуществляется при работе одновременно 2-х дуг, причем первая будет на токе постоянном, а вторая на токе переменном. Следовательно, эта схема используется для уменьшения влияние друг на друга этих дуг, и при этом коэффициент наплавки будет составляет более чем на 15%, если выполнять сварку одним электродом.

Сварка под флюсом — основной механизированный способ соединения металлов и сплавов, который исследуется в течение длительного времени. Однако надежные количественные данные о кинетике плавления электродного металла и характере его переноса отсутствуют. Этот вопрос рассматривается в статье «Плавление электродного металла и взаимодействие его со шлаком при сварке под флюсом» [41].

Слой сыпучего флюса препятствует непосредственному наблюдению за плавлением и переносом металла, поэтому первоначально перенос металла при сварке под флюсом изучался косвенными методами. С помощью осциллографирования установлен дуговой характер процесса и капельный перенос металла. Размер капель электродного металла в зависимости от силы тока определялся осциллографированием и ситовым анализом капель, полученных при наплавке с большой скоростью на медь или графит. Попытки фотографирования процесса сварки под флюсом через кварцевую пластинку не дали каких-либо новых сведений.

Просвечивание зоны сварки рентгеновскими лучами позволяет исследовать процесс, не нарушая его нормального хода. С помощью рентгена были получены данные о влиянии параметров режима сварки на характер плавления электрода и внешнюю составляющую длины дуги, исследованы энергетические характеристики дуги под флюсом.

Рентгенография позволила получить лишь сведения о характере процесса в статике. В работах [35,36,38,39] указывается на капельный характер переноса металла, а Г. М. Тиходеев [40] считает, что в результате интенсивной бомбардировки поверхности электродов потоком электронов или ионов в тонком поверхностном слое выделяется громадная энергия, приводящая к испарению металла. «Капельный процесс становится заметным лишь при очень короткой дуге, так как на конце электрода не могут скапливаться сколько-нибудь значительные массы жидкого металла» [40]. Суждения Ф. Удо о типах переноса металла, влиянии параметров режима, времени переноса и др. [37] противоречивы.

При проведении экспериментов, а также научно-исследовательской работы было отмечено следующее:

Скорость подачи проволоки при сварке на прямой полярности (DC-) больше скорости подачи на обратной полярности (DC+).

Если рассматривать вес или по-другому можно назвать массу капли металла расплавленного электрода, то масса ее будет на полярности прямой больше (DC-), по сравнению с полярности обратной (DC+). При сварке под флюсом расплавленный электродный металл переносится в основном в виде капель, на больших силах тока имеет место перетекание металла в ванну без образования отдельных капель [41].

Во всем исследованном диапазоне режимов сварки на прямой и обратной полярности происходит капельный перенос металла.

Все разновидности переноса металла укладываются между двумя крайними типами - перенос мелкими каплями с заострением конца электрода при обратной полярности и крупными бесформенными каплями при прямой полярности (рис. 13). Возможно, что при дальнейшем увеличении плотности тока будет иметь место и струйный перенос металла. В опытах максимальные плотности тока составляли 35 а/мм^2 и струйный перенос не наблюдался.

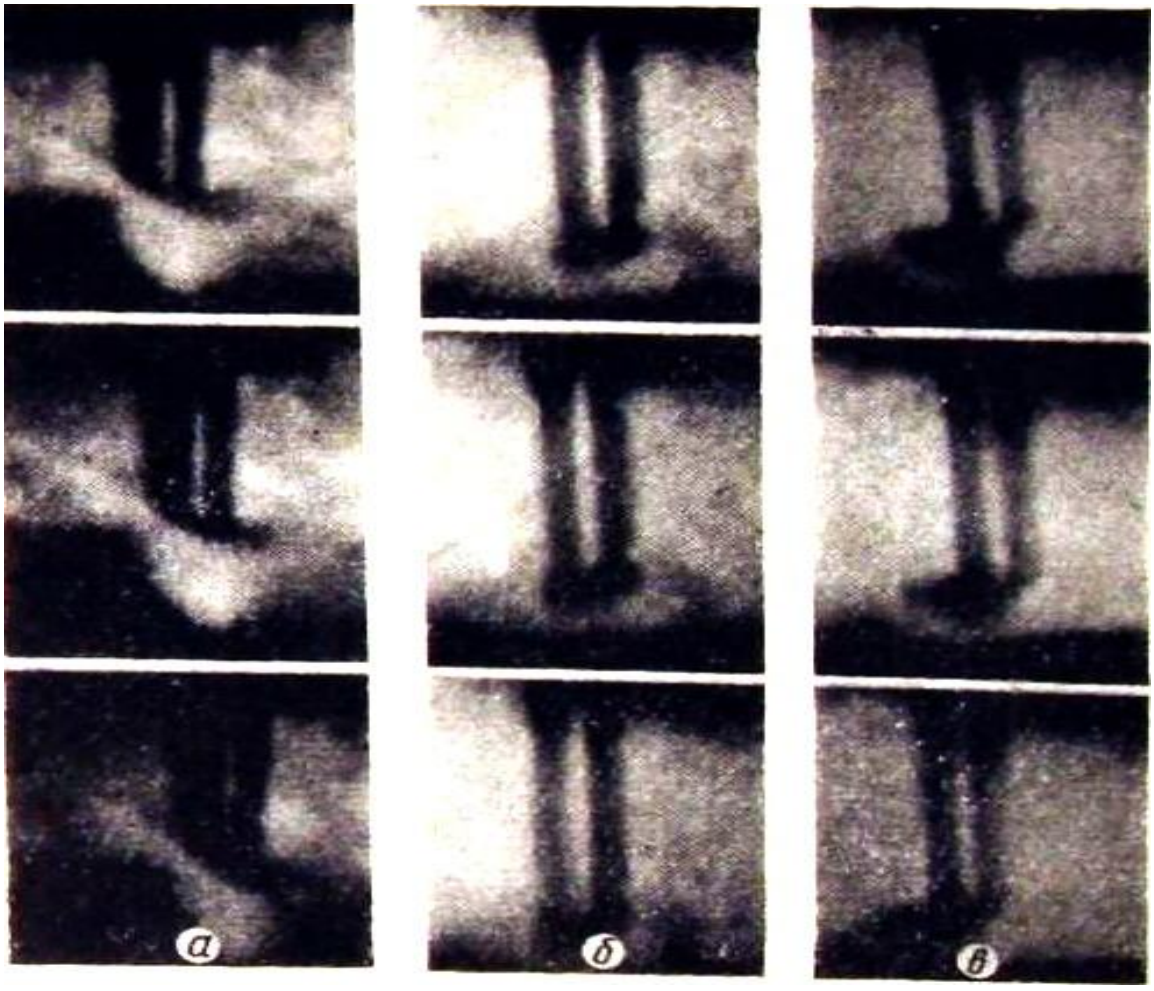


Рис. 13. Процесс переноса металла: а—сварка на обратной полярности (ICB=620 а, UД=36,8 в), конец электрода заострен; б - сварка на обратной полярности (ICB=680 а, UД=40,5 в), бесформенная капля средних размеров; в - сварка на прямой полярности (ICB=480 а, UД=41 в), крупная капля, вытесненная на боковую поверхность электрода.

При сварке на обратной полярности короткой дугой (низкое напряжение на дуге) столб дуги несколько наклонен вперед по направлению процесса либо расположен вертикально. Электрод заострен со стороны, противоположной направлению сварки (рис.13,а), а не с передней стороны, как указывалось в работах [36, 39].

При соприкосновении капли, которая находится на торце электрода со шлаком она увеличивается в размере и после контакта стекает в сварочную ванну. Перетекание (перелет) капель идет без соприкосновения со столбом дуги в шлак, и часто наблюдается, что капли летят внутри пространства, ограниченного флюсовым пузырем. При удлинении дуги (рис.13, б, в) столб

выравнивается, торец электрода приобретает более округлые формы, что можно объяснить большим блужданием пятна по поверхности электрода.

Изменение формы капли в зависимости от длины дуги схематически изображено на рис. 13. Равнодействующая силы $p_д$ и силы тяжести G—R способствуют отрыву капли в большей мере при короткой дуге, поскольку отрыв со сдвигом по касательной происходит значительно легче, чем по нормали к границе расплавления.

