

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(институт)

Сварка и обработка материалов давлением и родственные процессы

(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

СОМДиРП

В.В. Ельцов

(И.О.Фамилия)

(подпись)

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016г

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Корсун Дмитрий Евгеньевич

(Фамилия, Имя, Отчество студента)

22.04.01. Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки)

Сварка и пайка новых металлических и неметаллических неорганических материалов

(наименование магистерской программы)

Форма обучения Очная Группа МтМм-1401

Научный руководитель В.П. Сидоров

Консультанты

Тема магистерской диссертации Компьютерный расчет режимов автоматической сварки под слоем флюса

**Руководитель магистерской программы**

А.И. Ковтунов

(И.О. Фамилия)

(подпись)

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016г.

Тольятти 2016

## АННОТАЦИЯ

Данная работа посвящена решению актуальных, недостаточно изученных вопросов сварки под флюсом. Значительное внимание уделено влиянию подогрева в вылете электрода на производительность его расплавления. Обращено внимание на причины различной проплавляющей способности дуг прямой и обратной полярности. Предложена схема расчета тепловых процессов при сварке под флюсом, учитывающая влияние полярности дуги. Рассмотрена методика расчета производительности расплавления электродов в зависимости от соотношения полярностей в дуге с разнополярными импульсами. На основе этого разработана система автоматизированного проектирования параметров процесса сварки для односторонней и двусторонней сварки стыковых соединений без разделки кромок. Содержит 93 стр, рис.17, табл. 23., Библ. 34 назв.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ПЛАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДНОГО И ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКЕ ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА.....	7
1.1 Основные технологические характеристики сварки под флюсом.....	7
1.2 Производительность расплавления электродов при сварке под флюсом.....	11
1.3 Особенности проплавления основного металла при сварке под флюсом.....	16
1.4. Методика расчета провара при сварке под флюсом.....	31
1.5. Нормально-круговой источник на поверхности плоского слоя.....	32
ГЛАВА II. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РАСПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ.....	35
2.1. Определение увеличения производительности расплавления электрода за счет нагрева в вылете.....	35
2.2. Определение значения начального коэффициента расплавления для дуги с разнополярными импульсами тока.....	39
ГЛАВА III. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ.....	43
3.1. Проплавливающая способность сварочной дуги под флюсом.....	43
3.2. Применение различных схем расчета температурного поля при сварке.....	46
3.3. Расчет эквивалентных эффективных мощностей в зависимости от полярности дуги.....	53
3.4. Исследование провара при сварке с использованием схемы НКИ.....	57
3.5. Определение показателей эффективности расплавления основного металла.....	57
ГЛАВА IV. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СВАРКИ РАЗНОПОЛЯРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ТОКА.....	62
4.1 Расчет температур при сварке с учетом полярности дуги.....	62
4.2 Эксперименты по наплавке тонкой проволокой.....	65

4.3 Метод расчета провара при сварке под флюсом с помощью эмпирических формул.....	69
4.4 Методика расчета площади проплавления основного металла.....	72
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	78
Библиографический список.....	79
Приложение.....	83

## ВВЕДЕНИЕ

Сварка под флюсом является весьма распространенным способом механизированной дуговой сварки плавящимся электродом. Этот способ целесообразно применять в серийном и массовом производствах для выполнения кольцевых, прямолинейных, стыковых и угловых швов протяженностью 0,8 м и более на металле толщиной 5-100 мм. Однако не все возможности этого способа сварки реализованы. В последнее время стали использоваться источники питания дуги под флюсом с разнополярными импульсами тока. В России они пока не нашли применения. Недостаточно используются возможности современной компьютерной техники для определения оптимальных параметров сварки.

Сварка под флюсом выполняется, в основном, дугой обратной полярности и дугой переменного тока промышленной частоты. Сварка на прямой полярности используется редко при больших токах дуги. Причиной этого является блуждание дуги по поверхности сварочного электрода, нестабильность плавления электрода. Между тем, производительность расплавления электрода на прямой полярности существенно выше, чем на обратной. Поэтому во многих случаях, когда требуется высокая производительность расплавления электрода целесообразно использовать дугу прямой полярности. К таким случаям можно отнести, например, сварку достаточно больших толщин с разделкой свариваемых кромок. При сварке листов без разделки кромок, наоборот, требуется более глубокий провар основного металла и меньшая производительность расплавления электрода. Поэтому полярность дуги должна меняться в зависимости от типа сварного соединения. Наилучшим образом это можно реализовать путем использования источников питания с разнополярными импульсами тока, в которых может регулироваться соотношение между длительностью протекания тока прямой и обратной полярностей. Такого рода установки уже достаточно давно использовались для сварки алюминиевых сплавов, так как необходимо присутствие катодного пятна на изделии. В последнее время

подобные установки стали применяться и при сварке под флюсом. Возможность появления таких установок обусловлена, по-видимому, наличием эффекта, когда при достаточно высокой частоте смены полярности снижаются негативные аспекты поведения катодного пятна на стержневом электроде. Использование установок с разнополярными импульсами позволяет повысить возможности сварки одновременно несколькими дугами, так как создаются предпосылки смещения по времени действия тока отдельных дуг. При этом уменьшается магнитное взаимодействие дуг, можно их сблизить или повысить сварочные токи и тем самым повысить производительность сварки.

Однако на пути широкого использования установок с разнополярными импульсами тока имеются определенные трудности. Свойства дуги прямой полярности с плавящимися электродами исследованы недостаточно. Отсутствуют рекомендации по выбору параметров процесса сварки. При расчетах тепловых процессов не нашел отражения такой факт, как существенное различие в проплавлении изделия на прямой и обратной полярностях дуги.

**Целью** работы является создание предпосылок для эффективного использования установок автоматической сварки под флюсом дугой с разнополярными импульсами тока.

# ГЛАВА I. ПЛАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДНОГО И ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКЕ ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА

## 1.1. Основные технологические характеристики сварки под флюсом

Сущность процесса дуговой сварки под флюсом заключается в применении непокрытой сварочной проволоки и гранулированного флюса, насыпаемого впереди дуги слоем толщиной 30-50 мм. В области горения дуги образуется полость (газовый пузырь), ограниченная в верхней части оболочкой расплавленного флюса, а в нижней – сварочной ванной. Газовый пузырь заполнен парами металла, флюса и газами. Давление газов поддерживает флюсовый свод, образующийся над сварочной ванной. Дуга несколько отклоняется от вертикального положения в сторону, противоположную скорости сварки. Под влиянием давления дуги жидкий металл также оттесняется в сторону, противоположную направлению сварки. Расплавленный флюс всплывает на поверхность расплавленного металла шва и покрывает его плотным слоем.

Хороший контакт шлака и металла, наличие изолированного от внешней среды пространства обеспечивает благоприятные условия для защиты, металлургической и тепловой обработки сварочной ванны, способствуя получению швов с высокими механическими свойствами [1].

Основными параметрами сварки под флюсом являются диаметр электродной проволоки  $d_э$ , сила тока и напряжение на дуге, скорость сварки, вылет электрода, род тока и полярность.

Уменьшение диаметра проволоки приводит к снижению подвижности столба дуги и, как следствие, к увеличению провара и снижению ширины шва (табл. 1).

Таблица 1

Значения тока дуги, обеспечивающие одинаковый провар изделия при различных диаметрах электрода [1]

d <sub>э</sub> , мм	Провар Н, 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: даны для флюса марки АН-348А и проволока марки Св-08.

Электроды малого диаметра рекомендуют применять для получения узких швов с глубоким проплавлением.

Вследствие хорошей защиты расплавленного металла от воздуха и возможности подвода тока к электроду близко к его торцу ( до 70 мм) плотность тока достигает 60 А/мм<sup>2</sup>, без опасности перегрева и окисления сварочной проволоки. Ток дуги влияет, главным образом, на провар, на ширину шва сила тока влияет мало. Помимо увеличения теплового воздействия с ростом тока, возрастает и давление дуги, что приводит к погружению дуги в сварочную ванну и способствует повышению провара.

Сварка под флюсом является наиболее производительной из дуговых способов сварки. Сварочные токи достигают порядка 1000 А, диаметр электродной проволоки 6 мм. При коэффициенте расплавления  $\alpha_p=20$  г/(Ачас) это обеспечивает производительность расплавления

$$M_p/t = 20 \cdot 1000 = 20 \text{ кг/ч.}$$

Это в несколько раз больше, чем при ручной дуговой сварке покрытыми электродами. Автоматическую сварку под флюсом можно выполнять без разделки кромок при односторонней сварке толщин до 16 мм, при двусторонней до 22 мм [24]. Если учесть, что применение больших толщин сравнительно невелико, это дает большую экономию по механической обработке кромок и расходу электродного металла.

Напряжение дуги  $U_d$  зависит в основном от длины дуги и состава газов, заполняющих дуговой промежуток. Повышение  $U_d$  приводит к увеличению ее подвижности, что приводит к увеличению ширины шва и уменьшению выпуклости шва. Провар мало зависит от  $U_d$ .

Напряжение дуги (Вольт) можно рассчитывать с помощью эмпирической формулы [2]

$$U_d = 20 + 0,05 I_d / d_3^{0,5} \pm 1 \quad (1)$$

где  $I_d$  – ток дуги, А;  $d_3$  – диаметр электрода, мм.

Таблица 2

Значения  $U_d$  в зависимости от тока для двух диаметров электрода [1]

$d_3$ , мм	$I_d$ , А	$U_d$ , В
2	180-300	32-34
	300-400	34-36
	500-600	36-40
5	600-700	38-40
	700-850	40-42
	850-1000	41-43

В работе [3] приводятся данные о напряженности электрического поля в столбе дуги для наиболее распространенных флюсов марок АН-348 и ОСЦ-45. Для флюса АН-348 величина напряженности составляет 3,8-4,2 В/мм, для флюса ОСЦ-45 4,1-4,3 В/мм. Соответственно сумма приэлектродных падений напряжения  $U_k + U_a$  составляет для АН-348 20-22 В, а для ОСЦ-45 23-25 В. Эти данные могут быть использованы для расчета эффективной мощности дуги, так как по теории, изложенной в [3] на нагрев электрода и изделия из одинакового материала расходуется именно сумма приэлектродных падений напряжения.

Повышение скорости сварки до 40-50 м/час приводит к увеличению горизонтальной составляющей давления дуги на расплавленный металл сварочной ванны. Толщина жидкой прослойки под дугой уменьшатся,

тепловое воздействие дуги на основной металл возрастает, провар увеличивается, несмотря на снижение погонной энергии. При дальнейшем повышении скорости сварки снижение погонной энергии становится преобладающим, провар уменьшается.

При сварке с постоянной скоростью подачи электродной проволоки часто вместо тока оперируют скоростью ее подачи, определяющей в этих условиях силу тока. Чем выше скорость подачи, тем больше должна быть сила тока, чтобы обеспечить расплавление подаваемой в зону сварки проволоки.

Автоматы, рассчитанные на применение электродной проволоки 3-6 мм для сварки на токах 400-1200 А, имеют механизмы скорости подачи проволоки со скоростью 0,5-3,0 м/мин (30 -180 м/час) (табл.3). Автоматы, использующие проволоку диаметром 1,6-2,5 мм для сварки на токах 200-600 А могут иметь механизм подачи проволоки со скоростью 3-12 м/мин (180-720 м/час [1]. Автоматы первого типа потенциально могут обеспечить производительность расплавления до 40 кг/час, второго 28 кг/час.

Увеличение вылета электрода приводит к росту его подогрева, скорости расплавления. При этом глубина проплавления несколько уменьшается, а

В работе [1] со ссылкой на ГОСТ 8713-79 указано, что односторонние сварные соединения предусмотрены толщиной до 10 мм, двухсторонние – до 20 мм. Согласно режимам, приведенным в [8] за 1 проход без разделки кромок, как правило, выполняются стыковые соединения из стали толщиной 12-15 мм. Для обеспечения полного провара и необходимой выпуклости шва между кромками стыкуемого соединения предусматривается зазор, зависящий от толщины металла. Отклонения зазоров, в соединениях встык без разделки кромок допускается в пределах 1-3 мм для листов толщиной 10-15 мм, 2-4 мм для листов толщиной 16-20 мм и 3-6 мм для листов толщиной 21-30 мм. Во избежание прожогов сварку ведут на стальных или медных подкладках, флюсовых подушках или с подваркой шва с обратной стороны.

Двухсторонняя сварка стыковых соединений позволяет получить более качественные швы. Этим способом могут свариваться стальные листы

толщиной до 22 мм без разделки кромок. Если нельзя выдержать зазор между кромками < 1 мм, принимают меры, как и при односторонней сварке.

Таблица 3

Характеристики сварочных автоматов [1]

Параметр	ТС-17С	АДФ-800	АДФ-1000	АДФ-1250
Номинальный ток при ПВ=100%	1000	800	1000	1250
Диаметр электрода, мм	3,0-5,0	1,6-4,0	2,0-5,0	2,0-5,0
Пределы регулирования скорости сварки, м/час	15-410	12-360	12-360	12-360
Вместимость кассеты для проволоки, кг	30	15	20	30

### 1.2. Производительность расплавления электродов при сварке под флюсом

Производительность расплавления электрода при дуговой сварке оценивается с помощью коэффициента расплавления  $\alpha_p$ . Этот коэффициент состоит из двух слагаемых [2]

$$\alpha_p = \alpha'_p + \Delta\alpha_p, \quad (2)$$

где  $\alpha'_p$  – составляющая, обусловливаемая тепловложением дуги;  $\Delta\alpha_p$  – составляющая, вызываемая нагревом вылета электрода током. Коэффициент имеет размерность г/(А·ч). Для перевода в размерность г/(А·с) необходимо значение в г/(А·ч) разделить на 3600.

При сварке дугой постоянного тока обратной полярности мощность в электрод от приэлектродной области дуги не зависит от тока и диаметра электрода, и поэтому

$$\alpha'_p = 11,6 \pm 0,4 \quad (3)$$

также стабилен.

При сварке постоянным током прямой полярности и переменным током

$$\alpha'_p = A + B \cdot I_d,$$

где A и B- эмпирические коэффициенты.

Анализ экспериментальных данных позволил установить значение коэффициентов A и B для условий выполнения сварки на переменном и постоянном токе прямой полярности низкоуглеродистой проволокой под кислыми высокомарганцовистыми флюсами. Если подставить эти значения в формулу, то расчётные формулы примут вид:

при сварке постоянным током прямой полярности

$$\alpha'_p = 6,3 + (70,2 \cdot 10^{-3} / d_э^{1,035}) I_d; \quad (4)$$

при сварке переменным током

$$\alpha'_p = 7,0 + (70,2 \cdot 10^{-3} / d_э^{1,35}) I_d. \quad (5)$$

Графические зависимости для коэффициента расплавления на различных полярностях приведены на рис.1.

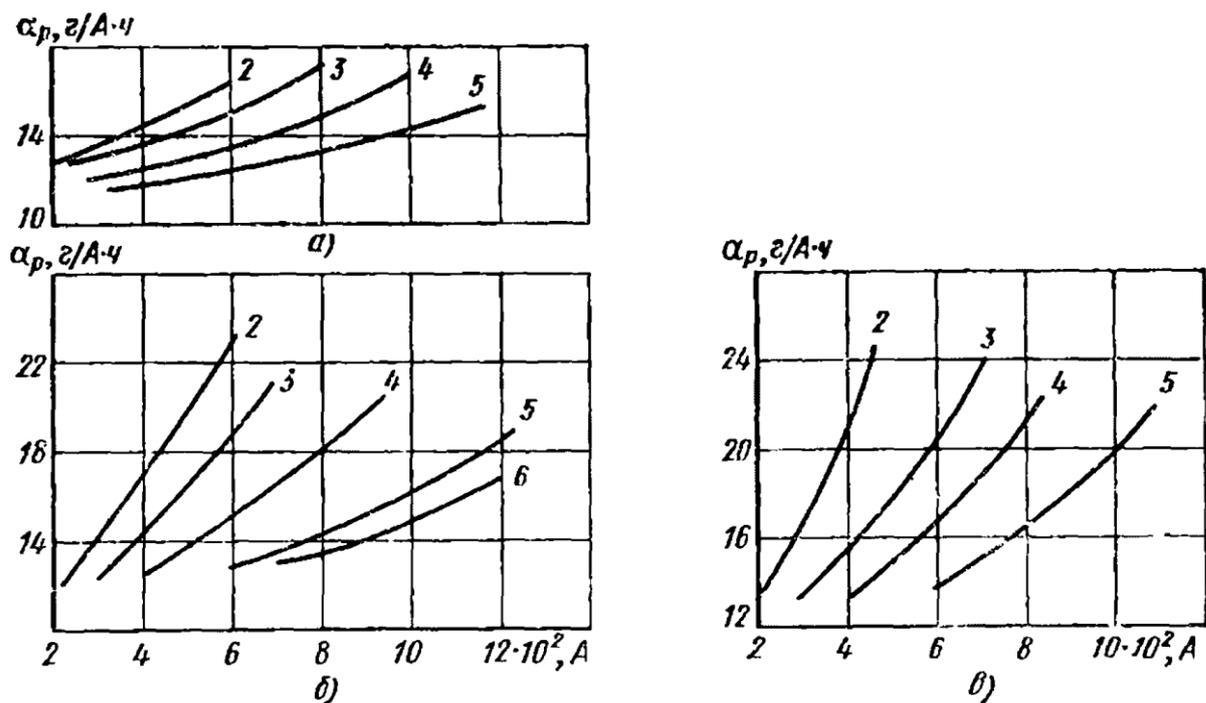


Рис. 1. Зависимость  $\alpha_p$  от режима сварки:

а- постоянный ток обратной полярности; б- переменный ток; в- постоянный ток прямой полярности; цифры 2-6 означают диаметры электродов, мм.