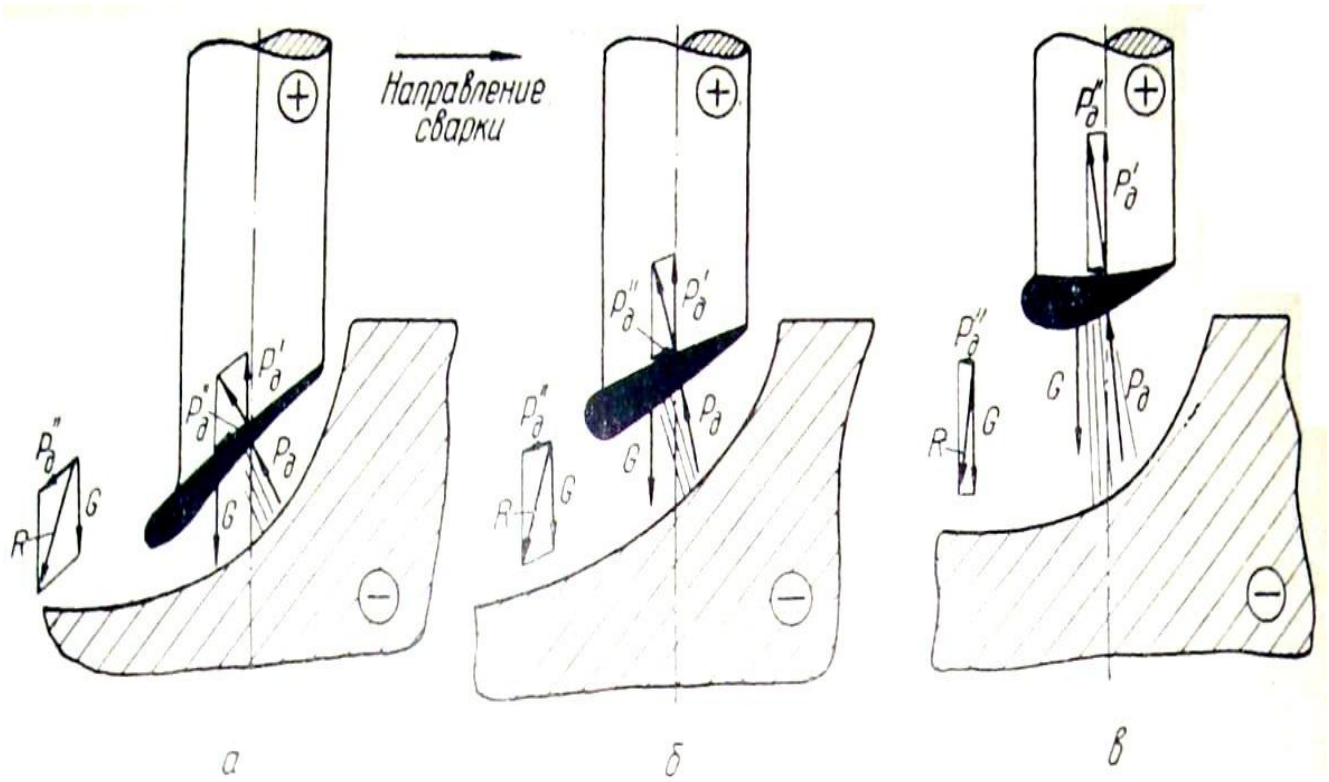


Рис.14. Форма конца электрода при сварке на обратной полярности: а - короткая дуга; б. в —длинная дуга; С —сила тяжести; рл — реактивное давление паров и давление газовых потоков; p' — осевая составляющая; Р — тангенциальная составляющая; R — равнодействующая

Если сварка ведется на очень больших токах, то в этом случае дуговой промежуток будет очень маленький. Тогда сварочная ванна, находящаяся в движении, будет как бы цеплять капельки металла, которые находятся на конце электрода, что не позволит им увеличиваться в размере. Бывает, когда металл с проволоки переходит в сварочную ванну и не формирует отдельные капли.

При сварке на прямой полярности конец электрода не заостряется. Капля на торце электрода сильно деформируется и вытесняется иногда на его боковую

поверхность. При больших силах тока имеет место подъем сварочной ванны и захват капель электродного металла. По-видимому, при сварке на прямой полярности в значительно большей степени проявляется действие потоков газов и паров, способствующих удержанию капли на торце электрода. В ряде случаев наблюдалось возвращение оторвавшихся капель обратно на электрод. Преимущественное направление потока частиц материала электродов в зависимости от полярности и величины силы тока для дуг, горящих на воздухе и в защитных газах, наблюдали И. Д. Кулагин и А. В. Николаев [42].

Размеры капель, время существования их на торце электрода и характер переноса зависят от факторов, основными из которых являются: электромагнитные и электродинамические силы; межфазное натяжение на границе металл — шлак, металл — газ; давление газовых потоков из ванны, реактивное давление паров и газов [7]. В различных условиях сварки действие тех или иных сил становится преобладающим. В зависимости от направления и величины равнодействующей сил изменяются размеры капель и характер переноса. Режим сварки, полярность и род тока, состав флюса и проволоки существенно влияют на соотношение этих сил…».

2.3. Применение различных схем расчета температурного поля при сварке

Учитывая сложность процессов при формировании сварочного пула все более интенсивно используются экспериментальные методы расчета для тепловых расчетов. Суть этих методов заключается в том, что, основываясь на результатах измерений температуры в корпусе сварки, благодаря использованию любой математической модели предсказывают другие результаты в интересующей области. Можно выделить, использование эквивалентных источников тепла [11]. Формулировка эквивалентного источника тепла не является хорошей идеей, поскольку предполагается, что оно должно дать адекватное описание температурного поля в широкой области, но все же доказать это крайне трудно. Целесообразнее назвать этот подход

методом сокращения математической модели на основе имеющихся экспериментальных данных [12]. Поскольку математическая модель не может быть абсолютно правдивой, процедуры ее сокращения универсальны. То есть независимо от того, насколько сложным и приближенным к действительности не была данная модель, ее нужно перепроверить с помощью метода сокращения.

В связи с этим возникло четкое видение плодотворной мощности сварочного источника тепла. Если раньше эффективная мощность понималась как мощность, вводимая в сварной продукт, теперь предлагается не включать в нее так называемые силы увлечения [13]. Одной из разновидностей улавливающей способности является передача тепла с поверхности изделия. Процесс сварки обычно происходит в устойчивом состоянии тепла, когда теплопередача с поверхности остается практически неизменной. Вот почему это можно объяснить потерей увлечения и не учитывать в эффективную мощность сварочного источника тепла.

Способ восстановления, в основе которого лежит измерение температуры в продукте, делает невозможным учет переноса тепла с поверхности продукта в расчетах.

Определены показатели эффективности сварочного процесса, для которого было исследовано температурное поле в [11]. Временной H = 9,5 мм дает $V_{св}$= 0,67см/с, J = 0,67•0,95 = 0,64 см^2/с». Эффективная мощность дуги с эффективностью 0,9 q и = 19,8 кВт. Тогда E = 19,8 / 0,64 = 31 кДж / см2 одного прохода. Эти затраты на энергию близки к тем, которые перечислены в таблице 12 данных для двухсторонней сварки. Площадь проникновения основного металла с шириной шва 20 мм может быть оценена как площадь полуэллипса

F_o = 3,145•10•9,5/2=149 мм^2».

Тогда f=0,64/1,49=0,43 Гц.

где f – частота сварки

Где f представляет, что за одну секунду образуется соединение площадью равная 0,43 поперечного разреза проплавления основного металла.

Bcp = Fo/H =149/9,5=15,7 мм.

где Bср - средняя ширина шва

$g=Bср\cdot\rho=1,57\cdot7,8= 12,25$ г/см^2.

где g - удельный расход расплавленного основного металла

$\alpha o = Mo/Iд\cdot t = Fo\cdot Vc\cdot\rho/Iд = 0,0109$ г/(А·с) = 39,26 г/(А·ч).

где αо- Коэффициент расплавления основного металла

Необходимость использования приведенных выше коэффициентов обоснована в [34].

Следовательно, коэффициент плавления основного металла в этом случае намного выше, чем аналогичный коэффициент для стержневого электрода. В [6] это объясняется незначительным теплосодержанием металла сварного шва, если его сопоставить с теплосодержанием капель электрода.

В [11] данные о подачи проволоки, то есть ее скорости не приведены, но для сварочного тока и испускания электрода его можно рассчитать по формуле (2). Получен общий коэффициент плавления αр = 14,79 г/(А·ч). Этот коэффициент соответствует скорости подачи электрода V_e = 3см/с. Площадь поперечного сечения металла сварного шва определяется в предположении, что нет потерь паров и без разбрызгивания. Тогда FH = 0,56 см^2. Доля участия основного металла в металле сварного шва была равна 1,49/(1,49+0,56)=0,73. Тепловая эффективность процесса сварки, определяемая при теплосодержании металла сварочных ванн H = 7800 Дж / (см3 • С), а эффективная эффективность ηi = 0,9 равна ητ = 0,379.

Альтернативным источником тепла в этой работе первоначально был использован нормально круговой источник на поверхности плоского слоя, адекватность его применения в широком диапазоне режимов и условий сварки, применяемых к аргонодуговой сварке не расходуемых электродные стыковые соединения без режущей кромки показаны в [10].

Совпадение расчетных и экспериментальных результатов было получено с мощностью распределенного источника 19 кВт, что, с учетом эффективной эффективности, близко к мощности полуэлипсидского источника. Максимальное проникновение происходит при координате X источника x = -2

... 3 см. Также нам важно получить совпадение величины B, где B - ширина шва. Данная величина должна получиться равной 20,1 мм, то есть B =0,21 мм.

Если проводить расчеты полу бесконечного тела, но которое имеет ограниченную скорость движения, причем рассматривать его как точечный источники в соответствии с методикой приведенной в [17]. Мы получаем, что значение проникновения 9,65 мм, что почти совпадает с экспериментально доказанным 9,5 мм. Если радиус изотермы равен 500 ° C для точечного источника составлял 31,3 мм, что близко к значению, полученному в [11]. Анализ данных для расчетных схем расчета приведены в таблице. 8.

Таблица 8. Данные параметров сварки и шва по разным расчетным схемам

Параметр	Опыт	Эквивалентный	Точечный	Нормально круговой источник
Мощность, кВт	22	20	19	19
Провар, мм	9,5	9	9,65	9,68
Ширина шва, мм	20,0	20	19,3	20,1
Ширина зоны 500 ºС, мм	30	30	31,3	36,5
Длина зоны 500 ºС, мм	335	335	180	190
Время 850-500 (ºС)	0	30	0	6
ΔT1 z =16 мм, y=0,	650	690	566	1108
ΔT2 z =16 мм, y=15 мм,	470	460	303	618
ΔT3 z= 0 y=19 мм	340	350	403	498
T4 z= 0 y=33 мм	250	230	134	171

Примечания: 1) Приведены значения максимальных температур в точках замера; 2) z=0 – лицевая поверхность установки термопар, z= 16 мм – обратная сторона установки термопар; 3) Время охлаждения от 850-500 ºС определялось при z=1,6см, y=0 см

При сравнении температур в точках экспериментальных измерений тепловых циклов с расчетными нами приходилось учитывать, что только небольшая часть циклов была удалена во время процесса наплавки и более значительна после выключения дуги. Температура начала увеличиваться уже после 40 секунд после того, как начали сварку, т. е. получается дуга проходила приблизительно 270 мм с длиной образца 450 мм. Поэтому значения температуры выбирались для времени 60 секунд, т. е. в разрезе образца на пластине на расстоянии 134 мм после оси дуги. Температура пластины в начале опыта была 50 градусов. Эта цифра учитывалась (значение вычиталось из значений, показанных на графиках). В расчетах для разных моделей также определялся прирост температуры.

Вычисленные параметры для двух классических схем (точечного и нормального) достаточно близки друг к другу. Между результатами по схеме NCI и эквивалентным источником несоответствия в температурах достигает десятков процентов.

Отметим то, что коэффициент поверхностного теплоотдачи, полученный в [11] и равный 0,025 Вт / (см2 ºС), кажется слишком большим. Сформулировав уравнение баланса, следует, что при такой величине средняя разность температур между листами и окружающей средой во время эксперимента или расчета должна составлять приблизительно 50 градусов. В то же время, при средних температурах, это различие составляет около 200 градусов.

Разность температур с использованием классических схем и полу эллипсоидального источника тепла объясняется крайне маленькой сосредоточенностью энергии в данном эквивалентном источнике. Объем полу эллипсоида с источником тепла будет равен 2 см³. При источнике мощности 19 кВт мы имеем среднее теплосодержание, находящееся в самой стали внутри источника 9500 Дж/см3. Теплосодержание стали при температуре плавления 7800 Дж/см3. Следовательно видно, что перегрев металла в источнике составляет 1,22, можно сделать вывод приводит, что мы не учитываем влияние температуры вне зоны сварочной ванны.

Отсюда следует, введение источника тепла в виде полу эллипсоида с геометрическими характеристиками проникновения еще недостаточно обосновано для нахождения температурных границ вне этого источника. При включении заданных источников тепла и замере их характеристик по размеру повара нет необходимости учитывать перенос тепла с поверхности металла в растворе, поскольку его действие уже учтено при уменьшении размера шва. В качестве математической модели, для которой может быть использован метод источника тепла, вполне приемлема классическая схема нормально кругового источника на поверхности плоского слоя, его параметры определяются шириной шва и проварки.

2.4. Расчет эквивалентных эффективных мощностей в зависимости от полярности дуги

Чтобы создать компьютерную программу для расчета параметров дуговой подпиточной сварки, необходимо провести оценку пробоя основного металла в зависимости от полярности дуги. Трудности создания такой модели включают неопределенность параметров концентрации таких источников тепла. Для их целей информации недостаточно. Другой трудностью является необходимость учета погружения дуги в сварочный бассейн. Хотя аналогичные модели уже были исследованы для сварки не расходуемыми электродами и также возможны для сварки расходуемым электродом.

Для этого были рассмотрены коэффициенты пропорциональности между токами и проварами на прямой и обратной полярностях при постоянном токе, приведенные в работе [2], с помощью расчета и сравнения их. Эти данные объективны для способа 2-х сторонней сварки пластин. Результаты приведены в табл. 9 [7].

Таблица 9. Соотношение коэффициентов эмпирических пропорциональностей между током и проваром

Диаметр сварочногоэлектрода, мм	Ко/К~	Кп/К~	Ко/Кп
Флюс ОСЦ-45			
2	1,116	0,885	1,261
3	1,130	0,826	1,368
4	1,095	0,81	1,353
5	1,158	0,789	1,47
Среднее для ОСЦ-45	1,125	0,828	1,363
Флюс АН-348А			
2	1,12	0,92	1,217
3	1,136	0,864	1,316
4	1,1	0,9	1,22
5	1,105	0,895	1,235
Среднее для АН-348А	1,115	0,895	1,247
Среднее для 2-х флюсов	1,12	0,862	1,305

Примечание:

Ко/К~ - соотношение проваров на обратной полярности и переменном токе;

Кп/К~ тоже для прямой полярности;

Ко/Кп – соотношение проваров на обратной и прямой полярности.

Следовательно, не с обратной полярности постоянном токе снабжается провар в среднем больше на 30%, чем на прямой полярности постоянном токе. Примерно подобное соотношение должна обеспечить методика расчета провара для прямой и обратной полярностей.

Для реализации возможно предложен, следующее решение. Зная, что вольтов эквивалент результативной анодной мощности, обусловленный по

коэффициенту плавления сварочного электрода при нулевом вылете почти равен Uэа = 6 Вт/А и не зависит от тока [21]. Наряду не начальный вольтовой эквивалент приэлектродных областей дуги составляет примерно 22 ВТ/А и определяется как сумма приэлектродных потерь напряжения [3].

Данная сумма довольно легко находится с помощью эксперимента К/З дуги. Таким образом, вольтовой эквивалент катодной области принимается равным Uэк= 16 Вт/А. Если предположить, что изделию дается 100% мощности его приэлектродной области. Соответственно часть силы, вводимая другими областями, должна вычисляться на основе данных, полученных опытным путем. Теоретически можно предположить, что эта часть должна быть равной и не зависеть от полярности дуги. В итоге были получены формулы для определения вольтового эквивалента приведенной эффективной мощности дуги под флюсом.