При рассмотрении кривых рис. 1а можно отметить, что, так как согласно формуле (2) на обратной полярности коэффициент расплавления при нулевом вылете не зависит от тока дуги, то в соответствии с формулой (3) рост  $\alpha_p$  можно отнести на счет влияния подогрева вылета. Однако в литературе недостаточно данных по исследованию влияния вылета на подогрев электрода. При сварке под флюсом вылет не превышает 70 мм. Вылет увеличивается с увеличением диаметра электрода. В работе [8] приводится соотношение для сварки в  $\text{CO}_2$  тонкими проволоками, когда отношение вылета к квадрату диаметра электрода должно оставаться постоянным.

Величина второй составляющей выражения (2) коэффициента расплавления может быть рассчитана по уравнению

$$\Delta\alpha_p = (q_3 / H_3 \cdot I_d) 3600, \quad (6)$$

где  $q_3$ - мощность, расходуемая на подогрев вылета электродной проволоки током;  $H_3$ - теплосодержание 1 грамма жидких капель электродной проволоки.

По мнению Ерохина А.А. [9] для низкоуглеродистой проволоки следует принимать  $H_3=2100$  Дж/г.

Значение  $q_3$  рекомендуют рассчитывать по формуле Б.Е. Патона, приведенной в монографии Ерохина А.А. [9].

$$q_3=0,1884j^2\rho_0d_3^2[(v_3/a\cdot\alpha\cdot\beta)(e^{-p_2\cdot L}-1)-\alpha(T_{п}-T_0)/\rho_1], \quad (7)$$

где  $j$ - плотность тока в электроде, А/см<sup>2</sup>;  $\rho_0$ - удельное электросопротивление электродной проволоки при 0° С (для низкоуглеродистой проволоки  $\rho_0=14\cdot 10^{-6}$  Ом·см);  $d_3$ - диаметр электродной проволоки, см;  $v_3$ - условная скорость подачи электрода, см/с (скорость плавления электродной проволоки при нулевом вылете);  $a$ - коэффициент температуропроводности, см<sup>2</sup>/с;  $\alpha$ - температурный коэффициент электрического сопротивления (для низкоуглеродистой стали  $\alpha\approx 0,0083^\circ$  С<sup>-1</sup>);  $\beta$ - коэффициент, равный  $0,24j^2\rho_0/аср$ ;  $c$ - теплоёмкость, кал/г·° С;  $\rho$ - плотность, г/см<sup>3</sup>;  $L$ - вылет электрода, см;  $T_{п}$ - температура плавления проволоки;  $T_0$ - начальная температура проволоки при выходе из токоподвода;  $p_1$  и  $p_2$  – коэффициенты;

$$p_{1,2} = -\frac{v_3}{2a} \mp \sqrt{\frac{v_3^2}{4a^2} - \alpha}. \quad (8)$$

При механизированных способах сварки под флюсом коэффициент расплавления обычно принимают равным коэффициенту наплавки  $\alpha_r\approx\alpha_n$  из за малых потерь электродного металла на угар и разбрызгивание. При сварке в защитных газах величина коэффициента наплавки может существенно отличаться от величины коэффициента расплавления в связи с потерями электродного металла.

Относительно формулы (7) можно заметить следующее. Выведена она достаточно давно, в конце 40-х годов прошлого столетия и приведена по монографии [9]. Результатов ее использования в литературе практически нет, за исключением работы [19], в которой она приводится в ином виде.

Некоторая сложность применения формулы (7) заключается в том, что неясно, какую скорость следует в ней использовать – начальную скорость плавления при нулевом вылете или реальную скорость. Реальная скорость плавления проволоки зависит от выделения мощности в вылете. Получается, что в этом случае подставлять скорость в формулу можно только при наличии опытных данных. Другая сложность заключается в том, что неясно, учитывает ли формула потери мощности от вылета в окружающую среду. В ней отсутствуют параметры, напрямую учитывающие теплоотдачу и тогда ее нужно трактовать как дающую итоговую мощность в вылете.

Сварка под флюсом выполняется преимущественно на токе обратной полярности и на переменном токе. Дуга прямой полярности используется редко. Причиной этого является, по-видимому, низкая пространственная устойчивость дуги, обусловленная блужданием дуги по стержневому катоду. В нормативных документах по сварке магистральных газопроводов рекомендуют применять прямую полярность при токах свыше 600 А [25].

Как видно из графиков рис. 1 скорость расплавления проволоки в дуге прямой полярности существенно выше, чем обратной. Для диаметра проволоки 2 мм при токе 400 А отношение коэффициентов расплавления составляет около 1,4, при диаметре 5 мм и токе 1000 А оно такое же. С учетом рекомендации повышения тока на прямой полярности на 100 А, предположительно можно повысить производительность расплавления при смене полярности примерно на 50%. Это особенно необходимо при заполнении разделки кромок. В этом случае будет меньше происходить также перемешивание основного и электродного металла, что позволит применять менее легированные и дорогостоящие проволоки при сварке легированных сталей.

В работе [14] приводится простая формула для определения коэффициента расплавления тонкой кремниво-марганцевой проволоки на обратной полярности при сварке в углекислом газе

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

где  $\rho$ - плотность электрода, г/мм<sup>3</sup>, L- вылет, мм; J – плотность тока, А/мм<sup>2</sup>.

Размерность  $\alpha_p$  в данном случае г/(А·с). Согласно формуле (9) коэффициент расплавления не зависит от диаметра электрода при одинаковой плотности тока. В работе [21] получено, что с изменением диаметра от 1 до 2 мм при постоянной плотности тока происходит увеличение  $\alpha_p$  примерно на 10%. Формула (9) дает значение коэффициента расплавления при нулевом вылете  $\alpha_{p0} = 6,46$  г/А·час), что существенно отличается от аналогичного коэффициента при сварке под флюсом 11,6 г/(А·ч). Однако второе слагаемое формулы (9) описывает влияние нагрева вылета электрода и может быть опробовано для расчетов при сварке под флюсом.

В работе [31] для сварки в среде CO<sub>2</sub> приводится несколько иная формула для коэффициента расплавления в дуге обратной полярности

$$\alpha_p = 9,05 + 3,1 \cdot 10^{-3} \text{SQR}(I \cdot L) / D^2,$$

В данном случае начальный коэффициент расплавления составляет 9,05 г/(А·ч).

Таким образом, сведения о начальном коэффициенте расплавления и нагреве электрода в вылете существенно отличаются для различных условий сварки.

### **1.3. Особенности проплавления основного металла при сварке под флюсом**

Соответственно, если скорость расплавления электрода больше на прямой полярности дуги, то меньше должен быть провар изделия. Это подтверждают данные, приведенные в [2]. Для двухсторонних стыковых соединений без скоса кромок имеет место прямо пропорциональная зависимость между током и проваром.

$$H = k \cdot I_c / 100,$$

где провар  $H$  измеряется в мм, ток в А.

Коэффициент пропорциональности  $k$  изменяется в зависимости от диаметра электрода с 1,15 до 0,75 для прямой полярности и с 1,45 до 1,1 для обратной полярности. Получается, что по этим данным провар на обратной полярности выше от 25 до 45 % в зависимости от диаметра электрода. С увеличением диаметра разница в проварах уменьшается. Получается, что разница в проварах примерно соответствует разнице в производительностях расплавления электродного металла. Это говорит о том, что за счет перемены полярности можно существенно изменить соотношение в шве между основным и наплавленным металлом.

Различие в проплавлении изделия в зависимости от полярности дуги сложно объяснить с позиции теории тепловых процессов при действии сосредоточенных источников тепла. Согласно теории сварочной дуги для близких по свойствам материалов электродов эффективная мощность не зависит от полярности дуги, так как приэлектродные процессы протекают аналогично. При сварке плавящимся электродом мощность, поглощаемая жидким электродным металлом, переносится к изделию и, следовательно, выделяемая мощность на изделии практически должна быть одинаковой, если не учитывать небольшой разницы из-за разного нагрева вылета. Однако, как это следует из данных [2], наблюдается существенная разница в проварах. В литературе не удалось найти попыток как-то разрешить это противоречие, за исключением гипотезы, изложенной в работе [4]. Сущность этой гипотезы заключается в том, что уменьшение провара на прямой полярности объясняют влиянием увеличения жидкой прослойки в сварочной ванне из-за большей скорости расплавления электродного металла.

При сварке плавлением сварной шов в большинстве случаев образуется путем перемешивания свариваемого (основного) металла и дополнительного (присадочного или электродного металла). Регулирование химического состава шва необходимо для получения требуемых свойств, для этого в большинстве случаев используется дополнительный металл, существенно

отличающийся по своему составу от состава основного металла. Дополнительно химический состав шва регулируют за счет химических реакций между используемыми при сварке флюсами и защитными газами. Такой аспект регулирования химического состава шва в данной работе не рассматривался. Регулирование химического состава шва является важнейшим способом управления его свойствами, а зачастую и свойствами всего сварного соединения.

Перемешивание основного и дополнительного металла при сварке плавлением принято оценивать специальным коэффициентом, получившим название доли участия основного металла в металле шва  $\psi_0$  (рис. 2).

$$\psi_0 = F_0 / (F_0 + F_H), \quad (10)$$

где  $F_0$  - площадь поперечного сечения основного металла;  $F_H$  - площадь поперечного сечения наплавленного металла.

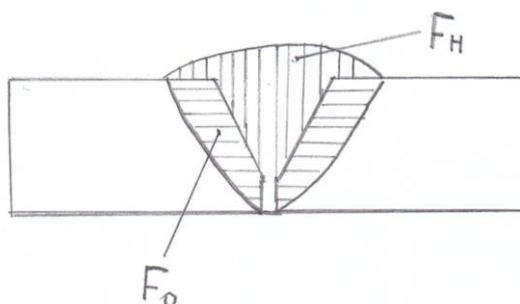


Рис. 2. К понятию доли участия основного металла в металле шва

Для экспериментального определения  $\psi_0$  необходимо получить макрошлиф поперечного сечения всего шва и определить каким-либо образом поперечное сечение дополнительного металла. В случае, если известно сечение подготовки под сварку свариваемых кромок, определить  $F_H$  несложно. Однако, в общем случае определение  $\psi_0$  опытным путем достаточно трудоемко. Поэтому для получения оптимальных характеристик сварных соединений и режимов их получения необходимо развитие расчетных методов определения  $\psi_0$  на основе достижений математического моделирования процессов при сварке и современного программного обеспечения.

Если значение  $\psi_0$  известно, то содержание любого химического элемента в шве  $C_{\Sigma}^{\text{III}}$  можно определить по формуле

$$C_{\Sigma}^{\text{III}} = C_{\Sigma}^{\circ} \psi_0 + C_{\Sigma}^{\text{э}} (1 - \psi_0), \quad (11)$$

где  $C_{\Sigma}^{\circ}$  – содержание данного химического элемента в основном металле;  $C_{\Sigma}^{\text{э}}$  – содержание этого же элемента в наплавленном металле «чистой» наплавки.

Содержание элементов в наплавленном металле определяют путем наложения нескольких наплавленных слоев, чтобы минимизировать перемешивание основного и наплавляемого металлов.

Наиболее сложной задачей при теоретическом определении  $\psi_0$  является нахождение площади проплавления основного металла  $F_0$ . Площадь поперечного сечения наплавленного металла  $F_n$  получить значительно проще, так как она определяется скоростью расплавления дополнительного металла, которая достаточно хорошо изучена экспериментально.

В работе [22] показано, что изменять долю участия при сварке на одной полярности за счет режимов сварки (тока и скорости сварки) можно только в очень узких пределах. Это объясняется низкой гибкостью технологического процесса [22]. При увеличении, например, скорости сварки, уменьшается провар основного металла, но уменьшается и количество наплавленного металла. Аналогично влияет ток дуги. Возможности несколько увеличиваются за счет изменения диаметра электрода, однако они также недостаточны. Дуга переменного тока занимает промежуточное положение между дугами прямой и обратной полярности и частично позволяет решить проблему. Однако наилучшим вариантом было бы все-таки использовать дугу, близкую по свойствам к дуге прямой полярности.

Проплавление детали и расплавление электрода в зависимости от полярности подробно исследовалось в работе [4]. Использовался инверторный источник питания Power Wave AC/DC 1000 фирмы «Линкольн Электрик» (США), который позволял получать высокочастотные импульсы

разнополярного тока. Этот источник питания оснащен цифровой системой управления, позволяющей строить различные эпюры переменного и постоянного сварочного тока. Соотношение длительности прямой и обратной полярности изменялось с шагом 25% от 0 до 100 %. Наплавка велась на пластины из стали Ст3 размерами 250x170x12 мм на скорости 30 м/ч. Напряжение на дуге составляло 29 В. Частота импульсов переменного тока составляла 60 Гц. Полученные зависимости представлены в табл. 4

Таблица 4

Опытные данные [4] по размерам швов при наплавке разнополярными импульсами тока

Баланс фаз	Ид, А	Параметры валиков			
		В, мм	g, мм	Н, мм	Vэ, м/мин
	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	14,88	5,3	5,8	0,057

Согласно исследованиям [4] с увеличением доли прямой полярности увеличивается скорость плавления электрода и уменьшается провар изделия.

Это соответствует ранее известным данным. Авторы попытались найти объяснение этому явлению. Известно, что величина жидкой прослойки в сварочной ванне влияет на провар. Они выдвинули гипотезу о том, что разница проваров обусловлена различием в толщине жидкой прослойки в зависимости от полярности. По их мнению, на прямой полярности большее количество расплавленного электродного металла приводит к увеличению прослойки жидкого металла в сварочной ванны. Данные работы [4] были подробно проанализированы в работе [5]. С помощью данных по приэлектродным мощностям, выделяемым в дуге на прямой и обратной полярности было показано, что причиной различия проваров является различное влияние на провар мощностей, выделяемых в приэлектродных областях дуги и переносимой жидким электродным металлом. Различие, в зависимости от режимов, достигает 2-4 раз. Это привело автора работы [5] к идее необходимости рассматривать в тепловых расчетах при сварке плавящимся электродом модели двух источников тепла с различной сосредоточенностью. Также в продолжении работы [5] в работе [6 ] на основании данных той же работы [4] было показано, что при изменении полярности дуги суммарная площадь поперечного сечения шва не изменяется при существенном изменении доли основного и наплавленного металла. Это является дополнительным подтверждением того, что причиной различия проваров является не различие в толщине жидкой прослойки.

Рассмотрим более подробно технологические возможности дуги с разнополярными импульсами тока [32].

Новые возможности по созданию гибкого и высокоэффективного производства и оптимизации технологических процессов открываются благодаря полному доступу к регулированию следующих параметров:

- Падающая или жесткая вольтамперная характеристика
- Прямоугольная или синусоидальная форма токовой кривой
- Диапазон регулировки частоты от 10 до 100 Гц
- Регулировка баланса, то есть соотношения длительности положительного и отрицательного полупериода волны
- Смещение нулевой точки токовой кривой для изменения амплитуды отрицательного или положительного полупериода волны
- Оптимизированная процедура зажигания дуги, исключая нестабильность дуги при работе на переменном токе, а также на постоянном токе отрицательной полярности.
- Регулировка сдвига фаз между дугами (до четырех дуг стандартно) во всем диапазоне от  $0^\circ$  до  $359^\circ$ .
- Цифровая связь между блоком управления, сварочным источником и механизмом подачи проволоки.

Многочисленные комбинации этих параметров позволяют создавать уникальные решения, оптимизируя сварочную процедуру для каждого конкретного случая.

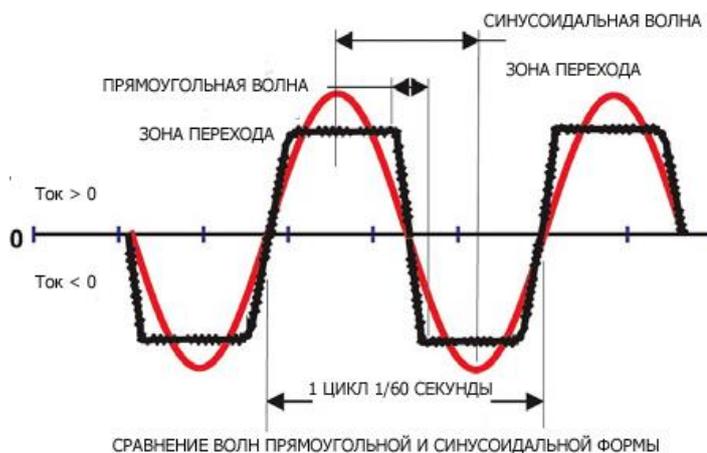


Рис. 3. Сравнение формы токов прямоугольной и синусоидальной формы

Для наглядной демонстрации преимуществ волны прямоугольной формы по сравнению с синусоидальной формой волны изобразим обе токовых кривых на одном графике. При частоте переменного тока 50 или 60 Гц волна пересекает ноль 100 или 120 раз в секунду. Таким образом, переход из одной полярности в другую в обоих случаях совершается теоретически с одинаковой частотой. Однако время перехода через ноль (а точнее, время перехода через некоторую зону около нуля, в которой отмечается нестабильность дуги) у волны прямоугольной формы значительно меньше, поэтому устойчивость дуги при использовании прямоугольной формы волны значительно выше.