На обратной полярности

$$Uo = Uэк + \varphi\,(Uд - Uэк). \qquad (13)$$

На прямой полярности

$$Uпр = Uэар + \varphi(Uд\text{-}р + Uэа)Uп \qquad (14)$$

Коэффициент φ оценивается на основе экспериментальных данных. Результаты вычислений эффективных мощностей и их отношений при φ = 0,4 приведены в таблице 10.

Таблица 10. Расчетные соотношения эффективных мощностей прямой (ПП) и обратной (ОП) полярностей

d, мм	Iд, А	Полярность	qи, кВт	qo/qп
2	300	ОП	6,55	1,38
ПП		4,75		
3	500	ОП	8,89	1,37
ПП		6,49		
4	700	ОП	17,22	1,32

ПП		13,02		
5	900	ОП	23,08	1,31
ПП		17,68		

Из таблицы 10 следует, что этот подход полностью работоспособен, отношение эффективных мощностей соответствует отношению проникновений для двусторонней сварки пластин. Для последующего уточнения метода нужна математическая модель проникновения изделия в двухстороннюю сварку. Коэффициент φ показывает, что компонент мощности от электродного металла влияет на дайджест в 2,5 раза меньше мощности приэлектродных областей. Это близко к отношениям, полученным в [5], на основе другого подхода.

Можно сделать вывод, что провар от дуги при автоматической сварке под флюсом на постоянном токе полярности обратной будет больше на 30%, чем на постоянном токе полярности прямой. Можно взять один из способов расчета части эффективной мощности, вводимой в металл приэлектродной областью по вольтовым эквивалентам электрода, дающий возможность учесть в разнице проваров при сварке на прямой полярности постоянным током или на обратной полярности постоянным током.

Эффективность полной мощности электродных капелек и дуговой колонны, которая дает удовлетворительное соответствие между отношением экспериментальных значений проникновений и эффективных мощностей, составляет около 40%. С помощью этой методики можно рассчитать кулинарию и температуру во время сварки с использованием точечной схемы источника тепла на поверхности плоского слоя.

Глава 3. Особенности формирования шва при двухсторонней дуговой сварки под слоем флюса системой AGW

3.1 Оборудование применяемое при двусторонней сварке

Рис.15 Источник питания IDIALARC DC-1000

НОМИНАЛЬНЫЙ СЕТЕВОЙ ТОК – ТОЛЬКО ТРЕХФАЗНАЯ СЕТЬ!		
Стандартное напряжение	**Выходной ток**	
230 / 460/ 575	193 / 96.5/ 77	
ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ		
ПВ %	**Сварочное напряжение, В**	**Ток, А**
100%	44	1000
60%	44	1140
55%	44	1250
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ		
Выходная характеристика	Диапазон сварочного тока	Макс. напряжение холостого хода	Вспомогательное питание
Падающая	140A - 1250A	75 В постоянного тока	115 В переменного тока, 8 А
Жесткая	140A - 1250A		
Жесткая (с дополнительным выходом 500A)	140A - 625 A		

Рис.16 Спецификация IDEALARC-1000

Основными величинами автоматизированной дуговой сварки плавящимся электродом являются:

1. Сварочный ток Ic (~40...600 А);
2. Напряжение сварки Uc (~16...40 В)
3. Скорость сварки Vc (~4...2О мм/с), (~14,4...72 м/ч);
4. Диаметр электродной проволоки dn (~0,8...2,5 мм);
5. Длина вылета электродной проволоки Lв (~8...25 мм);
6. Скорость подачи электродной проволоки Vп (~35...25О мм/с), (~126...960 м/ч);
7. Подвод к дуге электрической энергии и еѐ регулирование (Ic, Uc);

- Перемещение горелки со скоростью сварки (Vc) и еѐ регулирование;
- Подача электродной проволоки (Vn) в зону сварки и регулирование еѐ скорости;
- Установка вылета электродной проволоки и корректирующие перемещения горелки;
- Возбуждение дуги и заварка кратера; автоматическое слежение по линии сварки и др.

При пуске сварочного аппарата схема управления должна обеспечивать такую последовательность включения частей и механизмов оборудования:

1) включение источника питания дуги (U);
2) подачу электродной проволоки (Vэп);
3) возбуждение дуги (Ic, Uc);
4) перемещение аппарата со скоростью сварки (Vc), то есть:

Qг–>U–>Vп–>IcUc–>Vc. (15)

В конце сварки последовательность выключения механизма должна обеспечивать сварку кратера и защиту остывающего шва:

Vc–> Vn–> Ic–> Uc–> U–> qг (16)

Обоснование выбора сварочной системы Lincoln Power Wave AC/DC 1000.

Power Wave® AC/DC 1000 - инвертор, оснащенный цифровой системой управления, которая предоставляет возможность построения различных эпюр переменного и постоянного сварочного тока без необходимости изменения аппаратной конфигурации. Изменение полярности сварки, переключение на другой диапазон входного напряжения или передача данных по шинам связи при изменении параметров - все эти операции осуществляются без переключения кабелей. Возможность регулирования следующих параметров:

Падающая или жесткая ВАХ

Прямоугольная или синусоидальная форма токовой кривой

Широта регулировки частоты от 10 до 100 Гц

Регулировка баланса, то есть отношение длительности положительного и отрицательного полупериода волны.

Смещение нулевой точки токовой кривой для изменения амплитуды отрицательного или положительного полупериода волны

Оптимизированная процедура зажигания дуги, исключающая нестабильность дуги при работе на переменном тока, а также на постоянном токе отрицательной полярности.

Регулировка сдвига фаз между дугами (до четырех дуг стандартно) во всем диапазоне от 0* до 359°.

Цифровая связь между блоком управления, сварочным источником и механизмом подачи проволоки.

Преимущество прямоугольной формы волны становится очевидным при регулировке частоты.

- Источник POWER WAVE AC/DC 1000 вырабатывает переменный сварочный ток с частотой 10 – 100 Гц.
- Регулировка частоты используется для обеспечения стабильности дуги.
- В многодуговых сварочных системах повышение частоты ведёт к снижению взаимовлияния дуг.

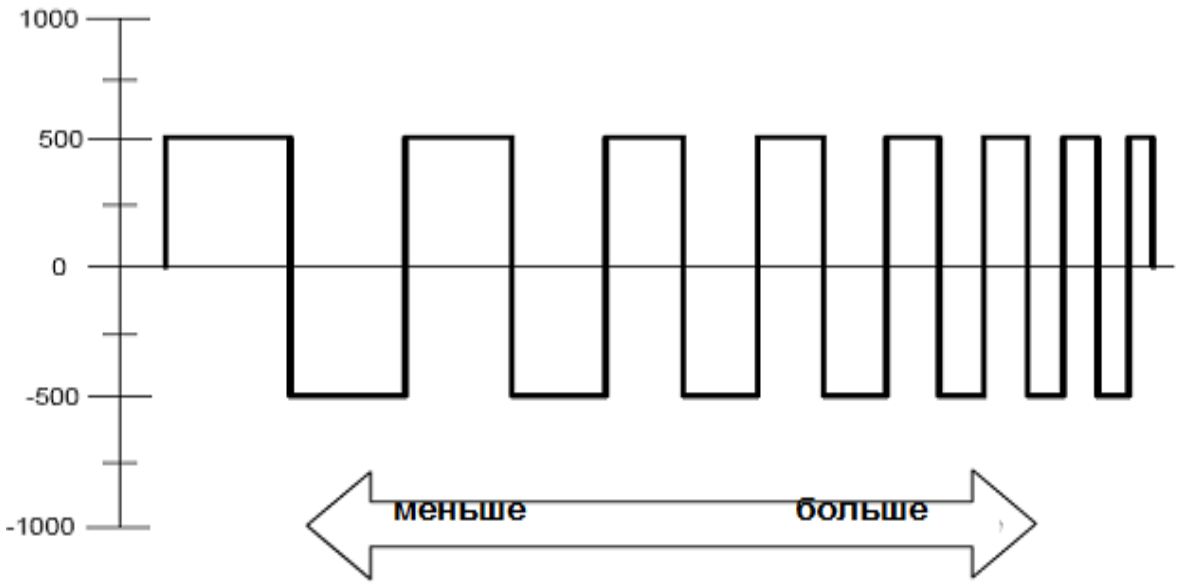


Рис.17 Регулировка частоты.