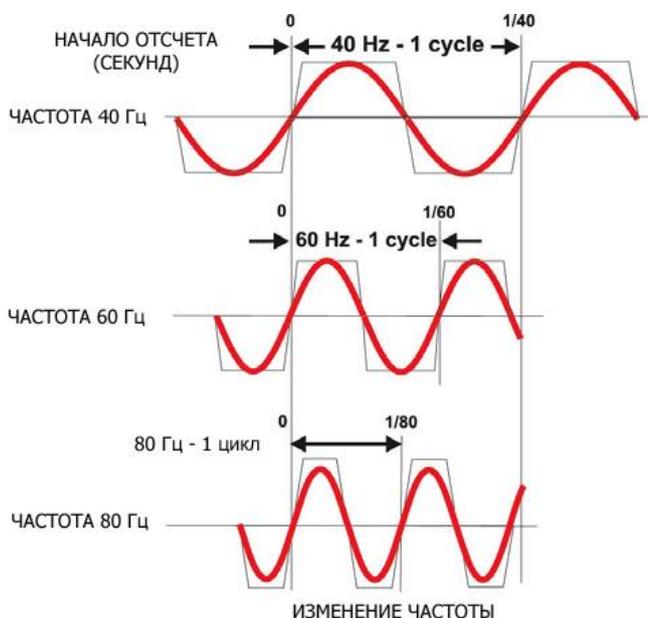


Рис. 4. Схема регулировки частоты синусоидального тока

Еще одно преимущество прямоугольной формы волны становится очевидным при регулировке частоты. По мере изменения частоты волны переменного тока меняется длительность околопиковых значений, а также время перехода с одной полярности на другую. При этом волна прямоугольной формы снова имеет преимущества по сравнению с синусоидальной. Кроме того, чем больше площадь на графике под волной, тем больше энергия, полученная дугой. От этого напрямую зависит коэффициент наплавки, глубина проплавления и, как уже говорилось выше, устойчивость дуги. На практике регулировка частоты переменного тока

служит для изменения формы зоны проплавления при выполнении угловых или стыковых сварочных швов, а также при сварке тонколистового металла. Продемонстрируем это на типичном примере.

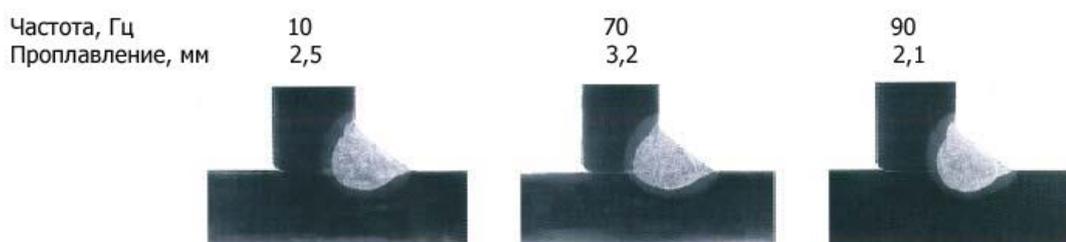


Рис. 5. Угловой шов таврового соединения:  $d = 4$  мм,  $I_d = 525$  А, смещение нулевой точки волны: 25% положительный полупериод, 10% отрицательный полупериод,  $V_c = 1,38$  см/с.

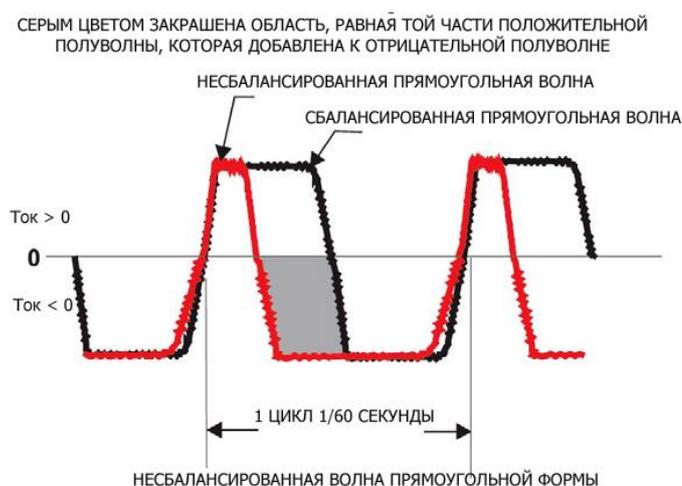


Рис.6. Схема изменения баланса положительного и отрицательного полупериода волны.

Функция баланса позволяет изменять время, в течение которого дуга запитана положительным/отрицательным потенциалом. Величина баланса определяется как доля положительного полупериода по отношению к длительности периода волны и выражается в процентах. Например, на приведенной схеме волна черного цвета имеет баланс 50%, а волна красного цвета – 25%.

Изменяя соотношение положительного и отрицательного полупериода волны, оказывается возможным изменять соотношение между фазами наплавки и проплавления. Чем меньше величина баланса (%), тем больше коэффициент наплавки и меньше глубина проплавления. Таким образом, с помощью данной функции можно контролировать прожоги и изменять коэффициент наплавки, а также создавать новые способы увеличения скорости сварки без изменения общей погонной энергии.



Рис.7. Схема изменения положительной и отрицательной амплитуды волны

Это очень мощный инструмент, позволяющий увеличить фазу проплавления или наплавки. Система Power Wave AC/DC 1000 позволяет смещать нулевую точку в пределах от -25% до +25%. Смещение нулевой точки позволяет увеличить амплитуду положительного или отрицательного полупериода волны по сравнению со сбалансированной волной, где эти величины одинаковы. Это также можно представить, как наложение на обычную волну постоянного тока отрицательной или положительной полярности.

Увеличение положительной амплитуды волны (+25%) соответствует увеличению постоянной составляющей тока положительной полярности, и соответственно, ведет к более высокому проплавлению; а при смещении нулевой точки в противоположную сторону (-25%) увеличивается наплавка и снижается проплавление.

Регулировка сдвига фаз между дугами (до четырех дуг стандартно) во всем диапазоне от 0° до 359°: Цифровое управление позволяет

устанавливать определенный сдвиг фаз между дугами. Система PowerWave AC/DC 1000 позволяет изменять сдвиг фаз во всем диапазоне от  $0^\circ$  до  $359^\circ$ .

Это одно из самых главных достоинств источников PowerWave AC/DC 1000. С введением этой функции появилась возможность временно объединять две и более машин в единую сварочную систему для выполнения конкретной сварочной задачи, а после завершения работ использовать каждый источник самостоятельно. Такая высокая гибкость оборудования позволяет оптимизировать процесс и значительно повысить производительность оборудования.

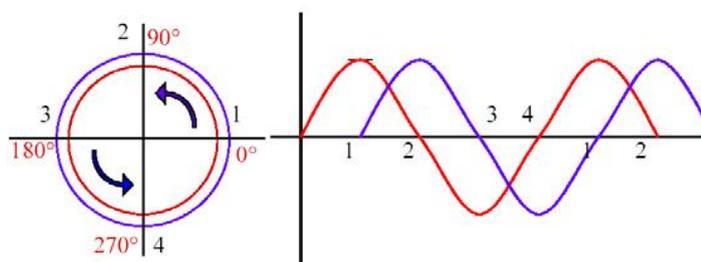


Рис.8. Схема сдвига фаз между двумя дугами на 90 градусов

На диаграмме изображен сдвиг фаз на  $90^\circ$ . Такой способ обычно используется при работе на двух дугах. В данном случае переход одной волны через ноль совпадает с пиковым значением другой волны, что существенно снижает взаимное влияние сварочных дуг друг на друга.

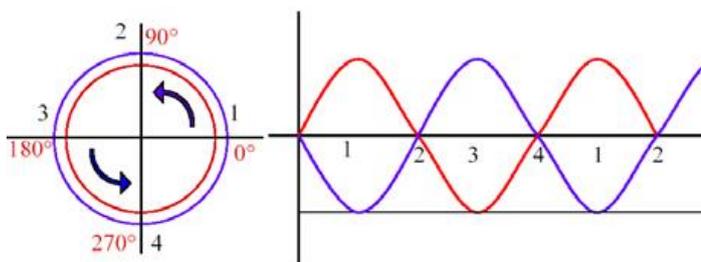


Рис.9. Схема сдвига фаз между дугами на 180 градусов

При сдвиге фаз на  $180^\circ$  очевидно, что обе дуги будут иметь максимальное влияние друг на друга, так как их волны достигают пиковых значений одновременно. Стандартный интерфейс системы Power Wave AC/DC 1000 позволяет настроить сдвиг фаз для работы на 4 дугах, так чтобы они не влияли друг на друга.

Цифровая связь: Вся архитектура системы PowerWave построена на протоколе цифровой связи. Передача любых данных осуществляется в цифровом, а не в аналоговом формате, что имеет целый ряд преимуществ. Достаточно назвать отсутствие потерь и искажений сигнала при передаче данных, малое время отклика, ненужность калибровки. Все передаваемые данные регистрируются в памяти, что позволяет получить значение любого параметра, выполнить диагностику машины, установить пределы, в которых можно изменять те или иные параметры, задать условия тревожного оповещения или даже отправить по электронной почте статистический отчет и любую другую необходимую информацию.

Примеры применения сварочного источника PowerWave AC/DC 1000:

- а) Сварка одной дугой: Благодаря индивидуальной настройке дополнительных функций, доступных на PowerWave AC/DC 1000, глубина проплавления или скорость наплавки всегда превосходят аналогичные значения традиционных источников.
- б) Правильный выбор функций и надлежащая настройка всех параметров позволяют оптимизировать работу источника, более экономно расходовать энергоресурсы и значительно улучшить качество швов.
- в) Что касается скорости наплавки, а значит, и производительности сварки, то график наглядно демонстрирует все преимущества комбинирования разных функций для достижения наилучшего результата.

Например, при сварке на одном и том же сварочном токе 800 А система PowerWave AC/DC позволяет увеличить скорость наплавки на 4,7 кг/час, то есть почти на 43%.

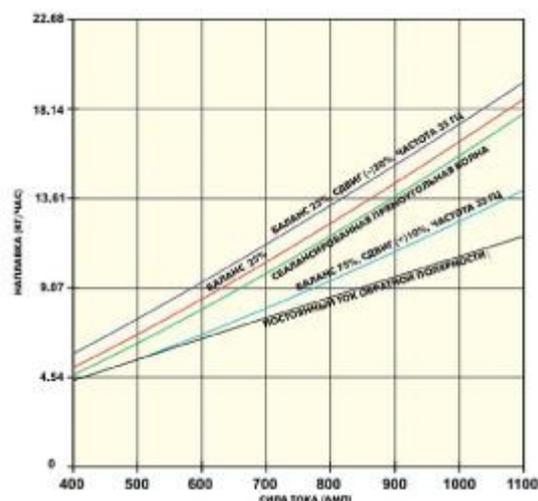


Рис. 10. Зависимости производительности наплавки от тока дуги при различных сдвигах баланса

При описании новой технологии сварки под флюсом нельзя не затронуть вопрос о надежности такой сварки и влиянии технологических изменений на механические свойства шва. Фактически, повышение скорости наплавки обеспечивает значительное увеличение скорости сварки, сведение к минимуму погонной энергии на каждом проходе, получение отличных механических свойств в основном металле или в зоне термического влияния. Сравним результаты, полученные при выполнении двух различных сварочных процедур (сварки на переменном токе с волной прямоугольной формы и сварки на постоянном токе положительной полярности) с использованием электрода S2Si на токе 600 А. Сварка выполнялась на пластинах толщиной 20 мм:

Таблица 5

Сравнение параметров при двух способах сварки

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

\* - Под общей подачей понимается подача, необходимая для заполнения шва за один проход. Она рассчитывается как отношение скорости подачи к количеству проходов.

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°C	Тест по Шарпи при - 29°C
Постоянный ток положительной полярности	538	459	30	85	158
Переменный ток, баланс 30%, частота 40 Гц	567	480	28	77	135

\* Испытания выполнены в соответствии с требованиями по AWS. Сравнение результатов сварки с применением двух различных сварочных процедур:

- 1) Снижение погонной энергии на каждый проход более, чем на 16%
- 2) Увеличение общей скорости сварки на 43%
- 3) Увеличение скорости наплавки на 40%
- 4) Сохранение отличных механических свойств шва

И для этого достаточно использовать вместо сварки на постоянном токе положительной полярности сварку на переменном токе с волной прямоугольной формы. Сварка на постоянном токе положительной полярности

Такие же результаты можно получить при сварке угловых швов при условии правильной настройки всех параметров:

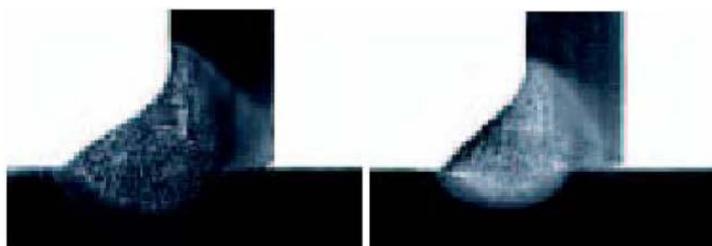


Рис. 11. Сварка на постоянном токе положительной (прямой) полярности 527 А (шлиф слева); сварка на переменном токе прямоугольной формы волны 520 А (шлиф справа)

Изображенные на фотографиях рис.11 угловые сварные швы с катетом 8 мм практически не отличаются по величине сварочного тока, но скорость сварки на переменном токе оказалась на 40% выше. При этом оба шва имеют великолепную форму.

Источник питания PowerWave AC/DC 1000 расширяет возможности применения многодуговой сварки. До последнего времени сварка на нескольких дугах, особенно при числе дуг более двух, не находила широкого применения, за исключением трубопрокатных цехов. С появлением сварочных систем PowerWave AC/DC 1000 все больше и больше предприятий стремятся воспользоваться перечисленными преимуществами и переходят на новые технологии сварки на трех и более дугах.

В эту группу входят, в частности, предприятия энергетики и компании по строительству сооружений из стальных конструкций. Именно в этих отраслях промышленности, особенно в тяжелом секторе, технологии многодуговой сварки открывают новые возможности по оптимизации производственного процесса и снижению издержек производства.

Как правило, при сварке на 4 сварочных дугах со скоростью подачи примерно 1,6 м/мин при использовании основного флюса погонная энергия составляет 2500 – 2800 кДж/м. Такой высокий уровень энергии в сочетании с широкой зоной рассеяния тепла дает очень обнадеживающие результаты.

Новые технологии пригодились также для ветроэнергетической промышленности. Соединение пластин и колец толщиной до 35 мм выполнено при помощи сварки в два прохода, по одному проходу с каждой

стороны. Благодаря удачному выбору сварочных материалов изделия демонстрируют очень хорошие механические свойства даже при низких температурах.

С созданием сварочного источника PowerWave® AC/DC 1000 появились дополнительные возможности по повышению производительности и снижению производственных затрат при дуговой сварке под флюсом. Новые функции сварочной системы позволяют оптимизировать процесс нанесения шва при помощи настроек, о которых никто еще до недавнего времени ничего не знал.

### 1.5. Методика расчета провара при сварке под флюсом

Для расчета размеров площади поперечного сечения проплавления основного металла при сварке длительное время использовали теорию быстродвижущихся источников тепла Н.Н. Рыкалина. Глубину проплавления рекомендовалось определять по формуле [2]

$$H = 0,0156 (q_{\text{п}}/\psi_{\text{пр}})^{0,5}, \quad (12)$$

где  $q_{\text{п}}$  – погонная энергия сварки, кал/см;  $\psi_{\text{пр}}$  – безразмерный коэффициент формы шва. Поскольку  $1 \text{ кал} = 4,18 \text{ Дж}$ , то коэффициент в формуле в системе СИ  $A = 0,0156/4,18 = 3,73 \cdot 10^{-3}$ .

В свою очередь, коэффициент формы провара предлагается рассчитывать по формуле

$$\psi_{\text{пр}} = k_1 (19 - 0,01 I_c) d_3 U_d / I_c, \quad (13)$$

где  $k_1$  – коэффициент, зависящий от рода сварочного тока и его полярности.

Величина коэффициента  $k_1$  при плотности тока  $j < 120 \text{ А/мм}^2$  при сварке постоянным током обратной полярности

$$k_1 = 0,367 j^{0,1925}. \quad (14)$$

При сварке постоянным током прямой полярности

$$k_1 = 2,82 / j^{0,1925}. \quad (15)$$

При  $j \geq 120 \text{ А/мм}^2$   $k_1$  – постоянен.  $k_1 = 0,92$  для постоянного тока обратной полярности и  $k_1 = 1,12$  для прямой полярности. При сварке на переменном токе  $k_1$  не изменяется во всем диапазоне плотностей токов  $k_1 = 1$ .

Недостатком формулы (12) является, что она получена на основе схемы полубесконечного тела, в то время как в большинстве случаев свариваются пластины, для которых эта формула малоприменима. Кроме того, во многих случаях нельзя использовать схему быстро движущегося источника тепла, которая дает одинаковое влияние эффективной мощности и скорости сварки на провар. В работе [10] показано, что скорость и мощность влияют на провар с различной интенсивностью и понятие погонной энергии может использоваться не во всех случаях.

### 1.5. Нормально-круговой источник на поверхности плоского слоя

Для сварки стыковых соединений без разделки кромок неплавящимся электродом целесообразно ведение расчета процесса распространения тепла по схеме нормально-кругового источника (НКИ) тепла на поверхности плоского слоя, испытывающего ограничивающее влияние нижней плоскости листа (рис ) [12].

Эта расчетная схема отражает все основные особенности процесса сварки без разделки кромок, когда тепло сварочной дуги вводится в изделие с его поверхности, давление дуги сравнительно невелико и не приводит к значительному погружению активного пятна дуги в жидкий металл. В то же время схема позволяет учесть распределенность теплового потока источника, что важно при определении размеров сварочной ванны.