По ходу изменения частоты волны переменного тока меняется продолжительность около максимальных значений, а также длительность перехода с одной полярности на другую. При этом волна прямоугольной формы обладает преимуществами по сравнению с синусоидальной. Однако, чем больше площадь на графике под волной, тем более высокая энергия, полученная дугой. От этого напрямую зависит коэффициент наплавки, глубина плавления и устойчивость дуги. На практике регулировка частоты переменного тока служит для изменений формы зоны проплавления при изготовлении угловых или стыковых сварочных швов, а также при сварке тонколистового металла.

Система AGW-II представляет собой раму. Одна из сторон рамы (основной) полностью автономна и может использоваться для сварки. Другая сторона (опционально) поставляется с креплением на первичной стороне, они образуют настройку для двухсторонней сварки. Вертикальные телескопические элементы опорной рамы имеют настройку для ручного изменения и формирования их длины. Для перемещения основной рамы предусмотрены два колеса из закаленной стали, они имеют два гребня и гофрированную опорную поверхность. Две части рамы, первичная и вторичная заключены перилами на

платформе, на которой стоит оператор и съемная скамья для него. Таким образом, эта технология позволяет улучшать условия труда, уменьшить время сборки и сварки резервуара, чтобы повысить качество продукта (рисунок 10).

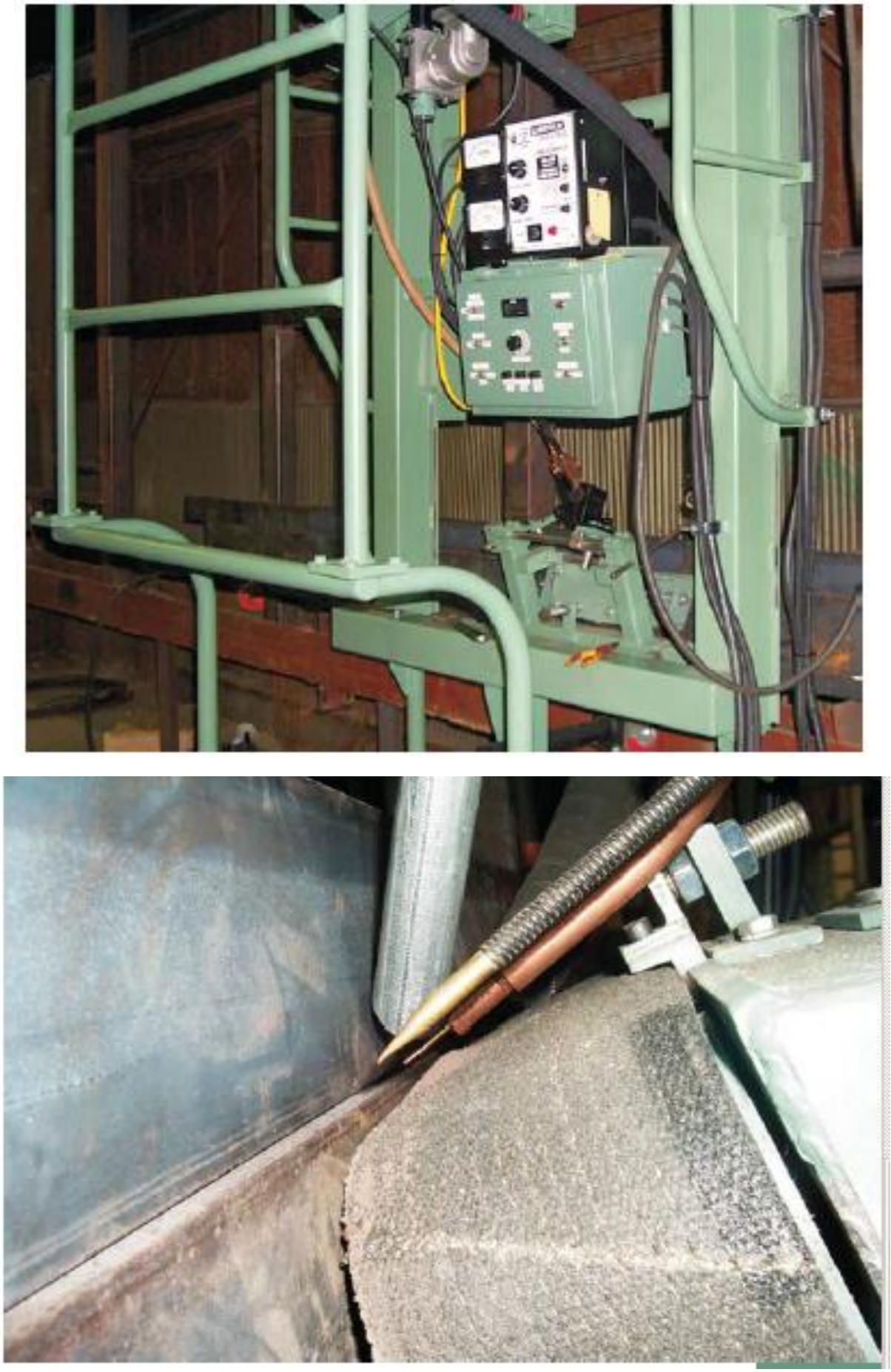


Рис.18 Установка для автоматического дугового под флюсового сваривания AGW-II

Процесс монтажа резервуара начинается с распределения выемок и днища резервуара, монтаж ведется по листовому способу. После процесса монтажа «каркаса» резервуара производится сборка и сварка стен резервуара. Сборка стены происходит на листах-замках, внутренняя поверхность листов выровнена по вертикали, при сварке стены первоочерёдно выполняют вертикальные швы механизированной сваркой проволокой сплошного сечения в среде защитных газов согласно ГОСТ 14771-76.

Во время сборки явление разницы проникновения соотношения полярности дуги, объясняется разной концентрацией мощности, выделяемой изделием в переходную зону между дугой и жидким металлом из электрода. При расчете необходимо учитывать разницу провинций, используя разную концентрацию теплового потока источника тепла.

Сварка в углекислом газе с помощью расходуемого электрода осуществляется дугой с обратной полярностью. Сила плавления дуги с обратной полярностью больше, чем при сварке неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона. Согласно ГОСТ-14771 [29], с обеих сторон предусмотрена сварка листа толщиной менее 6 мм. При сварке расходуемым электродом толщина свариемого листа не более 12 мм.

Исходные данные:

- плотность металла ρ = 7,8 г/см3;
- толщина свариваемого металла S = 16 мм;
- удельное электросопротивление ρ0 = 14•10-6Ом•см;
- коэффициент температурапроводности, а = 0,08 см2/с;
- температурный коэфф. эл. сопротивления а = 0,0083 °С-1
- удельная теплоемкость С = 0,67 Дж/г°С;
- температура плавления сварочного электрода Тпл = 1520 °С;
- начальная температура сварочного электрода Т0 = 20 °С;
- количество теплоты, необходимое для расплавления 1 г электродной проволоки qэ= 2100Дж/г;

- эффективный КПД ηи = 0,8;

- Катет шва К=14 мм;

- максимальный зазор в стыке Вмах = 1,5 мм;

- минимальный зазор в стыке Bmin = 0 мм;

- диаметр сварочной проволоки D = 1,6 мм;

- вылет сварочной проволоки h = 14 мм;

- максимальный сварочный ток Iмах = 340А;

- минимальный сварочный ток Imin = 100 А;

- шаг изменения сварочного тока ΔI =10 А;

- род сварочного тока RT = 1 - постоянный, обратной полярности;

Сварка выполняется в углекислом газе на постоянном токе, обратной полярности, плавящейся сварочная проволока Св-08А.

Стыковой шов. Площадь наплавленного металла:

$$F_н = F_в + F_з + F_р = e \cdot g \cdot \mu_в + s \cdot b + f^2 \cdot tg\frac{\alpha}{2} =$$
$$= 10 \cdot 1 \cdot 0.73 + 10 \cdot 1 + 81 \cdot 0.176 = 31.56 мм^2$$

1.3. Сварочный ток:

$$I_{св} = \frac{\pi \cdot d_{эл}^2}{4} \cdot j_{доп} = \frac{3{,}14 \cdot 1{,}6^2}{4} \cdot 150 = 301{,}59\ А$$

Где Jдоп= 150 А/мм^2

Скорость сварки:

$$V_{св} = \frac{\alpha_н \cdot I_{св}}{\rho \cdot F_н} = \frac{10{,}47 \cdot 301{,}59}{7{,}8 \cdot 31{,}56} = 9{,}82\frac{м}{ч} = 0{,}16\frac{см}{с}$$

Где $\alpha_н$ -коэффициент наплавки; ρ-плотность металла ;

Iсв - сварочный ток;

Fн - площадь наплавленного металла.

Коэффициент наплавки металла:

$$\alpha_{\text{н}} = \alpha_{\text{р}} \cdot \left(1 - \frac{\psi}{100}\right) \tag{16}$$

Где: $\alpha_{\text{р}} = \alpha_{\text{р}}^{\cdot} + \Delta\alpha_{\text{р}}$

$\alpha_{\text{р}}$- Коэффициент расплавления:

$$\alpha_{\text{р}}^{\cdot} = 11{,}6 \pm 0{,}4 \frac{\Г}{\text{А} \cdot \text{ч}}$$

$$\Delta\alpha_{\text{р}} = \frac{3600 \cdot Q_{nn}}{q_{\text{э}} \cdot I_{\text{св}}}$$

Учитывая перспективность данной методики, были выполнены расчеты для двухсторонней сварки проволокой сплошного сечения в среде углекислого газа с толщиной пластин 6,0 мм. Режимы дуговой сварки с обратной полярностью взяты из [6]. Диаметр сварочной проволоки 1,6 мм, ток 280-300 А, напряжение дуги 28-30 В, скорость сварки 30-34 м/ч. Полная мощность дуги Pd=8410Вт.

Доверие с этим методом, как правило, равно 60% от толщины. Таким образом, при заданной толщине приблизительный прогар составляет 3,6 мм. При расчете эффективной мощности сварочной дуги брали КПД дуги ηи=0,8. Эффективная мощность дуги

$$q_{\text{н}} = 8410 \cdot 0{,}8 = 6728 \text{ Вт}$$

Эффективная мощность дуги при сварке плавящимся электродом определена посредством суммы напряжений и мощности, поглощаемой излучаемым электродом. Мощность, поглощенная излучаемым электродом, отличается для обратной и прямой полярностей дуги.

$$I_{\text{св}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{эл}}^2}{4} \cdot j_{\text{доп}} = \frac{3{,}14 \cdot 1{,}6^2}{4} \cdot 150 = 301{,}59 \text{ А},$$

где jдоп= 150А/мм^2

Скорость сварки:

$$V_{\text{св}} = \frac{\alpha_{\text{св}} \cdot I_{\text{св}}}{\rho \cdot F_{\text{н}}} = \frac{10{,}47 \cdot 301{,}59}{7{,}8 \cdot 31{,}56} = 9{,}82 \frac{\text{м}}{\text{ч}} = 0{,}16 \frac{\text{см}}{\text{с}}$$

где $\alpha_{\text{н}}$– коэффициент наплавки;

ρ– плотность металла;

Iсв – сварочный ток;

Fн - площадь наплавленного металла.

Коэффициент наплавки металла:

$$\alpha_{\text{н}} = \alpha_{\text{р}} \cdot \left(1 - \frac{\psi}{100}\right) \tag{16}$$

Где: $\alpha_{\text{р}} = \alpha_{\text{р}}^{\cdot} + \Delta\alpha_{\text{р}}$

$\alpha_{\text{р}}$ – коэффициент расплавления:

$$\alpha_{\text{р}}^{\cdot} = 11{,}6 \pm 0{,}4 \frac{\Gamma}{\text{А} \cdot \text{ч}}$$

$$\Delta\alpha_{\text{р}} = \frac{3600 \cdot Q_{nn}}{q_{\text{э}} \cdot I_{\text{св}}}$$

Произведенные расчеты указывают на то, что температура находится в зависимости: от сварки плавящимся электродом, полярности дуги и определяться с использованием источников тепла с разными значениями осевого теплового потока.

3.2 Метод расчета провара при дуговом под флюсовом сваривании с помощью эмпирических формул

При сварке конкретной марки стали провар зависит от сравнительно небольшого количества факторов. Если рассматривать двустороннюю сварку стыковых соединений без разделки свариваемых кромок, то можно принять, что для любой толщины провар должен составлять 0,6 от свариваемой толщины. при этом всегда необходимая для сварки эффективная мощность будет зависеть от этой толщины. Другим важнейшим параметром процесса является скорость сварки Vc. Большое влияние на провар, как это следует из

анализа в главе 1, оказывает диаметр электродной проволоки. Однако учет роли диаметра выполним позже.

Зададим зависимость эффективной мощности от параметров процесса в виде функции qи = A(Vcδ)n, где δ – толщина соединяемых пластин, см; - А и – коэффициенты, которые должны определяться на основе экспериментов. Выражение в скобках формулы (1) есть скорость образования соединения. Она может служить ориентиром для расчета эффективной мощности.

Поскольку формула содержит два неизвестных коэффициента, то необходимо проведение двух независимых опытов и составление на их основе системы двух уравнений.

Воспользуемся для получения коэффициентов в формуле (24) опытными данными работ [4, 11]. Эти данные относятся к сварке дугой обратной полярности. Вопрос использования этих данных для сварки разно полярными импульсами тока рассмотрим дальше. В выбранных работах диаметр сварочного электрода был одинаков и составлял 4 мм. при выборе опыта из работы [4] рассматривались режимы, обеспечивающие провар 60% от толщины пластины. Так как на максимальном токе 650 А провар составлял 5,8 мм, выполняли аппроксимацию опытных данных по проварам, приведенным в табл. 4. В результате получили ток, обеспечивающий провар 7,2 мм Iд = 750А. Коэффициент полезного действия дуги при расчетах эффективной мощности принимали 0,9. Для решения системы уравнений использовали компьютерную программу аппроксимации степенной функции, приведенной в работе [10]. Данные опытов и результаты определения коэффициентов сведем в таблицу11.

Таблица 11. Результаты расчета коэффициентов А и n

δ,см	Vc, см/с	qи, кВт	H,мм	A	N
1,6	0,67	19,8	9,5	17,62	1,68
1,2	0,83	17,5	7,2		

По полученным коэффициентам рассчитывали значения необходимых мощностей при изменении параметра Vcδ (таблицы 12).

Таблица 12. Зависимость эффективной мощности от параметра Vcδ

Vcδ, см2/с	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1	1,2	1,3	1,5	2,0
qи, кВт	5,5	7,5	9,7	12,1	15,0	20,7	23,9	27,4	34,8	56,4

Данные табл. 12 показывают быстрый рост эффективной мощности с увеличением толщины пластин. Это приведет к необходимости снижать скорость сварки.

Обозначим Ко/Кп = β. при использовании дуги с разно полярными импульсами тока значение этого коэффициента необходимо корректировать по формуле

$$Кри = \beta\varepsilon + \beta(1-\varepsilon), \quad (17)$$

где Кри – коэффициент изменения эффективной мощности в зависимости от доли прямой полярности,

ε – доля полярности.

Для учета влияния диаметра сварочного электрода на провар также представим зависимость отношений коэффициента провара на обратной полярности от диаметра сварочного электрода в виде степенной функции

$$\beta = BDm, \quad (18)$$

где B и D– коэффициенты. Их значения определим отдельно для каждой марки флюса. Результаты определения приведены в таблице13.

Таблица 13. Коэффициенты зависимости β от диаметра электрода. Флюс ОСЦ-45.

	Значения β				
D, мм	2	3	4	5	Коэфиц.
Расчёт	1,261	1,368	1,353	1,47	B=1,143
Опыт	1,264	1,341	1,399	1,445	m=0,146

Сходимость опытных и аппроксимирующих значений высокая. В то же время зависимость проваров от диаметра сварочного электрода не столь велико. Для флюса АН-348А вообще оказалось, что зависимость практически отсутствует.

3.3 Методика расчета площади проплавления основного металла

Расчет площади проплавления основного металла при двухсторонней сварке можно выполнить, применяя следующий подход. Площадь проплавления можно определить, если известен термический КПД процесса.

$$Fo=q_и\eta_т/Vc\cdot\Delta Tl\cdot c\rho \qquad (18)$$

Известно, что термические КПД при сварке сравнительно мало зависят от схемы источника тепла и свариваемого тела. Наиболее высокие термические КПД имеют быстродвижущиеся источники тепла. Для линейного быстродвижущегося источника тепла в пластине $\eta_т=0,486$, для быстродвижущегося точечного на поверхности полу бесконечного тела $\eta_т=0,384$. Соотношение КПД составляет 1,266. Чем стеснённые условия распространения тепла, тем больше термический КПД. Максимальное значение термического КПД, равное 1 имеет место для плавящегося электрода, в котором вся выделяемая мощность расходуется на плавление основного металла.