Распределение мощности нормально-кругового теплоисточника на поверхности металла описывается выражением (16).

Температура в бесконечном плоском слое от движущегося НКИ описывается выражением:

$$\theta := \frac{2 \cdot q}{c_{\gamma} \cdot (4 \cdot \pi \cdot a)^{1.5}} \cdot \sum_{n=-N}^N \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t \cdot (t_0 + t)}} \cdot e^{-\left[ \frac{(z - 2 \cdot n \cdot \delta)^2}{4 \cdot a \cdot t} + \frac{[x - v \cdot (t_0 + t)]^2 + y^2}{4 \cdot a \cdot (t_0 + t)} \right]} dt \quad (16)$$

где  $x, y, z$ - координаты точки относительно подвижной системы координат источника теплоты, см;  $t$ - время процесса сварки, с;  $c\gamma$  - объемная теплоемкость, Дж/град·см<sup>3</sup>;  $q$  – эффективная мощность дуги, Вт;  $\delta$  - толщина металла, см;  $a$  – температуропроводность, см<sup>2</sup>/с;

$t_0 = l/4ak$  – постоянная времени, характеризующая сосредоточенность теплового потока от дуги к изделию, с;  $v$  – скорость движения источника тепла, см/с;  $N$  – количество фиктивных теплоисточников.

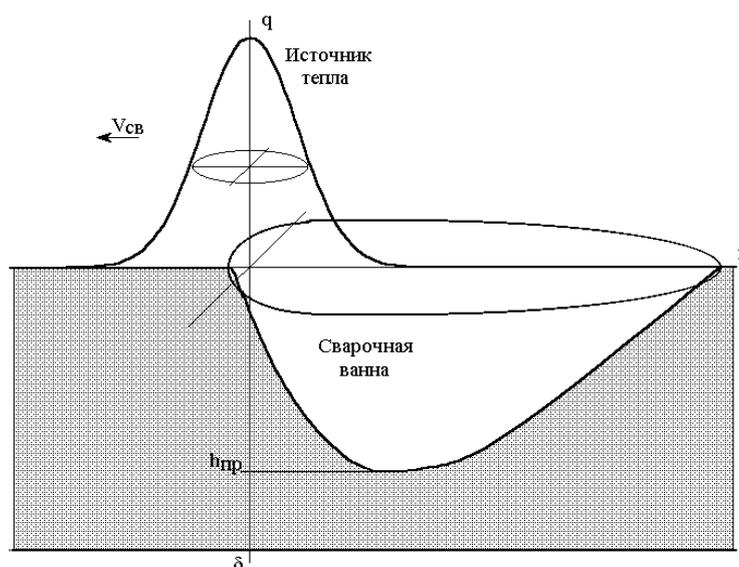


Рис. 12. Схема проплавления при действии НКИ

К недостаткам расчетной схемы (16) следует отнести отсутствие учета выделения скрытой теплоты плавления и кристаллизации, гидродинамических процессов в сварочной ванне, линейность постановки задачи в отношении теплофизических коэффициентов. Однако для решения поставленных задач эти недостатки не являются существенными, т.к. на данном этапе определяющим является установление основных зависимостей для переходных процессов и коэффициентов передачи. Кроме того, их предполагается устранить за счет экспериментальной верификации модели (16) и введения понятий приведенных коэффициентов модели. В данной работе следует опробовать модель поверхностного НКИ для расчета размеров зоны проплавления при сварке под флюсом.

На основе проведенного анализа можно сформулировать следующие задачи работы.

1. Проанализировать современные подходы к расчету тепловых процессов при сварке под флюсом.
2. Исследовать зависимости нагрева вылета при сварке под флюсом.
3. Предложить схему учета влияния полярности дуги при расчете тепловых процессов при сварке.
4. Разработать САПР режимов сварки под флюсом при сварке разнополярными импульсами тока.

## ГЛАВА II. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РАСПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ

### **2.1. Определение увеличения производительности расплавления электрода за счет нагрева в вылете**

#### **2.1.1. Определение на основе анализа графических зависимостей**

В работе [17] предложена система компьютерного проектирования доли участия основного металла в металле шва при дуговой наплавке на массивное тело. Расчет доли участия позволяет, в свою очередь, определять химический состав шва при известных исходных составах электродной проволоки и основного металла. Вследствие быстрого действия ЭВМ задача проектирования химического состава шва может эффективно решаться перебором параметров процесса. Однако предложенная в работе [17] методика расчета не учитывала ряд факторов. В частности, не учитывался такой существенный параметр процесса дуговой наплавки, как вылет электродной проволоки. Проблема заключается в том, что в специальной литературе приводятся зависимости и значения коэффициента расплавления электродной проволоки от тока дуги, но обычно нет сведений о вылете электрода. Поэтому при работе с компьютерной программой приходилось вводить связанные с током значения коэффициента расплавления. В модифицированном варианте программы эта проблема была решена следующим образом. Известно, что коэффициент расплавления электродной проволоки в дуге обратной полярности под флюсом при нулевом вылете практически не зависит от тока [2]. Следовательно, весь прирост коэффициента расплавления дуги обратной полярности с увеличением тока обусловлен нагревом электрода в вылете.

В связи с этим для дуги обратной полярности были проанализированы зависимости приращения коэффициента расплавления от тока дуги для нескольких диаметров электродной проволоки. В результате аппроксимации

данных с помощью компьютерной программы, приведенной в [18] была получена формула

$$\Delta\alpha_p = I_d / (74 + 36d_э), \quad (17)$$

где  $I_d$  - ток дуги, А;  $d_э$  – диаметр электрода, мм. Размерность  $\Delta\alpha_p$  – г/(А·час).

Использование этой формулы предполагает однозначную связь вылета с диаметром электрода и током дуги. Формула (17) позволяет в каждом конкретном случае оценить вклад нагрева электрода в вылете в скорости расплавления электрода.

Можно отметить, что формула (17) дает линейную зависимость приращения коэффициента расплавления от тока дуги, в то время как в соответствии с рис. 1а имеет место нарастающее приращение коэффициента расплавления. Расчетные зависимости приведены в табл. 7

Таблица 7

Влияние вылета на расплавление электрода по формуле (17)

Ток, А	Диаметр электрода, мм			
	2	3	4	5
200	1,37	1,1	0,93	0,8
300	2,05	1,65	1,40	1,2
400	2,74	2,2	1,86	1,6
500	3,42	2,75	2,3	2,0
600	4,1	3,3	2,8	2,4
800	5,48	4,4	3,72	3,2

Наибольшее влияние вылет оказывает при малом диаметре электрода, однако это влияние при сварке под флюсом сравнительно невелико. Тем не менее, учет подогрева в вылете необходим.

Поскольку нагрев вылета напрямую не зависит от полярности дуги, формула (17) может использоваться для любой полярности тока. Так как формулы для расчета коэффициента расплавления от действия дуги известны [2], то полный коэффициент расплавления может быть получен для любого режима расчетным путем.

Расчетные данные превышают экспериментальные на граничных участках диапазона токов при прямой полярности для всех диаметров на +13%. Такое систематическое отклонение возможно связано с тем, что на обратной полярности в связи с увеличением катодной мощности, вводимой в электрод, повышается скорость его подачи и, следовательно, происходит относительное снижение мощности в вылете. Иначе говоря, вылет меньше времени находится под действием тока. Поэтому в расчет определения полного  $\alpha_p$  для обратной полярности должен быть введен коэффициент 0,87, а для переменного тока 0,94.

### 2.1.2. Расчет на основе формулы для сварки тонкой проволокой

Рассчитаем приращение коэффициента расплавления при режимах сварки под флюсом с помощью формулы (9), взятой из работы [14] (табл.8).

Таблица 8

Влияние вылета на коэффициент расплавления электрода по формуле (9)

Ток, А	$\alpha_p$ (г/Ач) при диаметре электрода, мм			
	2	3	4	5
200	2,86	1,91	1,43	1,14
300	4,29	2,87	2,15	1,72
400	5,72	3,82	2,86	2,28
500	7,15	4,8	3,58	2,85
600	8,58	5,73	4,3	3,43
800	11,44	7,64	5,72	4,56

Примечание: длина вылета принималась  $L=10d$ ,

Можно отметить, что второй вариант расчета дает более высокие значения приращения коэффициента расплавления. Этот вариант более предпочтителен при создании САПР, поскольку предполагает точные значения вылета электрода.

При высокой плотности тока на электроде малого диаметра вклад подогрева вылета превышает вклад мощности приэлектродной области дуги.

При наиболее высокой плотности тока при диаметре электрода 5 мм доля нагрева в вылет составляет 50% от доли, вносимой дугой.

При расчете для дуги прямой полярности значения из табл.8 следует умножать на коэффициент равный отношению начальных коэффициентов расплавления прямой и обратной полярностей.

### 2.1.3. Расчет на основе формулы для единичного сопротивления

В работе [25] на основе анализа данных по сварке в CO<sub>2</sub> получена формула для единичного сопротивления вылета

$$R_1 = A \cdot D^n \quad (18)$$

где D - диаметр электрода в мм.

Коэффициенты A, n формулы (18) определялись с помощью компьютерной программы, приведенной в работе [10]. В результате получили (с точностью до второго знака) A = 29,32; n = -2,34.

Единичное сопротивление не зависит от тока дуги, что связано с тем, что при сварке для каждого диаметра используются определенные плотности тока. В табл. 9 приводятся результаты расчета по формуле (18) сопротивления вылета при рекомендуемом отношении длины вылета к диаметру электрода. Значения токов дуги для расчета выбирались средними для данного диаметра электрода по графикам, приведенным в [2].

Таблица 9

Определение параметров вылета по формуле (18)

Сопротивление	Диаметр электрода, мм			
	2	3	4	5
$R_1 \cdot 10^{-4}$ Ом/мм	5,79	2,24	1,14	0,68
$R_B \cdot 10^{-4}$ , Ом	115,8	67,2	45,6	33,9
Ток, А	400	500	700	1000

Напряжение в вылете, В	4,63	3,36	3,2	3,39
Мощность, Вт	1850	1680	2140	3390
$\Delta M_p$ , г/с	0,62	0,56	0,71	1,13
$\Delta \alpha_p \cdot 10^{-3}$ , г/(А·с)	1,55	1,12	1,0	1,13

Примечание:  $\Delta M_p$  – приращение производительности расплавления за счет нагрева вылета, теплосодержание капель электродного металла принималось 2100 Дж/г.

В табл. 9 приведена полная мощность, выделяющаяся в вылете. При расчете приращения производительности расплавления она умножалась на коэффициент 0,7. Из результатов вычислений видно, что повышение производительности за счет подогрева вылета имеет один порядок величины и отличается до двух раз. Приращение коэффициента расплавления отличается значительно меньше.

При данном подходе сопротивление вылета уменьшается с увеличением диаметра электрода. С помощью формулы (18) можно предложить такой подход в назначении вылета при сварке, при котором сопротивление вылета не будет изменяться с диаметром электрода. В этом случае необходимо задаться длиной вылета, допустим для диаметра 3 мм, вычислить сопротивление вылета, а затем определять длины вылетов на других диаметрах, которые дадут такое же сопротивление.

## 2.2. Определение значения начального коэффициента расплавления для дуги с разнополярными импульсами тока

Важным элементом расчета мощности, выделяемой в электрод от дуги с разнополярными импульсами тока является мощность от приэлектродных областей дуги.

Вывод формулы сделаем в предположении, что токи в периоды импульсов любой полярности равны. Обозначим долю времени протекания импульсов прямой полярности  $\varepsilon$ .

Тогда

$$\alpha_{yo} = \alpha_{rp} \cdot \varepsilon + \alpha_{po} \cdot (1 - \varepsilon), \quad (19)$$

$\alpha_{yo}$  – начальный коэффициент расплавления при сварке дугой с разнополярными импульсами тока, г/(А·ч);

$\alpha_{rp}$  – аналогичный коэффициент для дуги прямой полярности;

$\alpha_{po}$  – начальный коэффициент расплавления для дуги обратной полярности.

Согласно формуле (2)  $\alpha_{po} = 11,6 \pm 0,4$  г/(А·ч) и не зависит от тока.

Зависимость  $\alpha_{rp}$  от тока описывается формулой (3), приведенной в 1 главе. В данном случае, поскольку расчеты параметров будут вестись с помощью компьютерной программы, нет смысла выводить конечную формулу. Расчеты начального коэффициента расплавления для прямой полярности приведены в табл.10.

Таблица 10

Результаты расчета  $\alpha_{rp}$  по формуле (3)

Ток, А	Диаметр электрода, мм			
	2	3	4	5
200	13,15	10,8	9,64	8,95
300	16,6	13,1	11,3	10,3
400	20,0	15,3	13,0	11,6
500	23,4	17,6	14,65	12,9
600	26,9	19,8	16,3	14,3
800	33,7	24,3	19,7	16,9

Были выполнены расчеты начального коэффициента расплавления для  $\varepsilon = 75\%$  (табл. 11).

Расчетные зависимости для  $\alpha_y$  при  $\varepsilon = 75\%$ .

Ток, А	Диаметр электрода, мм			
	2	3	4	5
200	12,8	11,0	10,1	9,6
300	15,4	12,7	11,4	10,6
400	17,9	14,4	12,7	11,6
500	20,5	16,1	13,9	12,6
600	23,0	17,8	15,1	13,6
800	28,1	21,1	17,7	15,6

Начальный коэффициент расплавления уменьшается с увеличением диаметра электрода.

На основе изучения особенностей расплавления электродного металла можно повысить эффективность некоторых процессов сварки. Результата можно добиться, например, учитывая особенности двухдуговой двухсторонней сварки [9]. Двухсторонняя сварка тавровых соединений позволяет повысить производительность труда, но при ее реализации имеются ряд трудностей. В данной работе был предложен новый способ двухсторонней сварки тавровых соединений ( см. Приложение).

## Выводы по главе II

1. На основе анализа графических зависимостей коэффициента расплавления от тока получена формула для оценки роли нагрева вылета производительности расплавления электрода при сварке под флюсом.
2. Применение формулы для коэффициента расплавления вылета для тонкой электродной проволоки показало, что она дает более высокие значения, по сравнению с данными, полученными при анализе графических зависимостей.

3. Применение формулы для единичного сопротивления вылета, полученную для сварки тонкими проволоками, дает удовлетворительные результаты.
4. Предложена методика расчета начального коэффициента расплавления электрода для нулевого вылета при сварке дугой с разнополярными импульсами тока. Совместно с методиками расчета приращения коэффициента расплавления за счет вылета это позволяет рассчитывать скорость расплавления электродов при любом соотношении длительности импульсов.
5. На основе изучения особенностей расплавления электродов разных диаметров предложен способ двухсторонней сварки тавровых соединений.

## ГЛАВА III. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ

### 3.1. Проплавленияющая способность сварочной дуги под флюсом

Для оценки проплавленияющей способности и эффективности сварочных процессов следует использовать объективные критерии. Такие критерии подробно рассмотрены в работе [10]. К ним относятся скорость образования соединения, удельная энергия сварки и частота сварки. По аналогии с удельной энергией соединения можно использовать удельные показатели наплавленного и проплавленного металлов, расхода других сварочных материалов.

Анализ данных по режимам односторонней автоматической сварки под слоем флюса без разделки кромок листов на обратной полярности, приводимых в справочной литературе [8], дал следующие результаты: используемые токи значительно превышают токи при сварке неплавящимся электродом. Так для сварки толщины 4 мм проволокой 2 мм средний ток 387 А, а для толщины 6 мм -460 А. Возможность такого повышения тока, по-видимому, связана с особенностями приложения давления дуги при сварке плавящимся электродом. С учетом большей величины катодной мощности дуги это приводит к значительному росту свариваемой толщины. Скорость соединения на толщине 4 мм составляет  $J=0,44 \text{ см}^2/\text{с}$ , что примерно в 3 раза выше, чем при сварке неплавящимся электродом. Удельная энергия сварки составляет примерно  $E= 22,43 \text{ кДж/см}^2$ , что в 2,5 раза больше. Таким образом, сварка плавящимся электродом позволяет повысить эффективную мощность дуги и скорость соединения, но тепловая эффективность процесса снижается, термическое воздействие на свариваемый металл увеличивается.

Предельная толщина без разделки кромок, свариваемая таким способом с одной стороны, составляет 10 мм. При этом используется проволока диаметром 5 мм и ток 960 А. Скорость соединения достигает около  $J=1,0 \text{ см}^2/\text{с}$ , а удельная энергия сварки  $E=32,8 \text{ кДж/см}^2$ .

Примерно для таких же условий при сварке дугой переменного тока на толщине 10 мм достигается на токе 725 А скорость соединения  $J=0,83 \text{ см}^2/\text{с}$  и удельная энергия 25,9 кДж/см<sup>2</sup>. Однако в этом случае детали должны собираться с достаточно большим зазором и механизм образования проплавления существенно отличается от случая с плотно собранными кромками. Образование шва во многом обусловлено попаданием в зазор большого количества электродного металла. Об этом свидетельствует и тот факт, что подобным способом может быть сварена без разделки кромок толщина 20 мм на токе 975 А. При этом скорость соединения остается на уровне  $J=0,83 \text{ см}^2/\text{с}$ , удельная энергия сварки возрастает до 42,7 кДж/см<sup>2</sup>.