При сварке пластины поверхностным источником тепла форма сечения шва напоминает параболу, а при действии линейного источника тепла в пластине сечение – прямоугольное. при погружении источника тепла в металл форма провара становится ближе к прямоугольной форме. при сварке тонкого металла зачастую форма провара близка к прямоугольной и применяется для расчетов схема линейного источника тепла. Предлагаемый подход заключается

в том, чтобы применить к частично погруженному в металл источнику тепла схему линейного источника, движущегося с ограниченной скоростью.

Методика предназначена для расчета при 2-х сторонней сварке стыковых соединений без разделки кромок. В этом случае должно иметь место проплавление на глубину примерно 60% от толщины пластин. Способ используется для сварки сравнительно больших пластин, поэтому ведется на больших токах при значительном давлении дуги. Дуга существенно погружается в сварочную ванну. В этом смысле источник можно считать линейным, погруженным не на всю толщину. С другой стороны, провар напоминает действие точечного источника на поверхности плоского слоя. Тогда площадь провара можно определить как среднюю от действия таких двух источников одинаковой мощности. Для линейного источника получим максимально возможную площадь при сварке пластин, поскольку источник действует в наиболее стесненных условиях. Наоборот, точечный источник даст наименьшую возможную площадь. Применим этот подход к данным работы [11].

Сварка велась на токе 712 А пластин 09Г2С толщиной 16 мм на обратной полярности дуги. Напряжение дуги 32 В. Скорость сварки составляла 0,67 см/с. Диаметр сварочного электрода 4 мм, вылет 25 мм. Провар 9,5 мм, ширина шва 20 мм. Теплофизические коэффициенты приводятся λ=0,32Вт/см^{o}С, теплоемкость $c\rho$=4,5 Дж/(см3 ^{o}С).

1. Определяем эффективную мощность дуги, приняв эффективный КПД $\eta_и$=0,9:

$$q_и = 712 \cdot 32 \cdot 0,9 = 20505 \text{ Вт.}$$

2. Определяем относительную температуру, приняв удельную эффективную мощность и расчетную температуру плавления 1500 ^{o}С.

$$\Theta = 2 \cdot 3,14159 \cdot 0,32 \cdot 1500/(20505/1,6) = 0,235.$$

3. По номограмме в работе [74] находим, безразмерную относительную полуширину шва 2.

4. Рассчитываем действительную полуширину шва.

Температурапроводность, а = 0,32/4,5 =0,071 см2/с.

В/2=2·0,071·2/0,67 =0,414 см = 4,14 мм.

Средняя ширина шва В= 8, 28 мм.

5. Площадь проплавления основного металла

$$Fол=8,28\cdot16= 132, 5 мм2.$$

6. Площадь эллипса с полушириной 10 мм и высотой 9,5 мм. Fэ =149 мм2 (эксперимент).

7. Определяем площадь (размеры) для точечного источника с помощью компьютерной программы Fр= 160 мм2. Следует отметить низкую точность определения площади сечения с помощью номограммы. Поэтому используем следующий прием. С помощью программы для расчета провара от точечного источника на поверхности полу бесконечного тела [20] с ограниченной скоростью определим термический КПД. Получили Fп=146 мм2, ηтп=0,325. Примем, что соотношение термических КПД для быстродвижущихся источников тепла сохранится и для движущихся с ограниченной скоростью. Тогда термический КПД для линейного источника тепла

$$ηтл = ηтп*1,266=0,327*1,266=0,41.$$

Определяем площадь провара от линейного источника

$$Fол = 20505*0,41/(0,67*1500*4,5)=186 мм2.$$

Площадь проплавления от источника с высокой сосредоточенностью на поверхности плоского слоя, рассчитанная с помощью компьютерной программы, уже приводилась выше

$$Fоп = 160 мм².$$

Находим искомую площадь сечения

$$F = (F_{ол} + F_{оп})/2 = (186+160)/2 = 173 \text{ мм}^2.$$

Площадь от распределенного источника на поверхности плоского слоя с нормальной распределенностью. Пример расчета.

Определим режим двухсторонней сварки стальных пластин толщиной 20 мм электродной сварочная проволока 3 мм под флюсом АН-348 А на прямой полярности дуги. Примем значение скорости сварки Vc =0,5 см/с – достаточно большое для такой толщины. Тогда произведение Vc·δ =2·0,5 =1,0 см2/с. По формуле (24) рассчитываем необходимую мощность обратной полярности дуги qип=17,62·11,68 = 17, 62 кДж.

Полная мощность дуги

Рд=17,62/0,9 =19,6 кВт.

Умножим напряжение из формулы (1) на ток дуги

Рд = 20Iд+0,05Iд2/dэ0,5.

Решение этого квадратного уравнения относительно тока дает Iд= 550 А.

Согласно табл. 14 отношение Ко/Кп =1,316 для диаметра 3 мм. Поэтому ток на прямой полярности необходимо увеличить до 1,316·550= 725 А.

Для сравнения выполним аналогичный расчет по методике, изложенной в работе [2].

Определяем сварочный ток. Коэффициент пропорциональности для обратной полярности при диаметре сварочного электрода 3 мм составляет 1,25 (флюс АН-348А). Тогда

$$I = 12 \cdot 100/1,25 = 960 \text{ А}.$$

Рассчитываем скорость сварки по формуле, рекомендуемой в (2)

$$Vc = A/I_д, \qquad (18)$$

где А –коэффициент, который для диаметра сварочного электрода 5 мм находится в пределах (20-25)·103 м/ч. Приняв А =22,5 получим Vc=22,5 м/ч= 0,63 см/с.

Рассчитываем напряжение дуги для диаметра сварочного электрода 5 мм.

Получаем Uд =47 В. Эффективная мощность дуги =47·1000·0,9 = 52,2 кВт.

Погонная энергия сварки qп= 82,9 кВт/см.

Рассчитываем параметры шва по формулам [2].

Из приведенных расчетов по двум методика видна значительная разница в результатах. Предлагаемая методика выглядит более логичной, так как в ней в расчетах задействована толщина свариваемых пластин. Несомненно, что новая методика работоспособна, однако для ее внедрения в инженерную практику необходима обработка большего количества экспериментальных данных по режимам двухсторонней сварки. при определенных экспериментах данная методика может использоваться и для проектирования параметров односторонних соединений.

Заключение

1. Формула для приращения коэффициента расплавления от нагрева вылета сварочного электрода при под флюсовой дуговой сварке, позволяющая уточнять проектируемые параметры – получена.

2. Учитывая влияние полярности дуги на провар и температурное поле, применяется схема нормально - кругового источника тепла находящийся в верхней части слоя с различными осевыми потоками.

3. Зависимость от сварочного провара тока дуги при двухсторонней под флюсовой дуговой сварке стыковых соединений возможно представить в виде функции в степени кубической для тока, как для прямой, так и для обратной полярностей. Что значительно сокращает объем экспериментальных исследований при отработке режимов дуговой сварки под слоем флюса.

4. Зависимость эффективной мощности источника тепла при двухсторонней под флюсовой дуговой сварке стыковых соединений от производительности образования соединения удовлетворительно описывается степенной функцией.

5. Получены формулы для расчета коэффициента расплавления сварочного электрода при любом соотношении полярностей в дуге.

6. Разработана методика осевых определений тепловых потоков для нормально-кругового источника тепла при дуговом под флюсовым свариванием по опытным значениям проваров.

7. Предложен подход к расчету сварочного тока при дуговой под флюсовой сварке по требуемой эффективной мощности дуги.

8. Разработана методика расчета режимов под флюсовой дуговой сварки и геометрических характеристик сварочного шва стыковых соединений без разделки кромок под флюсом дугой.

Таким образом, цель исследования достигнута, задачи – решены.

Библиографический список

1. Фролов, В.А. «Технология сварки плавлением и термической резки металлов» : учебное пособие.- М.: Альфа-М : ИНФРА-М, 2011. 448 с.
2. Акулов, А.И., «Технология и оборудование сварки плавлением» / А.И. Акулов, Г.А. Бельчук, В.П. Демянцевич. – М.: Машиностроение, 1977.- 432 с.
3. Лесков, Г.И. «Электрическая сварочная дуга» / Г.И. Лесков // М.: Машиностроение, 1970.- 335 с.
4. Коберник, Н.В. «Влияние рода и полярности тока на плавление электродного и основного металла при СПФ» Сварка и диагностика. 2011, № 5, С. 24-27.
5. Сидоров, В.П. «Влияние рода и полярности тока на плавление электродного и основного металла при СПФ» / Сварка и диагностика. 2013, № 3, С. 20-23.
6. Сидоров, В.П. «Вклад в проплавление изделия мощности электродного металла при СПФ».: Изд-во ТГУ, 2013 359 с. С. 232-239.
7. Сидоров, В.П. «Методика расчета составляющих эффективной мощности дуги под флюсом с учетом полярности тока» – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015.- С. 52-54.
8. «Оборудование для дуговой сварки: Справочное пособие» / Под ред. В.В. Смирнова. Л.: Энергоатомиздат // Ленинградское отделение. - 1986.-656 с.
9. Ерохин А.А. «Основы сварки плавлением». М.: Машиностроение, 1973, 448 с.
10. Сидоров, В.П. «Двухдуговая двусторонняя сварка неплавящимися сварочными электродами в аргоне»// изд-во ТГУ, 2015 .- 191 с.
11. Цвелев, Р.А. «Оценка погрешностей воспроизведения температурного поля при СПФ на основе эквивалентного источника теплоты» / Р.А. Цвелев // Сварочное производство, 2013, №. С.11-15.
12. Сидоров В.П. «Математическое моделирование геометрии шва при сварке конструкционных сплавов и биметаллов» / В.П. Сидоров, Д.А. Семистенов // Тольятти, ТГУ, 2009.- 175 с.

13. А.В. Коновалов «Теория сварочных процессов» / А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Макаров и др.// Под ред. В.М. Неровного - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.- 752 с.
14. Кархин, В.А. «Тепловые процессы при сварке» / В.А. Кархин - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015.-572 с.
15. Сидоров, В.П. «Моделирование провара при дуговой сварке стыковых соединений без разделки кромок» / В.П. Сидоров, С.А. Хурин // Сварка и диагностика, 2011, № 6, С.36-42.
16. Столбов В.И. «Распределение температуры при сварке глубоким проплавлением толстых листов из алюминиевых сплавов» / В.И. Столбов, В.А. Иевлев, Г.В. Осянкин, и др. // Физика и химия обработки материалов. - 1980. - № 6.- С.134-137.
17. Сидоров В.П. «Математическое моделирование проплавления металла при наплавке шва на массивное тело», Изд-во ТолПИ. - 1987.- 34 с.
18. Дьяконов, В.П. «Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ» / В.П. Дьяконов. - М.: Наука, 1987. - 240 с.
19. Ленивкин В.А. «Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах» / В.А. Ленивкин, Н.Г. Дюргеров, Х.Н. Сагиров. // Машиностроение, 1989.- 264 с.
20. Сидоров, В.П. «Математическое моделирование энергетических процессов сварки. Лабораторный практикум».: Изд-во ТГУ, 2014. - 193 с.
21. Сидоров, В.П. «Определение вольтова эквивалента анодной мощности по характеристикам плавления сварочного электрода»/ В.П. Сидоров, А.В. Бережко, Е.Е. Комаров // Сварка и контроль -2005: Матер. докл. 24-й НТК. - Челябинск, 2005.-С. 99-106.
22. Сидоров, В.П. «Влияние режимов сварки на проплавление при механизированной наплавке» / В.П. Сидоров, А.И. Ковтунов, С.А. Хурин // Сварочное производство, 2011, № 4, С. 3-6.
23. Сидоров, В.П. «Расчет доли участия основного металла в металле шва при наплавке под слоем флюса»– Кн.2. – Липецк: изд-во ЛГТУ, 2009.- С.112…116.

24. ГОСТ 8713-79. «Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы». М.: Изд-во стандартов, 1981.
25. Чирков В.Г. «Строительство магистральных трубопроводов». Справочник / Чирков В.Г., Березин В.Л., Телегин Л.П. и др. // Недра, 1991.
26. Сидоров, В.П. «О роли нагрева вылета в производительности расплавления сварочного электрода при сварке в CO2»/В.П. Сидоров, М.А. Абрамова // Сварка и диагностика: сборник докладов международного форума (Екатеринбург, 24-25 ноября 2015 г.), Екатеринбург: УрФУ. - 2015. - С. 16-21.
27. Рыкалин Н.Н. «Расчет термического цикла околошовной зоны по очертанию плоской сварочной ванны» /Рыкалин Н.Н., Бекетов А.И.// Сварочное производство, 1967, №9, с.22-25.
28. Березовский Б.М. «Расчёт параметров распределения теплового потока поверхностной сварочной дуги» / Березовский Б.М., Стихин В.А.// Свароч. пр-во. - 1980. - № 2. - С. 1-4.
29. ГОСТ 14771- «Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры». М.: Стандартинформ, 2007.
30. Сидоров В.П. «Расчет провара при сварке в CO2»/ В.П. Сидоров, М.А. Абрамова // Сварка и диагностика: сборник докладов международного форума (Екатеринбург, 24-25 ноября 2015 г.), Екатеринбург: УрФУ. - 2015. - С. 22-27.
31. Суворов, А.Ф. «Сварочно-монтажные работы в строительстве» / А.Ф. Суворов, Г.Г. Васильев, Ю.Г. Горяинов и др. // М.: ЗАО «Звезда, 2006ю- 240 с.
32. Сидоров, В.П. «Расчет температур при сварке в зависимости от полярности дуги»// Изд-во «Молодой ученый», Казань, 2015. – С. 51-54.
33. Сидоров, В.П. «Применение различных схем расчета температурного поля при сварке» / В.П. Сидоров, Д.Е. Корсун, М.А. Абрамова // Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015.- С. 45-47.

34. Сидоров В.П. «Двухдуговая двусторонняя сварка неплавящимися сварочными электродами в аргоне»: / В.П. Сидоров, С.А. Хурин. // Тольятти: Изд-во ТГУ, 201. – 191 с.
35. Патон Б.Е. О размере электродных капель при сварке под флюсом. «Автоматическая сварка» № 4,1950.
36. Институт электросварки им. Е.О. Патона, Автоматическая электродуговая сварка, Машинист 1953.
37. F.Udo, Vorgaiige in-der-Kaver-nebeim UP-Sch-weiqen 4InternationalesKolloquim,iMagdeburg1964.
38. В. И. Дятлов, Элементы теории переноса электродного металла при электродуговой сварке, сб. «Новые проблемы сварочной техники», Изд. «Техника» К.,1964.
39. П. Г. Гребельник, Рентгена исследование процесса автоматической сварки под флюсом, «Автоматическая сварка», №6, 1950.
40. Г. М. Тиходеев, Энергетические свойства электрической сварочной дуги, - Изд.- АН СССР, М.-Л., 1961.
41. И. К. Походня Плавление электродного металла и взаимодействие его со шлаком при сварке под флюсом/ И. К. Походня, Б.А. Костеренко// (институт электросварки им. Е. О. Патона ан УССР) «Автоматическая сварка» № 5, 1965.
42. И. Д. Кулагик Тепловой баланс сварочной дуги постоянного тока в газах в период формирования капли /И. Д. Кулагик, А. В. Николаев// «Изв. АН СССР. ОТН», № И, 1958.
43. Christensen N., Chipmen J. Slag-metal interaction in the arc welding // Weld. Res. CounsilBul. Ser. 1953. № 15. P. 18.
44. Loewenstein K.L. The manufacturing technology continuous glass fibres. Amsterdam-New-York. 1973. P. 573.
45. Cantrell R.E. Ceramic weld backing evaluation // Welding Journal. 1982. № 10. P. 27-34.

46. Richardson F. D. Oxide slag a survey of our present knowledge // The physical chemistry of steelmaking. Edicot House Dedham. 1955. P. 55-62.
47. Мэддокс С.Д. Усталостная прочность поперечных стыковых сварных швов, выполненных, с одной стороны, // Сварка и резка. 2008. С. 10-18.