Представляет интерес анализ режимов двухсторонней сварки под флюсом. Сварка велась на переменном токе проволокой 5 мм. При анализе использовали предположение, что режим сварки одного прохода обеспечивает провар 50% толщины пластины. Сварка первого прохода производится на примерно 30% меньшей погонной энергии, чем второго. Поэтому для оценки энергозатрат выбирали полусумму токов и скоростей сварки. В результате получили удельную энергию сварки одного прохода  $E=43,4 \text{ кДж/см}^2$  при скорости соединения  $J=0,48 \text{ см}^2/\text{с}$ . Таким образом, энергозатраты при двухсторонней сварке существенно выше, чем при односторонней.

При сварке таким способом толщины 20 мм достигается 54,7 кДж/см<sup>2</sup> при скорости соединения  $J=0,58 \text{ см}^2/\text{с}$ . Предельная свариваемая таким способом толщина 22 мм.

Был также выполнен анализ режимов тандемной двухдуговой односторонней сварки под флюсом пластин толщиной 8 и 14 мм на переменном токе с использованием флюсо-медной подкладки. Было установлено, что существенное увеличение скорости соединения (с  $J=1,78 \text{ см}^2/\text{с}$  до  $J=2,66 \text{ см}^2/\text{с}$ ) на толщине 8 мм приводит к росту удельной энергии сварки на 11%. При увеличении толщины до 14 мм использование энергии дуг повышается и достигается скорость соединения  $J=4,66 \text{ см}^2/\text{с}$  при

удельной энергии 28,4 кДж/см<sup>2</sup>. Следует отметить, что такие высокие скорости соединения были получены в условиях сварки с зазором 3-5 мм, то есть сварка происходила по схеме, близкой к схеме линейного источника тепла. По сравнению с односторонней однодуговой сваркой в аналогичных условиях скорость соединения выросла в 2,5 раза при росте удельной энергии сварки на 40%. Таким образом, изменение схемы процесса и использование сварки по зазору двумя дугами позволяет добиться скорости соединения в несколько см<sup>2</sup>/с.

Тандемная двухсторонняя сварка под флюсом позволяет сваривать без разделки кромок толщины до 30 мм. При таком способе сварки скорость соединения повышается с ростом толщины металла. Удельная энергия сварки мало зависит от свариваемой толщины. По сравнению с односторонней тандемной сваркой малых толщин 8-14 мм скорость соединения снизилась более, чем в 2 раза, а удельная энергия сварки всего стыка увеличилась примерно в 4 раза. Таким образом, нет смысла сваривать небольшие толщины двухсторонней тандемной сваркой. Это же, по-видимому, относится и к односторонней тандемной сварке небольших толщин.

При двухдуговой сварке со скоростью 140 м/час шов формируется неудовлетворительно, поэтому для обеспечения более высоких скоростей сварки при хорошем формировании шва используются 3 дуги. Все дуги горят в одну общую ванну. Трехдуговая сварка толщин 12- 17 мм обеспечила скорость соединения в пределах 5-6 см<sup>2</sup>/с. Токи дуг составляли порядка 1000-1100 А. Оказалось что для такого диапазона толщин удельная энергия сварки минимальна и составляет примерно  $E=20$  кДж/см<sup>2</sup>. Таким образом, распределение сварочной мощности в направлении сварки является одним из наиболее эффективных способов повышения скорости соединения и снижения удельной энергии сварки.

Данные о возможностях сварки под слоем флюса без разделки кромок сведены в табл.12

Зависимости энергетических характеристик при различных способах  
сварки под флюсом

Характеристика способа	Максимальная толщина, мм	Скорость соединения $J$ , $\text{см}^2/\text{с}$	Удельная энергия сварки $E$ , $\text{кДж}/\text{см}^2$
Односторонняя сварка дугой обратной полярности	10	1,0	32,8
Односторонняя сварка дугой переменного тока	10	0,83	25,9
Двухсторонняя сварка	20	0,58	54,7
Тандемная двухдуговая односторонняя	14	4,66	28,4
Тандемная двухдуговая двухсторонняя	30	2,3	113,6
Тандемная трехдуговая сварка односторонняя	17	6,0	20,0

Из табл. 12 следует, что показатели эффективности сварки изменяются в широких пределах в зависимости от способа сварки. Для рассматриваемого нами случая двухсторонней сварки без разделки кромок ориентиром для выполнения расчетов следует принять скорость соединения  $J=0,58 \text{ см}^2/\text{с}$ , и удельную энергию сварки  $E=54,7 \text{ кДж}/\text{см}^2$ .

### 3.2. Применение различных схем расчета температурного поля при сварке

В связи со сложностью процессов при формировании сварочной ванны, для тепловых расчетов все больше применяют экспериментально-расчетные методы. Сущность этих методов заключается в том, что опираясь на результаты измерений температур в сварочном теле, с помощью какой-либо математической модели предсказать другие результаты в интересующей

области. Одним из направлений является применение так называемых эквивалентных источников теплоты [11]. Определение эквивалентного источника теплоты не представляется удачным, так как предполагается априори, что он должен давать адекватное описание температурного поля в широкой области. Однако доказать такую адекватность весьма сложно. Целесообразнее такой подход называть методом приведения математической модели по имеющимся экспериментальным данным [12]. Поскольку ни одна математическая модель не может быть абсолютно адекватной, процедуры ее приведения являются универсальными. То есть, какой бы сложной и приближенной к реальности не была математическая модель, она не исключает ее уточнения с помощью метода приведения.

Одним из вопросов применения математических моделей распространения тепла при сварке является, например, учет теплоотдачи с поверхности свариваемого изделия. Теплоотдача играет тем большую роль, чем меньше толщина свариваемого металла. Теплоотдачу при сварке следует воспринимать не только в традиционном смысле, но под ней следует понимать и передачу мощности в сварочную оснастку: прижимы, подкладки и т.д. При этом сложно представить создание математических моделей, учитывающих специфику каждого конкретного случая сварочного процесса.

В связи с этим пришло уточненное понимание эффективной мощности сварочного источника тепла. Если ранее под эффективной мощностью понималась мощность, вносимая в свариваемое изделие, то в настоящее время предложено не включать в нее, так называемые, мощности уноса [13]. Одним из видов мощностей уноса и является теплопередача с поверхности изделия. Сварочный процесс проходит обычно в установившемся тепловом состоянии, когда теплопередача с поверхности практически не изменяется. Именно поэтому ее можно отнести к потерям уноса и не включать в эффективную мощность сварочного источника тепла.

Метод приведения, основанный на измерении температур в изделии позволяет не учитывать в расчетах теплоотдачу с поверхности изделия.

Поэтому значительный интерес представляет сравнение результатов применения метода приведения (эквивалентных источников) для различных математических моделей.

В работе [11] приведены результаты построения математической модели на основе объемного полуэллипсоидного источника тепла. Размеры полуосей источника примерно равны полученному провару и половине ширины шва. При расчетах учитывался коэффициент поверхностной теплоотдачи, причем отыскивалось его значение, обеспечивающее максимальную сходимость расчетных и опытных термических циклов. При толщине наплавляемой пластины 16 мм ток дуги составлял  $I_d = 714$  А, напряжение дуги  $U_d = 32$  В. Мощность сварочной дуги составляла 22,8 кВт. Скорость сварки была в опытах  $V_c = 0,67$  см/с. Номинальные значения теплофизических коэффициентов принятые в работе [11]: теплопроводность  $\lambda = 0,32$  Вт/(см °С), объемная теплоемкость  $c_p = 4,5$  Дж/(см<sup>3</sup> °С). По этим данным рассчитали, что коэффициент температуропроводности, необходимый для наших расчетов,  $a = 0,071$  см<sup>2</sup>/с.

Идея разработки расчета температур с помощью, так называемого, эквивалентного источника теплоты заключается в использовании реальной формы проплавления сварочной ванны для определения характеристик температурного поля в других зонах сварного соединения. Такой подход можно назвать экспериментально-расчетным, и он давно предложен в той или иной форме различными авторами. Так Н.Н. Рыкалин с соавтором [27] предлагал определять термические циклы по очертаниям сварочной ванны.

В Тольяттинском государственном университете (ТГУ) подобный подход разрабатывался проф. Сидоровым В.П. и получил название «метода приведения». Сущность его в том, что в расчетах используются не реальные характеристики источников тепла, а модельные, полученные на основании использования той или иной математической модели. Отличие подхода, используемого в работе [11] заключается в том, что создается новая математическая модель, которая затем все равно «приводится» к реальным

параметрам сварочной ванны. В то время как подход ТГУ заключается в использовании уже апробированных классических моделей. В принципе, «метод приведения» следует использовать для любой математической модели. Можно утверждать, что сравнение расчетных и экспериментальных данных – это также есть метод приведения.

Определим показатели эффективности процесса сварки, для которого исследовалось температурное поле в работе [11]. Провар  $H=9,5$  мм дает при скорости сварки  $0,67$  см/с скорость соединения  $J = 0,67 \cdot 0,95 = 0,64$  см<sup>2</sup>/с. Эффективная мощность дуги при КПД  $0,9$   $q_{и}=19,8$  кВт. Тогда удельная энергия сварки одного прохода  $E=19,8/0,64 = 31$  кДж/см<sup>2</sup>. Такие затраты энергии близки к приведенным выше в табл. 12 данным для двухсторонней сварки. Площадь проплавления основного металла при ширине шва  $20$  мм можно оценить как площадь полуэллипса

$$F_o = 3,1415 \cdot 10 \cdot 9,5 / 2 = 149 \text{ мм}^2.$$

Тогда частота сварки

$$f = 0,64 / 1,49 = 0,43 \text{ Гц}.$$

Частота сварки показывает, что за одну секунду образуется соединение площадью в  $0,43$  поперечного сечения проплавления основного металла.

Средняя ширина шва

$$B_{cp} = F_o / H = 149 / 9,5 = 15,7 \text{ мм}.$$

Удельный расход расплавленного основного металла

$$g = B_{cp} \cdot \rho = 1,57 \cdot 7,8 = 12,25 \text{ г/см}^2.$$

Коэффициент расплавления основного металла

$$\alpha_o = M_o / I_d \cdot t = F_o \cdot V_c \cdot \rho / I_d = 0,0109 \text{ г/(А} \cdot \text{с)} = 39,26 \text{ г/(А} \cdot \text{ч)}.$$

Необходимость использования выше рассчитанных коэффициентов обоснована в работе [34].

Следовательно, коэффициент расплавления основного металла в данном случае намного превышает аналогичный коэффициент для стержневого электрода. В работе [6] это объяснено более низким

теплосодержанием металла сварочной ванны по сравнению с теплосодержанием капель электродного металла.

В работе [11] данные о скорости подачи электродной проволоки не приведены, однако по сварочному току и вылету электрода ее можно рассчитать с помощью формулы (2). Получили суммарный коэффициент расплавления  $\alpha_p = 14,79 \text{ г}/(\text{А}\cdot\text{ч})$ . Этому коэффициенту соответствует скорость подачи электрода  $V_3 = 3 \text{ см}/\text{с}$ . Площадь поперечного сечения наплавленного металла определяем в предположении, что потери на угар и разбрызгивание отсутствуют. Тогда  $F_n = 0,56 \text{ см}^2$ . Доля участия основного металла в металле шва составила  $\psi_0 = 1,49/(1,49+0,56) = 0,73$ . Термический КПД процесса сварки, определенный при теплосодержании металла сварочной ванны  $H=7800 \text{ Дж}/(\text{см}^3\cdot\text{С})$  и эффективном КПД  $\eta_{и}=0,9$  составляет  $\eta_{т}= 0,379$ .

В качестве альтернативного источника теплоты в данной работе вначале приняли нормально круговой источник (НКИ) на поверхности плоского слоя, адекватность применения которого в широком диапазоне режимов и условий сварки применительно к аргонодуговой сварке неплавящимся электродом стыковых соединений без разделки кромок показана в работе [10].

Поверхностный источник тепла может рассматриваться, по-видимому, в случае сварки под флюсом, только при минимально возможных токах дуги при двухсторонней сварке металла небольшой толщины. Необходимо отметить, что для сварки под флюсом, математическая модель, должна учитывать основную особенность процесса, а именно заглублиение источника тепла в металл. Подобная модель применялась для описания процесса сварки алюминиевого сплава погруженной дугой, и она дала хорошее описание наблюдаемой на практике бочкообразной формы поперечного сечения шва [16]. Применение модели поверхностного НКИ для оценки осевого теплового потока приводит к его значениям порядка  $50\ 000 \text{ Вт}/\text{см}^2$  [28]. Высокое значение осевого теплового потока как бы компенсирует эффект от погружения дуги в сварочную ванну.

Совпадение расчетного и опытного проваров получили при мощности распределенного источника 19 кВт, что с учетом эффективного КПД близко к мощности полуэллипсоидного источника. Максимальный провар имеет место при координате X источника  $x = -2 \dots 3$  см. Важно также, что получили практическое совпадение и для ширины шва  $B = 20,1$  мм.

Расчет по схеме точечного источника, движущегося на поверхности полубесконечного тела с ограниченной скоростью выполнялся по алгоритму, описанному в работе [17]. Он дал значение провара 9,65 мм, что также близко к опытному провару 9,5 мм. Радиус изотермы 500 °С для точечного источника составил 31,3 мм, что близко к значению, полученному в [11]. Сравнительные данные для исследованных расчетных схем приведены в табл. 13.

Таблица 13

Данные параметров сварки и шва по разным расчетным схемам

Параметр	Опыт	Эквивалентный	Точечный	НКИ
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 °С, мм	30	30	31,3	36,5
Длина зоны 500 °С, мм	335	335	180	190
Время 850-500 (°С)	0	30	0	6
$\Delta T_1$ $z = 16$ мм, $y = 0$ ,	650	690	566	1108
$\Delta T_2$ $z = 16$ мм, $y = 15$ мм,	470	460	303	618
$\Delta T_3$ $z = 0$ $y = 19$ мм	340	350	403	498
$T_4$ $z = 0$ $y = 33$ 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 °С определялось при  $z = 1,6$  см,  $y = 0$  см

При сравнении температур в точках опытных измерений термических циклов с расчетными, пришлось учесть, что только небольшая часть циклов

была снята в процессе наплавки, а более значительная после выключения дуги. Температуры начали рост примерно через 40 секунд после начала сварки, т.е. когда дуга прошла примерно 270 мм при длине образца 450 мм. Поэтому выбирались значения температур для момента времени 60 секунд, то есть в сечении пластины на расстоянии 134 мм позади оси дуги. Начальная температура пластины в опытах приведена 50 градусов. Это значение вычиталось из значений, приведенных на графиках. При расчетах по разным моделям также определялось приращение температур.

Расчетные параметры для двух классических схем (точечного и нормально-кругового) достаточно близки между собой. Между результатами по схеме НКИ и эквивалентным источником расхождения в температурах достигают десятков процентов.

Можно отметить, что коэффициент поверхностной теплоотдачи, полученный в работе [11] и равный  $0,025 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$  представляется слишком великим. Составив уравнение баланса, легко установить, что при таком значении средний перепад температур между пластиной и окружающей средой в процессе опыта или расчета должен составлять примерно 50 градусов. В то же время по средним температурам эта разница составляет порядка 200 градусов.

Различие температур при использовании классических схем и полуэллипсоидным источником теплоты можно объяснить слишком низкой концентрацией энергии в выбранном эквивалентном источнике. Объем полуэллипсоида с источником теплоты составляет  $2 \text{ см}^3$ . При мощности источника 19 кВт, получаем среднее теплосодержание стали внутри источника  $9500 \text{ Дж}/\text{см}^3$ . Теплосодержание стали при температуре плавления  $7800 \text{ Дж}/\text{см}^3$ . Таким образом, перегрев металла в источнике составляет 1,22, что приводит к занижению температур вне пределов сварочной ванны.

Следовательно, введение источника теплоты в виде полуэллипсоида с геометрическими характеристиками провара пока не является достаточно обоснованным для определения температурного поля вне зоны этого

источника. При введении приведенных источников теплоты и определении их характеристик по размерам провара нет необходимости учитывать в решении теплоотдачу с поверхности металла, так как ее действие уже учтено в уменьшении размеров шва. В качестве математической модели, для которой можно использовать метод приведения источника тепла вполне подходит классическая схема НКИ на поверхности плоского слоя, параметры которого могут быть определены по ширине шва и провару.

### **3.3. Расчет эквивалентных эффективных мощностей в зависимости от полярности дуги**

Для создания компьютерной программы расчета параметров сварки под флюсом необходима оценка провара основного металла в зависимости от полярности дуги. Известно, что при расчете эффективной мощности сварочной дуги с плавящимися электродами полярность тока не учитывается. В то же время, как было показано выше, провар основного металла при сварке под флюсом выше в дуге обратной полярности, на которой в большинстве случаев и ведется сварка. В расчетах провара это учитывается с помощью эмпирических коэффициентов, зависящих от полярности [2]. В работах [5,6] было показано, что разница в проварах, обусловлена различным влиянием мощности, передаваемой изделию с электродного металла, на провар по сравнению с мощностью от приэлектродной области дуги. Поэтому провар при сварке плавящимся электродом целесообразно было бы представлять как сумму проваров от двух источников тепла с различными параметрами распределения. Однако такая физическая модель ранее аналитически не исследовалась. К трудностям создания такой модели относятся неопределенность параметров сосредоточенности таких источников тепла. Для их назначения пока недостаточно информации. Еще одной трудностью является необходимость учета погружения дуги в сварочную ванну. Хотя подобные модели уже исследовались применительно к сварке неплавящимися электродами и

возможны также и применительно для сварки плавящимся электродом. На данном этапе целесообразно установить принципиальную правильность самого подхода к учету различия влияния электродного металла на провар при сварке.

С этой целью были проанализированы коэффициенты пропорциональности между токами и проварами на различных полярностях, приведенные в работе [2], путем расчета их отношений. Эти соотношения справедливы для способа двухсторонней сварки пластин. Результаты приведены в табл. 14 [7].

Таблица 14

Соотношение эмпирических коэффициентов пропорциональности между током и проваром

Диаметр электрода, мм	$K_o/K_{\sim}$	$K_{\Pi}/K_{\sim}$	$K_o/K_{\Pi}$
	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:  $K_o/K_{\sim}$  - соотношение проваров на обратной полярности и переменном токе;  $K_{\Pi}/K_{\sim}$  тоже для прямой полярности;  $K_o/K_{\Pi}$  – соотношение проваров на обратной и прямой полярности.

Таким образом, на обратной полярности обеспечивается провар в среднем на 30% больший, чем на прямой. Примерно такое соотношение

должна обеспечивать методика расчета провара для прямой и обратной полярностей.

Для реализации может быть предложен, в частности, следующий подход. Известно, что вольтов эквивалент эффективной анодной мощности, определенный по коэффициенту плавления электрода при нулевом вылете близок к  $U_{за} = 6 \text{ Вт/А}$  и практически не зависит от тока [21]. В то же время суммарный вольтов эквивалент приэлектродных областей дуги составляет примерно  $22 \text{ Вт/А}$  и равен сумме приэлектродных падений напряжения [3].

Эта сумма сравнительно легко определяется с помощью опыта короткого замыкания дуги. Следовательно, вольтов эквивалент катодной области может быть принят  $U_{эк} = 16 \text{ Вт/А}$ . Далее было сделано допущение, что изделию передается 100 % мощности его приэлектродной области. Доля мощности, вносимая остальными областями должна определяться расчетным путем на основе экспериментальных данных. Можно только утверждать, что эта доля также должна быть одинаковой и не зависеть от полярности дуги. В результате получили простые формулы для определения вольтова эквивалента приведенной эффективной мощности дуги под флюсом.

На обратной полярности

$$U_o = U_{эк} + \varphi (U_d - U_{эк}). \quad (20)$$

На прямой полярности

$$U_{п} = U_{за} + \varphi (U_d - U_{за}). \quad (21)$$

Коэффициент  $\varphi$  оценивается на основе экспериментальных данных. Его можно назвать коэффициентом эффективности передачи мощности от электродного металла и столба дуги изделию. Если предлагаемый подход правилен, то значения коэффициента не должны зависеть от полярности дуги. Это обусловлено одинаковым механизмом передачи энергии этой составляющей при различной полярности дуги. Получаемые значения  $U_o$  и  $U_{п}$  можно назвать приведенными вольтовыми эквивалентами эффективной мощности дуги обратной и прямой полярности соответственно.

Результаты расчетов эффективных мощностей и их соотношений при  $\varphi = 0,4$  приведены в табл. 15

Таблица 15

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

d, мм	I <sub>д</sub> , А	Полярность	q <sub>и</sub> , кВт	q <sub>о</sub> /q <sub>п</sub>
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 табл. 15 следует, что данный подход вполне работоспособен, отношение эффективных мощностей соответствует соотношению проваров при двухсторонней сварке пластин. Для дальнейшего уточнения методики необходима математическая модель проплавления изделия при двухсторонней сварке. Коэффициент  $\varphi$  свидетельствует о том, что составляющая мощности от электродного металла влияет на провар в 2,5 раза меньше, чем мощность приэлектродных областей. Это близко к соотношениям, полученным в работе [5] на основе другого подхода.

Таким образом, провар от дуги под флюсом обратной полярности в среднем на 30% выше провара от дуги прямой полярности. Предложен один из вариантов методики расчета доли эффективной мощности, вносимой в изделие приэлектродной областью по вольтовым эквивалентам электрода, обеспечивающий учет разницы проваров при различных полярностях дуги.

Коэффициент полезного действия общей мощности электродных капель и столба дуги, дающий удовлетворительное совпадение отношения опытных значений проваров и эффективных мощностей составляет примерно

40%. С помощью такой методики можно рассчитывать провар и температуры при сварке по схеме точечного источника тепла на поверхности плоского слоя.

### 3.4. Исследование провара при сварке с использованием схемы НКИ

Теоретически исследовали данные по проварам, приведенным в работе [4] для прямой и обратной полярностей дуги. Использовали компьютерную программу, НКИ, разработанную на кафедре СОМДиРП ТГУ [10]. Для тока 500 А и напряжения дуги 29 В, как указано в работе [4] принимали эффективный КПД  $\eta_{\text{и}}=0,9$ . Получили эффективную мощность 13050 Вт. При расчетах принимали объемную теплоемкость  $c_p=5,0$  Дж/(см<sup>3</sup>С), коэффициент температуропроводности  $a =0,08$  см<sup>2</sup>/с. Результаты расчетов провара при изменении осевого теплового потока приведены в табл. 16.

Таблица 16

Влияние осевого теплового потока  $q_0$ , на провар

Провар Н, мм	Параметр			
	$q_0$ , Вт/см <sup>2</sup>	X, см	Dн, см	K, см <sup>-2</sup>
6,6	50000	1,6	1,0	12
6,5	40000	1,6	1,12	9,6
6,3	30000	1,6	1,29	7,2
2,8	4200	2,8	3,44	1,0
5,5	10000	2,4	2,2	2,4
5,2	8000	2,8	2,49	1,94
4,7	6000	3,2	3,28	1,12

Примечание: В таблице приведены координаты X точки с максимальным проваром. Dн – диаметр пятна нагрева, K – коэффициент сосредоточенности.

Полученные данные показывают, что при больших значениях осевого теплового потока провар мало зависит от его плотности. Существенное уменьшение имеет место только при плотностях ниже 6000 Вт/см<sup>2</sup>. По-видимому, с помощью схемы НКИ сложно описать проплавление металла при сварке под флюсом такой небольшой толщины из-за эффекта погружения активного пятна дуги в металл. При увеличении тока до 650 А пропорционально увеличили эффективную мощность, которая составила 16965 Вт. При осевом тепловом потоке 6000 Вт/см<sup>2</sup>, который дал наилучшее совпадение при токе 500 А, получили значение провара 6,1 мм, в то время как опытное значение 8,8 мм. Таким образом, прибавление мощности не дает при расчете нужного эффекта, что связано с влиянием давления дуги, которое не учитывается в расчете. Известно, что давление дуги пропорционально квадрату сварочного тока. По-видимому, пропорционально квадрату тока растет и погружение дуги в металл и соответственно провар. Поэтому можно предположить, что провар в области неполного проплавления увеличивается пропорционально току в кубической степени.

Данные работы [4] для прямой и обратной полярности по проварам представляли в виде кубической функции от тока

$$H = K_1 \cdot I_d^3, \quad (22)$$

где  $K_1$  – коэффициент пропорциональности, мм/кА<sup>3</sup>;

Значения коэффициента  $K_1$  рассчитывали с помощью компьютерной программы аппроксимации степенных функций, приведенной в [10].

Результаты определения коэффициента пропорциональности и сравнения расчетных и опытных данных приведены в табл. 17.

Таблица 17

Результаты аппроксимации провара кубической функцией

Ток·10 <sup>-2</sup> , А	5,0	5,5	6,0	6,5
	Обратная полярность			
H, мм	4,29	5,54	7,01	8,7
$K_1$	0,0343	0,0333	0,0324	0,0317
Hр, мм	4,11	5,47	7,1	9,03

Отклон., %	4,2	1,3	1,4	3,4
	Прямая полярность			
H, мм	2,79	3,79	5,01	6,48
$K_1$	0,0223	0,0228	0,0231	0,0236
Hр, мм	2,88	3,83	4,97	6,32
Отклон., %	3,2	1,0	0,8	2,5

Примечание: H – опытные значения провара, Hр – расчетные значения по формуле.

При расчетах в таблице ток брался в сотнях ампер. Среднее значение коэффициента  $K_1$  для обратной полярности  $K_1=0,0329$ , для прямой полярности  $K_1=0,023$ . Сходимость расчетных данных с опытными, предварительно аппроксимированными степенной функцией с искомыми коэффициентами очень хорошая. Это еще раз указывает на необходимость учета в расчетах погружения дуги в металл под действием создаваемого ей давления. Коэффициент пропорциональности будет зависеть от многих факторов: толщины металла, его теплофизических свойств, степени полярности дуги и др. В данном случае отношение коэффициентов пропорциональности получили равным 1,43 раза, что несколько выше чем отношения полученные при анализе данных, приведенных в работе [2]. Это можно объяснить небольшой толщиной пластин, использованных для наплавки (12 мм).

Интересно, что дуги с разнополярными импульсами тока для сварки алюминиевого сплава получена в работе [34] аналогичная формула, у которой показатель степени 2,46. Однако используемые токи в работе [34] не превышали 250 А, что свидетельствует о незначительном погружении дуги в сварочную ванну.

### **3.5. Определение показателей эффективности расплавления основного металла**

В работе [10] в качестве показателя эффективности проплавления основного металла предложено и обосновано понятие частоты сварки. Это отношение площади соединения в единицу времени к площади поперечного сечения основного металла. Размерность частоты сварки – Герц. Эта

величина скорости соединения, выраженная в площадях проплавления основного металла. Поскольку отношение площади сечения провара к глубине провара есть средняя ширина шва  $V_{ср}$ , то частоту сварки можно выразить

$$f = V_c / V_{ср}, \quad (23)$$

где  $V_c$ - скорость сварки.

Таким образом, частота сварки – это скорость сварки, выраженная через среднюю ширину шва.

При определении термического КПД процесса принималось, что теплосодержание сварочной ванны включает скрытую теплоту плавления. Таким образом  $H = 7800 \text{ Дж/см}^3$ . Эффективный КПД дуги  $\eta_{и} = 0,9$  при напряжении дуги 29 В. Поперечное сечение проплавленного основного металла и средняя ширина шва принимались по данным работы [6].

Результаты расчетов сведены в табл. 18.

Таблица 18

Показатели эффективности при наплавке под флюсом

Ток, А	Обратная полярность						
	$F_o, \text{ см}^2$	$\alpha_o$	$q_{ж}, \text{ Вт}$	$q_{и}, \text{ Вт}$	$\eta_{т}$	$V_{ср}, \text{ мм}$	$f, \text{ Гц}$
500	0,61	26,9	3965	13050	0,303	14,2	0,59
550	0,76	31,1	4940	14355	0,344	13,7	0,61
600	0,90	33,3	5850	15660	0,373	12,8	0,65
650	1,07	36,5	6955	16965	0,410	12,3	0,68
500	Прямая полярность						
	0,34	15,1	2210	13050	0,169	12,2	0,68
	0,46	18,7	2990	14355	0,208	12,1	0,69
	0,59	22,0	3835	15660	0,245	11,8	0,70
	0,72	24,7	4680	16965	0,276	11,1	0,75

Частота сварки характеризует эффективность использования расплавления основного металла для образования соединения. Чем выше частота сварки, тем эффективнее используется расплавленный основной металл. Из табл.18 видно, что с увеличением тока дуги термический КПД и

частота сварки увеличиваются. В ситуации, когда скорость сварки не изменяется, имеет место такое совпадение. Однако термический КПД показывает не эффективность расплавления основного металла, а эффективность использования эффективной мощности для расплавления. Изменение термического КПД происходит с более высокой интенсивностью, чем частоты сварки. В целом изменение частоты сварки с увеличением тока незначительно, так как с увеличением провара возрастает и площадь проплавления основного металла. Отклонение максимального отклонения частоты сварки от среднего значения не превышает 7-8%.

Выводы по главе 3.

1. Исходя из новых предпосылок подтверждена гипотеза о различном влиянии мощности жидкого электродного металла и столба дуги на провар по сравнению с мощностями приэлектродных областей дуги.
2. При расчете температур при автоматической сварке под флюсом недостаточно учитывать распределенность теплового потока в пятне нагрева и в большинстве случаев необходимо учитывать погружение активного пятна дуги в металл сварочной ванны.
3. Зависимость провара от тока дуги при двухсторонней сварке стыковых соединений с высокой точностью можно представить в виде кубической функции тока, как для прямой, так и для обратной полярностей. Это позволяет значительно сократить объем экспериментальных исследований при отработке режимов сварки.
4. Полученные зависимости могут быть использованы при проектировании параметров сварки дугой с разнополярными импульсами тока.

## ГЛАВА IV. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СВАРКИ РАЗНОПОЛЯРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ТОКА.

### 4.1. Расчет температур при сварке с учетом полярности дуги

Явление различия провара в зависимости от полярности дуги можно объяснить различной концентрацией мощности, выделяемой в изделии приэлектродной областью дуги и жидким металлом с электрода. Поэтому учесть разность проваров можно, используя при расчете различную сосредоточенность теплового потока источника тепла.

Сварка в  $\text{CO}_2$  плавящимся электродом преимущественно ведется дугой обратной полярности. Проплавляющая способность такой дуги значительно выше, чем при сварке неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона. В последнем случае согласно ГОСТ -14771 [29] сварка с двух сторон предусмотрена для толщин до 6 мм. При сварке плавящимся электродом такая толщина ограничена 12 мм (рис. 13).

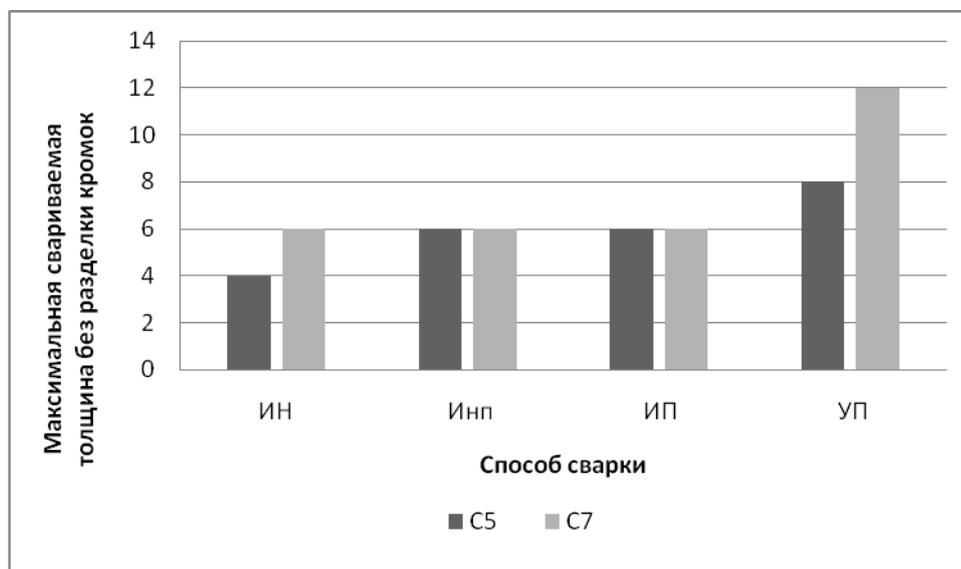


Рис.13 . Диаграммы допустимых толщин, свариваемых без разделки кромок

Для оценки перспективности такой методики были выполнены расчеты для двусторонней сварки плавящимся электродом в  $\text{CO}_2$  пластин толщиной 6,0 мм. Режимы сварки дугой обратной полярности взяты из работы [6]. Диаметр электродной проволоки 1,6 мм, ток 280 -300 А,

напряжение дуги 28-30 В, скорость сварки 30-35 м/час. Полная мощность дуги  $P_d \approx 8410$  Вт.

Провар при таком способе обычно составляет 60% толщины. Таким образом, для данной толщины ориентировочный провар 3,6 мм. Тогда сварке на прямой полярности должен соответствовать при  $\beta = 1,3$  провар  $H = 2,8$  мм.

При расчете эффективной мощности принимали эффективный КПД дуги  $\eta_n = 0,8$ . Тогда эффективная мощность дуги.

$$q_n = 8410 \cdot 0,8 = 6728 \text{ Вт}.$$

Также эффективную мощность при сварке плавящимся электродом более точно можно определить через сумму приэлектродных падений напряжения и мощность, поглощаемую вылетом электрода. При этом мощность, поглощаемая вылетом, будет незначительно отличаться для обратной и прямой полярностей дуги.

При расчетах использовали схему движущегося нормально-кругового источника тепла на поверхности плоского слоя [7]. Погружение активного пятна дуги в металл не учитывалось, так как использовался минимальный ток дуги со сравнительно низким давлением. Исследовали влияние осевого теплового потока на провар при постоянной эффективной мощности. Коэффициент сосредоточенности и диаметр пятна нагрева определялись по известным формулам [7].

Теплофизические свойства принимались для низкоуглеродистой стали: коэффициент температуропроводности  $a = 0,08$  см<sup>2</sup>/с, объемная теплоемкость,  $C_v = 5,0$  Дж/(см<sup>3</sup> °С). Расчетные данные приведены на рис.14, 15.

Для обратной полярности тока выбранному провару соответствует осевой тепловой поток 6,6 кВт/см<sup>2</sup>, для прямой 4,8 кВт/см<sup>2</sup>.

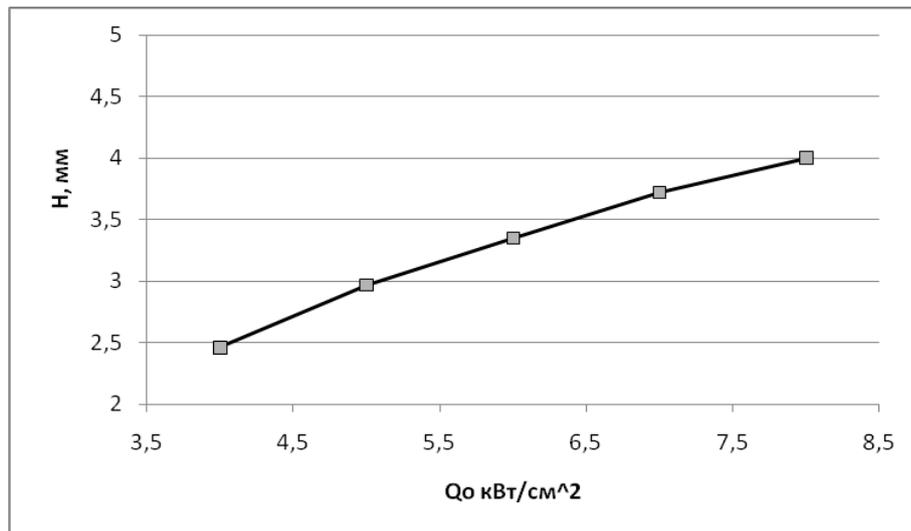


Рис. 14. Зависимость провара от осевого теплового потока

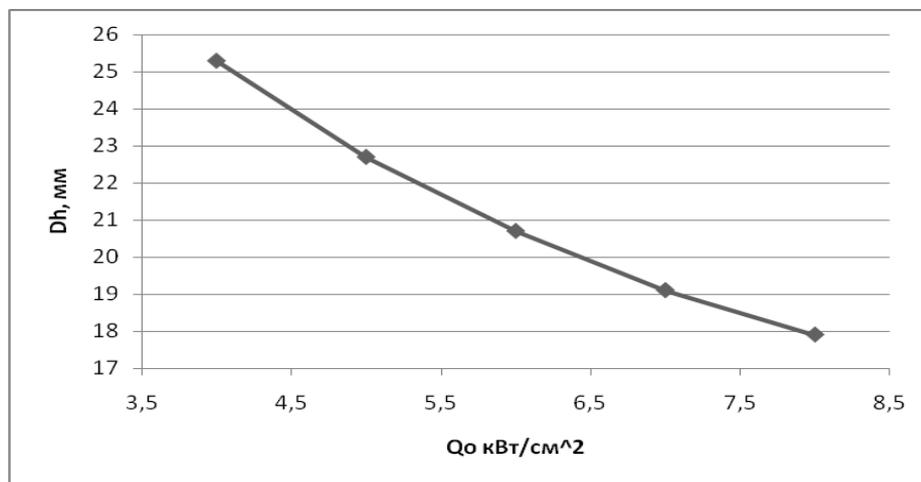


Рис. 15. Зависимость диаметра пятна нагрева от осевого теплового потока

Следует отметить, что для дуги прямой полярности с неплавящимся электродом в аргоне получены близкие значения осевого теплового потока  $Q_0 = 4,2 \text{ кВт/см}^2$  [7].

Сварка на прямой полярности в защитных газах в настоящее время практически не ведется, что связано с пониженной пространственной устойчивостью дуги. Однако с появлением сварочных инверторных источников питания, формирующих переменный ток с регулированием доли любой полярности, эта проблема в значительной степени решается. Примером тому является использование источников питания с разнополярными импульсами тока для сварки под флюсом [2]. Режимы с

преобладанием прямой полярности обеспечат повышение производительности сварки при заполнении разделки свариваемых кромок.

Проведенные расчеты показывают, что температуру при сварке плавящимся электродом в зависимости от полярности дуги следует определять, используя источники тепла с различной величиной осевого теплового потока.

#### **4.2. Эксперименты по наплавке тонкой проволокой**

Для определения возможности использования для автоматической сварки под флюсом расчетной схемы нормально-кругового источника тепла на поверхности плоского слоя проводили эксперименты в заводской сварочной лаборатории ОАО «Тяжмаш». Для сварки использовали полуавтоматическую установку фирмы «Фрониус» для сварки тонкой проволокой. Установка была приспособлена для автоматической сварки. Наплавка велась на обратной полярности дуги. Диаметр электродной проволоки 1,2 мм. Для наплавки использовали пластины из стали 09Г2 размерами 100x150x10 мм. Параметры режимов определяли по приборам сварочной установки. Внешний вид установки представлен на рис. 16.



Рис. 16. Внешний вид установки для наплавки и сварки

После сварки измеряли среднюю ширину валика как среднее значение из трех измеренных по длине валика. Также измеряли выпуклость валика с помощью индикатора часового типа. Точность измерений составляла 0,2 мм. Внешний вид наплавленного валика представлен на рис. 17.



Рис. 17. Внешний вид наплавленного валика

Результаты проведения трех наплавов представлены в табл. 19

Таблица 19

Результаты экспериментов по наплавке

Ток дуги, А	Напряжение, В	Скорость сварки, см/с	Скорость электрода, см/с	Ширина валика, мм	Выпуклость, мм
Образец №1, импульс 5 единиц					
230	24,9	0,583	12,83	9,9	2,5
Образец №2, импульс 5 единиц					
230	24,9	0,583	12,83	9,2	2,5
Образец №3, импульс 0 единиц					
230	24,9	0,583	12,83	9,0	3,0

В третьем опыте изменились параметры импульсного режима произошло уменьшение ширины валика и увеличение выпуклости. Внешний вид валика хороший, процесс наплавки протекал стабильно. Данный способ наплавки тонкой проволокой может иметь определенные преимущества, так

как известно, что производительность расплавления тонкой проволоки выше, чем проволоки большего диаметра при равных токах.

Рассчитывали площадь наплавленного металла, используя геометрическую формулу  $F_H = 2B \cdot g / 3$ , где  $B$  – ширина валика, мм;  $g$  – выпуклость. Для расчетов использовали результаты опыта № 3. Получили  $F_H = 18$  мм<sup>2</sup>. После этого определяли коэффициент потерь на угар и разбрызгивание  $\psi_n$  по уравнению

$$(1 - \psi_n) = V_c F_H / V_3 F_3 = (0,583 \cdot 18) / (12,83 \cdot 1,13) = 0,72.$$

Получили высокое значение коэффициента потерь  $\psi_n = 28\%$ , что может быть отчасти обусловлено невысокой точностью определения площади наплавленного металла, которая должна определяться по шлифу.

Далее было опробована расчетная схема нормально-кругового источника тепла для проведенных опытов. Для этой цели также использовали данные опыта № 3. Вначале рассчитали эффективную мощность дуги  $q_{и}$ , приняв эффективный КПД дуги  $\eta_i = 0,9$ .

$$q_{и} = 230 \cdot 24,9 \cdot 0,9 = 5154 \text{ Вт.}$$

Теплофизические свойства стали принимали по данным работы [11]:  $\lambda = 0,32$  Вт/(см<sup>°С</sup>),  $c_p = 4,5$  Дж/(см<sup>3</sup>°С) Определяли осевой тепловой поток, который обеспечил бы полученную ширину валика. С помощью компьютерной программы, разработанной в ТГУ [20], получили, что при осевом потоке 40000 Вт/см<sup>2</sup> ширина валика 10,7 мм. Дальнейшее увеличение осевого теплового потока не приводит к уменьшению ширины валика. Можно заключить, что расчетные и опытные значения ширины валика достаточно близки, но модель НКИ требует корректировки, учитывающей погружение дуги в сварочную ванну.

Вторую серию опытов проводили по измерению провара при сварке двух пластин, собранных в стыковое соединение с зазором 1 мм. Скорость подачи проволоки составляла 9,6 мм/с, скорость сварки 0,45 см/с, ток дуги 300 А, напряжение на дуге 27,4 В. Ширина шва составила в среднем 12,7 мм. Средний провар по длине шва 3 мм.

Далее было опробована расчетная схема нормально-кругового источника тепла для проведенных опытов. Рассчитали эффективную мощность дуги  $q_{и}$ , приняв эффективный КПД дуги  $\eta_{и}=0,9$ .

$$q_{и} = 300 * 27,4 * 0,9 = 7400 \text{ Вт.}$$

Для этой эффективной мощности рассчитывали с помощью компьютерной программы осевой при найденном осевом потоке  $q_o=40000$  Вт/см<sup>2</sup> ширину шва. При данных параметрах источника тепла получили ширину шва  $B=14,6$  мм. Диаметр пятна нагрева составил  $D_{н} = 0,84$  см, коэффициент сосредоточенности теплового потока  $k=17$  см<sup>-2</sup>. Расхождение расчетной и опытной ширины шва составляет 1,9 мм. Этот результат подтверждает вывод о том, что схема НКИ может использоваться для расчетов при сварке, если учитывать погружение дуги в металл.

#### **4.3. Метод расчета провара при сварке под флюсом 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  $V_c$ . 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

$$q_{и} = A(V_c \delta)^n, \quad (24)$$

где  $\delta$  – толщина соединяемых пластин, см;  $A$  и  $n$  – 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 разнополярными импульсами тока рассмотрим дальше. В выбранных работах диаметр 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  $I_d = 750$  А. 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 табл. 20.

Таблица 20

Результаты расчета коэффициентов А и n

$\delta, \text{см}$	$V_c, \text{см/с}$	$q_{и}, \text{кВт}$	$H, \text{мм}$	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  $V_c \delta$  (табл.22).

Зависимость эффективной мощности от параметра  $V_c\delta$ 

$V_c\delta, \text{ см}^2/\text{с}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1	1,2	1,3	1,5	2,0
$q_{\text{и}}, \text{ кВт}$	5,5	7,5	9,7	12,1	15,0	20,7	23,9	27,4	34,8	56,4

Данные табл. 20 показывают быстрый рост эффективной мощности с увеличением толщины пластин. Это приведет к необходимости снижать скорость сварки.

Для корректировки полученных результатов в зависимости от полярности дуги можно использовать коэффициенты, полученные в табл. 14 на основе данных работы [2]. Например, для диаметра электрода 4 мм соотношение коэффициентов провара на обратной и прямой полярности составляет  $K_o/K_{\text{п}} = 1,353$  для флюса ОСЦ-45 и  $K_o/K_{\text{п}} = 1,22$  для флюса АН-348А. Среднее значение  $K_o/K_{\text{п}} = 1,29$ . Следовательно, если сварка ведется на прямой полярности расчетную эффективную мощность необходимо увеличить в 1,29 раза.

Обозначим  $K_o/K_{\text{п}} = \beta$ . При использовании дуги с разнополярными импульсами тока значение этого коэффициента необходимо корректировать по формуле

$$K_{\text{ри}} = \beta\varepsilon + \beta(1-\varepsilon), \quad (25)$$

где  $K_{\text{ри}}$  – коэффициент изменения эффективной мощности в зависимости от доли прямой полярности,  $\varepsilon$  – доля полярности.

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

$$\beta = BD^m, \quad (26)$$

где  $B$  и  $m$  – коэффициенты. Их значения определим отдельно для каждой марки флюса. Результаты определения приведены в табл. 23.

Коэффициенты зависимости  $\beta$  от диаметра электрода. Флюс ОСЦ-45.

D, мм	Значения $\beta$				Коэф.иц.
	2	3	4	5	
Расчет	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 электрода не столь велика. Для флюса АН -348А вообще оказалось, что зависимость практически отсутствует.

#### 4.4. Методика расчета площади проплавления основного металла

Для того, чтобы САПР технологии сварки была завершённой, необходимо иметь возможность рассчитывать химический состав шва. Для этого необходимо рассчитывать площадь проплавления основного металла. Для двухсторонней сварки сложно использовать результаты теории распространения тепла при сварке, так как большинство расчетных схем не учитывают погружение сварочной дуги в металл. Известные подходы по математическому моделированию сложных пространственных источников тепла или эквивалентных источников тепла малоприменимы для инженерной практики.

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

$$Fo = q_{и} \eta_{т} / Vc \cdot \Delta T \cdot c_p$$

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 полубесконечного тела

$\eta_r=0,384$ . Соотношение КПД составляет 1,266. Чем стесненнее 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 материала.

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 электрода 4 мм, вылет 25 мм. Провар 9,5 мм, ширина шва 20 мм. Теплофизические коэффициенты приводятся  $\lambda=0,32$  Вт/см<sup>2</sup>°С, теплоемкость  $c_p=4,5$  Дж/(см<sup>3</sup>°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 °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.

$$\text{Температуропроводность } a = 0,32 / 4,5 = 0,071 \text{ см}^2/\text{с.}$$

$$B/2 = 2 \cdot 0,071 \cdot 2 / 0,67 = 0,414 \text{ см} = 4,14 \text{ мм. Средняя ширина шва } B = 8,28 \text{ мм.}$$

5. Площадь проплавления основного металла

$$F_{ол} = 8,28 \cdot 16 = 132,5 \text{ мм}^2.$$

6. Площадь эллипса с полушириной 10 мм и высотой 9,5 мм.  $F_{э} = 149$  мм<sup>2</sup> (эксперимент).

7. Определяем площадь (размеры) для точечного источника с помощью компьютерной программы  $F_p = 160$  мм<sup>2</sup>.

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 полубесконечного тела [20] с ограниченной скоростью определим термический КПД. Получили  $F_p = 146$  мм<sup>2</sup>,  $\eta_{тп} = 0,325$ . Примем, что соотношение термических КПД для быстро движущихся источников тепла сохранится и для движущихся с ограниченной скоростью. Тогда термический КПД для линейного источника тепла

$$\eta_{тл} = \eta_{тп} \cdot 1,266 = 0,327 \cdot 1,266 = 0,41.$$

Определяем площадь провара от линейного источника

$$F_{ол} = 20505 \cdot 0,41 / (0,67 \cdot 1500 \cdot 4,5) = 186 \text{ мм}^2.$$

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

$$F_{оп} = 160 \text{ мм}^2.$$

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 проволокой 3 мм под флюсом АН-348 А на прямой полярности дуги. Примем значение скорости сварки  $V_c = 0,5$  см/с – достаточно большое для такой толщины. Тогда произведение  $V_c \cdot \delta = 2 \cdot 0,5 = 1,0$  см<sup>2</sup>/с. По формуле (24) рассчитываем необходимую мощность для обратной полярности дуги

$$q_{инп} = 17,62 \cdot 1^{1,68} = 17,62 \text{ кДж.}$$

Полная мощность дуги

$$P_d = 17,62 / 0,9 = 19,6 \text{ кВт.}$$

Умножим напряжение из формулы (1) на ток дуги

$$P_d = 20I_d + 0,05I_d^2/d_s^{0,5}.$$

Решение этого квадратного уравнения относительно тока дает  $I_d = 550$  А.

Согласно табл. 14 отношение  $K_o/K_p = 1,316$  для диаметра 3 мм. Поэтому ток на прямой полярности необходимо увеличить до  $1,316 \cdot 550 = 725$  А.

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

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

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

Здесь в расчете имеет место нестыковка. Для выбора коэффициента  $k$  мы выбрали диаметр электрода. А теперь снова по данному алгоритму требуется подобрать диаметр электрода по плотности тока. Плотность тока для диаметра 3 мм лежит в диапазоне 45 -90 А/мм<sup>2</sup>. Это дает ток в диапазоне 320-640 А. Следовательно диаметр 3 мм не подходит для сварки данной толщины по этой методике. Выбираем электрод диаметром 4 мм. Для него коэффициент  $k = 1,1$ . Получаем ток дуги  $I_d = 12 \cdot 100 / 1,1 = 1090 \text{ А}$ . Плотность тока рекомендована в диапазоне 35-60 А. Получаем токи в диапазоне 440-750 А. Этот диаметр также не подходит. Приняв электрод диаметром 5 мм, получим токи в диапазоне 600 -1000 А. Примем ток 1000 А в качестве рекомендуемого.

Рассчитываем скорость сварки по формуле, рекомендуемой в (2)

$$V_c = A / I_d,$$

где  $A$  –коэффициент, который для диаметра электрода 5 мм находится в пределах  $(20-25) \cdot 10^3 \text{ м/ч}$ . Приняв  $A = 22,5$  получим  $V_c = 22,5 \text{ м/ч} = 0,63 \text{ см/с}$ .

Рассчитываем напряжение дуги для диаметра электрода 5 мм.

Получаем  $U_d = 47 \text{ В}$ . Эффективная мощность дуги  $= 47 \cdot 1000 \cdot 0,9 = 52,2 \text{ кВт}$ .

Погонная энергия сварки  $q_n = 82,9 \text{ кВт/см}$ .

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.

Выводы по главе IV.

1. Учет зависимости провара от полярности дуги можно обеспечить, используя схему источников тепла с различной распределенностью теплового потока.

2. Зависимость эффективной мощности источника тепла при двухсторонней сварке стыковых соединений от скорости образования соединения можно удовлетворительно описывается степенной функцией. Это существенно сокращает объем необходимых экспериментов при разработке оптимальной технологии сварки.

3. Предложена методика определения мощности от прикатодной области дуги в изделие, позволяющая выполнять расчет эффективной мощности при сварке дугой с разнополярными импульсами тока.

4. На основе полученных зависимостей разработана методика автоматизированного проектирования оптимальных режимов и химического состава шва при сварке под флюсом при сварке разнополярными импульсами тока.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Получена формула для приращения коэффициента расплавления от нагрева вылета электрода при сварке, позволяющая уточнять проектируемые параметры.

2. Учесть влияние полярности дуги на провар и температурное поле можно, применив схему нормально-кругового источника тепла на поверхности плоского слоя с различными осевыми потоками.

3. Зависимость провара от тока дуги при двухсторонней сварке стыковых соединений с можно представить в виде кубической функции тока, как для прямой, так и для обратной полярностей. Это позволяет значительно сократить объем экспериментальных исследований при отработке режимов сварки.

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

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

6. Разработана методика определения осевых тепловых потоков для нормально-кругового источника тепла при сварке под флюсом по опытным значениям проваров.

7. Предложен подход к расчету сварочного тока при сварке РИТ по требуемой эффективной мощности дуги.

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

### *Библиографический список*

1. Фролов, В.А. Технология сварки плавлением и термической резки металлов : учебное пособие / В.А. Фролов, В.Р. Петренко, А.В. Пешков, А.В. Коломенский, В.А. Казаков ; под ред. В.А. Фролова.- 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 сварке под флюсом / Н.В. Коберник, Г.Г. Чернышов, П.П. Гвоздев и др. // Сварка и диагностика. 2011, № 5, С. 24-27.
5. Сидоров, В.П. Влияние рода и полярности тока на плавление электродного и основного металла при сварке под флюсом / В.П. Сидоров // Сварка и диагностика. 2013, № 3, С. 20-23.
6. Сидоров, В.П. Вклад в проплавление изделия мощности электродного металла при сварке под флюсом. / В.П. Сидоров, Н.А. Борисов // Пайка -2013 : сборник материалов международной научно-технической конференции ( Тольятти, 10-12 сентября 2013 года) / редкол. : А.Ю. Краснопевцев ( отв. ред. ) [ и др.] - Тольятти : 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 / В.П. Сидоров, М.А. Абрамова, Д.Е. Корсун // Инновационные технологии и экономика в машиностроении : сб. трудов VI Международной научно- практической конференции / Юргинский технологический институт . – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2015.- С. 52-54.

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 электродами в аргоне / В.П. Сидоров, С.А. Хурин // Тольятти, изд-во ТГУ , 2015 .- 191 с.
11. Цвелев, Р.А. Оценка погрешностей воспроизведения температурного поля при сварке под флюсом 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. 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., Хурин С.А. 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, В. П. Сидоров // Физика и химия обработки материалов. - 1980. - № 6.- С.134-137.

17. Сидоров В.П. Математическое моделирование проплавления металла при наплавке шва на массивное тело. Тольятти, 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. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах / В.А. Ленивкин, Н.Г. Дюргеров, Х.Н. Сагиров. – М.: Машиностроение, 1989.- 264 с.
20. Сидоров, В.П. Математическое моделирование энергетических процессов сварки. Лабораторный практикум. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2014. - 193 с.
21. Сидоров, В.П. Определение вольтова эквивалента анодной мощности по характеристикам плавления 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 / В.П. Сидоров, Н.А. Борисов // Славяновские чтения: Сб.научн. тр. 4-5 июня 2009 г. ЛИПЕЦК – Кн.2. – Липецк: изд-во ЛГТУ, 2009.- С.112...116.
24. ГОСТ 8713-79. Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы. М.: Изд-во стандартов, 1981.
25. Строительство магистральных трубопроводов. Справочник / Чирков В.Г., Березин В.Л., Телегин Л.П. и др. М.: Недра, 1991.
26. Сидоров, В.П. О роли нагрева вылета в производительности расплавления электрода при сварке в  $CO_2$  /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., Бекетов А.И. Расчет термического цикла околосшовной зоны по очертанию плоской сварочной ванны.- Сварочное производство, 1967, №9, с.22-25.

28. Березовский Б.М., Стихин В.А. Расчёт параметров распределения теплового потока поверхностной сварочной дуги // 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.: Стандартиформ, 2007.

30. Сидоров, В.П. Расчет провара при сварке в  $CO_2$  / 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// В.П. Сидоров, Д.Е. Корсун, М.А. Абрамова // Сб. трудов региональной научно-практической конференции «Технологии, оборудование и сооружения машиностроительных и металлургических производств. Проблемы и перспективы развития» ( 20 ноября 2015 г.) 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 // Инновационные технологии и экономика в машиностроении : сб. трудов VI Международной научно- практической конференции / Юргинский технологический институт . – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2015.- С. 45-47.

34. Сидоров, В.П. Двухдуговая двусторонняя сварка неплавящимися электродами в аргоне : / В.П. Сидоров, С.А. Хузрин.- Тольятти : Изд-во ТГУ, 201. – 191 с.

Форма № 94 ИЗ, ПМ, ПО-2011

Федеральная служба по интеллектуальной собственности  
Федеральное государственное бюджетное учреждение

«Федеральный институт промышленной собственности»  
(ФИПС)

Бережковская наб., 36, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-3, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

УВЕДОМЛЕНИЕ О ПОСТУПЛЕНИИ ЗАЯВКИ

20.03.2015	015674	2015109907
Дата поступления	Входящий №	Регистрационный №

ОТД № 17  
24 MAR 2015  
УЛ 24060 16

(1) ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ органом ФПС 20 MAR 2015	(2) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ № 015674	(3) ДАТА ПЕРЕВОДА международной заявки на национальную фазу УЛ 24060 16
(18) <input type="checkbox"/> (19) (20) <input type="checkbox"/> (21)	АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ М.А. Абрамовой, Б/р Гам, д.9, кв. 101, г. Тольятти, Самарская обл., 445039, Телефон: 8 909 364 8324 Факс: E-mail: maa.abramova@yandex.ru	
ЗАЯВЛЕНИЕ о выдаче патента Российской Федерации на изобретение		В Федеральную службу по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам Бережковская наб., 36, корп.1, Москва, Г-59, ГСП-3, 125993
(34) НАЗВАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ СПОСОБ ДВУСТОРОННЕЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ТАВРОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ		
(71) ЗАЯВИТЕЛЬ Общество с ограниченной ответственностью «Средневолжский сертификационно-диагностический центр «Дельта» ул. Белорусская, 3, г. Тольятти, Самарская обл., 445020, Россия		ОГРН 1026300997567 КОД страны по стандарту ВОИС ST. 3 (для изобретения) RU
Указание вида заявки <input type="checkbox"/> государственная заявка <input type="checkbox"/> международная заявка указание работ _____ (указать наименование) <input type="checkbox"/> выполнение работ по <input type="checkbox"/> государственному <input type="checkbox"/> гражданскому контракту, указание работ _____ (указать наименование) Контракт от _____ № _____		Наличие <input type="checkbox"/> Патентный <input type="checkbox"/> Иная приоритетный <input type="checkbox"/> заявка
(74) ПРЕДСТАВИТЕЛЬ(И) ЗАЯВИТЕЛЯ Укажите(те) лицо (лица) (наименование(я) заявителя(заявителей)) для выдачи деп. по получению патента от имени заявителя в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам		Факс: _____
Срок представительства (укажите в случае назначения иного представителя (по кратчайшему сроку))		Регистрационный (2) номер (4) (заявитель(ов)) патент(ов)(1)(3)
(72) Автор (укажите фамилию и имя)		Полный почтовый адрес места жительства, включающий обязательное идентификационное страны и ее код по стандарту ВОИС ST. 3

Всего листов 10 лист 1

Количество листов	51	Фамилия лица, принявшего документы Сергеева Н.Н.
Количество документов, подтверждающих уплату пошлины	2	
Количество изображений	0	

### **Способ двусторонней дуговой сварки тавровых соединений**

Предлагаемый способ относится преимущественно к области машиностроения и судостроения и может быть применён при изготовлении различных сварных конструкций, в том числе ответственного назначения.

Известен способ автоматической двухсторонней дуговой сварки тавровых соединений, при котором два электрода располагают в одной плоскости под углом друг к другу с разных сторон от стенки тавра и перемещают их вдоль линии шва, отличающийся тем, что с целью повышения качества сварки за счет предотвращения образования подрезов, электроды колеблют в одном направлении в плоскости, перпендикулярной оси шва ( см. АС СССР № 536022, опубл. 25.11.76 г. Бюл. №43).

Этот способ не предусматривает смещения электродов относительно друг друга в направлении сварки, что зачастую приводит к взаимному воздействию магнитных полей дуг друг на друга и ухудшению стабильности формирования швов.

Наиболее близким к предлагаемому решению является способ дуговой автоматической сварки, по которому получают двустороннее одновременное проплавление противоположных сторон таврового соединения, у которого полку при сварке располагают в горизонтальной плоскости, а стенку в вертикальной плоскости, плавящиеся электроды одинакового диаметра размещают по разным сторонам стенки и перемещают с одинаковой скоростью в направлении сварки, а торцы электродов устанавливают либо без смещения относительно направления скорости сварки, либо со смещением 6-12 дюймов (150-300 мм) вдоль стыка и пропускают через них ток специальной формы, причем мощность сварочных дуг регулируют отдельно. [Патент US № 2009120919A1, от 2009.05.14 МПК В23К9/02 и В23К9/10]. Этот способ принят за прототип.

В этом способе дистанция между дугами *либо отсутствует, либо составляет* 6-12 дюймов ( 150-300 мм), то есть выбирается достаточно большой из условия минимального взаимного магнитного воздействия дуг.

Недостатком данного способа является получение различного провара угловых швов при смещении плавящихся электродов одинакового диаметра. Различие в глубине провара и площади провара основного металла возникает из-за подогрева основного металла в зоне действия задней дуги от тепловой мощности, выделяемой передней дугой. В то же время количество наплавленного металла остается одинаковым для двух швов, так как катеты швов задаются равными. Таким образом, происходит увеличение количества расплавленного основного металла, который наиболее сильно влияет на продольную усадку, что приводит к неравномерности сварочных деформаций и возникновению дополнительных деформаций изгиба тавра в сторону шва, накладываемого вторым.

Технический эффект заявляемого изобретения, заключается в обеспечении одинакового провара при смещении электродов сварочных дуг в направлении скорости сварки и недопущении дополнительных деформаций.

Это достигается тем, что в известном способе дуговой автоматической сварки, по которому получают двустороннее одновременное проплавление противоположных сторон таврового соединения, когда полка таврового соединения при сварке располагается в горизонтальной плоскости, а стенка в вертикальной плоскости, плавящиеся электроды располагают с разных сторон стенки таврового соединения и перемещают с одинаковой скоростью в направлении сварки, а их торцы устанавливают со смещением 150-300 мм вдоль стыка, причем мощность сварочных дуг регулируют отдельно.

В отличие от прототипа диаметр плавящегося электрода передней сварочной дуги выбирают большим, чем диаметр плавящегося электрода задней сварочной дуги, мощности и скорость сварки передней и задней сварочных дуг выбирают обеспечивающими заданный катет швов, а

дистанцию между электродами выбирают из условия обеспечения одинакового провара угловых швов.

Изобретение иллюстрируется чертежами, где на фиг. 1 показана схема осуществления процесса двусторонней двухдуговой сварки таврового соединения и расположение сварочных электродов по отношению к скорости сварки по предлагаемому способу при питании дуг от двух источников питания, на фиг. 2 геометрические характеристики угловых швов таврового соединения по известному способу, на фиг. 3 зависимости коэффициента расплавления плавящегося электрода при сварке от тока дуги для двух диаметров электродов, на фиг. 4 – расчетный термический цикл зоны действия заднего источника от действия мощности переднего источника.

Предлагаемый способ заключается в том, что сварку ведут одновременно с двух сторон таврового соединения (фиг. 1) со стенкой 1, располагаемой в вертикальной плоскости и полкой 2, располагаемой в горизонтальной плоскости, причем с каждой стороны полки 2 устанавливают по одному плавящемуся сварочному электроду 3,4. Электроды 3,4 смещают в направлении движения сварочных дуг относительно друг друга на 150-300 мм, зажигают сварочные дуги и перемещают плавящиеся электроды вдоль стыка в одном направлении с одинаковой скоростью. Мощность сварочных дуг на каждом из электродов регулируют отдельно, для этого используют либо один мощный источник питания, либо два менее мощных 5 и 6, для питания каждой дуги отдельно. Электрод 3 передней дуги выбирают большего диаметра  $D_п$ , а электрод 4 задней дуги  $D_з$  – меньшего диаметра. Скорость сварки и мощность дуги (ток дуги) с переднего электрода 3 выбирают из условия обеспечения заданного катета сварного шва. Мощность задней дуги (ток дуги) с электрода 4 выбирают также из условия обеспечения такого же заданного катета сварного шва. Ток задней дуги  $I_{дз}$  выбирают меньше, чем ток  $I_{дп}$  передней, так как для меньшего диаметра плавящегося электрода выше коэффициент расплавления и соответственно коэффициент

наплавки. Это позволяет снизить провар основного металла полки и стенки тавра от действия задней дуги и добиться провара, близкого к провару передней дуги. Подогрев зоны действия задней дуги от передней дуги приводит к повышению провара основного металла полки и стенки тавра при наложении второго шва, а снижение тока задней дуги за счет использования электрода меньшего диаметра приводит к снижению провара и эти два фактора компенсируют друг друга.

При сварке возможно два варианта положения передней и задней дуг в отношении скорости сварки по диаметру электрода. Анализ показывает, что оптимальным по обеспечению равного провара при одинаковом катете шва, является движение первым электродом большего диаметра на большем токе дуги.

Ток передней дуги с электродом 3 большего диаметра, выбирается из условия обеспечения требуемого катета углового шва. Это достигается действием относительно мощной передней дуги на холодный металл при достижении определенного уровня провара шва, формируемого первым. При этом обеспечивается подогрев изделия для задней дуги с электродом 4, обеспечивающий повышение провара пластин. В случае сварки по известному способу для обеспечения равенства катетов швов должны выбираться одинаковые токи дуги, что приводит к увеличению провара и площади расплавленного основного металла, что, в свою очередь, приводит к увеличению сварочных деформаций и их неравномерности относительно продольной оси тавра.

Задняя дуга может обеспечивать одинаковый катет и провар при значительно меньшей мощности, чем у передней, что достигается за счет сильного подгрева металла передней дугой. Рекомендуемая дистанция между дугами позволяет выбрать ток (мощность) задней дуги, обеспечивающую требуемый катет шва и равный провар. Провар от действия переднего источника можно опытным путем определять для случая однодуговой сварки, так как при предлагаемой дистанции между дугами

влияние задней дуги на температурное поле в области передней дуги практически отсутствует.

На фиг. 2 показаны стенка 1, расположенная в вертикальной плоскости и полка 2, расположенная в горизонтальной плоскости, а также угловые швы 3 и 4, полученные по известному способу с различным проваром основного металла. Шов 3 получен за счет действия передней дуги и имеет катет  $K_1$ . Провар основного металла шва 3, равный разнице высоты углового шва  $h_1$  и высоты катета  $K_1$  составляет

$$H_{o1} = h_1 - 0,7 \cdot K_1.$$

Площадь поперечного сечения проплавления основного металла шва 1 составит  $F_1$  мм<sup>2</sup>.

Шов 4 получен за счет действия задней дуги и имеет такой же катет  $K_1$ . Из-за подогрева зоны действия задней дуги передней, провар основного металла для шва 4 больше и составляет

$$H_{o2} = h_2 - 0,7 \cdot K_1.$$

$h_2$  больше  $h_1$  за счет подогрева основного металла передней дугой. Также больше площадь поперечного сечения основного металла  $F_2$ .

На фиг. 3 представлены зависимости коэффициента расплавления плавящегося электрода при сварке в углекислом газе от тока дуги для двух диаметров проволоки. Кривая 1 представляет зависимость для диаметра проволоки 1,2 мм, а кривая 2 – для диаметра проволоки 1,0 мм. Кривая 2 расположена над кривой 1, что показывает, что коэффициент расплавления существенно увеличивается с уменьшением диаметра электрода.

Площадь поперечного сечения наплавленного металла при дуговой автоматической сварке можно определить из известного выражения

$$F_n = \alpha_n \cdot I_d / (V_c \cdot \rho),$$

где  $\alpha_n$  – коэффициент наплавки для данного способа сварки, г/(А·с),  $I_d$  – ток дуги, А,  $V_c$  – скорость сварки, см/с,  $\rho$  – плотность наплавляемого металла, для стали  $\rho = 7,8$  г/см<sup>3</sup>.

Коэффициент наплавки связан с коэффициентом расплавления зависимостью

$$\alpha_n = \alpha_r \cdot (1 - \psi_n),$$

где  $\psi_n$  – коэффициент потерь плавящегося электрода на угар и разбрызгивание, слабо зависит от тока и диаметра электрода.

$\alpha_r$  зависит от тока дуги и диаметра электрода (фиг. 3). При одинаковом токе дуги коэффициент расплавления  $\alpha_r$  и соответственно коэффициент наплавки  $\alpha_n$  выше для электрода меньшего диаметра. Произведение  $\alpha_r \cdot I_d$  представляет производительность расплавления в г/с, на графике фиг. 3 ее характеризует площадь прямоугольника для координаты точки  $(\alpha_r, I_d)$ . Из графиков фиг. 3 следует, что можно подобрать одинаковую производительность расплавления  $\alpha_r \cdot I_d$  для разных диаметров электрода, подбирая ток дуги. Соответственно аналогично будет изменяться производительность наплавки  $\alpha_n \cdot I_d$ . Меньшему диаметру электрода для сохранения производительности наплавки должен соответствовать меньший ток дуги. Между коэффициентом расплавления и скоростью подачи электродной проволоки  $V_э$  существует известная взаимосвязь

$$V_э = \alpha_r \cdot \rho / j,$$

где  $j$  – плотность тока на электроде, А/см<sup>2</sup>.

На фиг. 4 представлено расчетное распределение температуры по оси X (в продольном направлении) от действия сварочной дуги на рекомендуемых режимах сварки угловых швов тавровых соединений в зоне действия второй дуги (150-300 мм от оси дуги). Режимы дуги: ток, напряжение, скорость сварки. Полная эффективная мощность дуги при эффективном КПД  $\eta_n=0,8$  составляет  $q_n=8160$  Вт. Для расчета выбиралась приведенная эффективная мощность, которая в 1,5 раза меньше полной эффективной мощности, с учетом распространения тепла в 3-х направлениях при сварке тавровых соединений, вместо двух при сварке стыковых соединений. Получили приведенную эффективную мощность 5440 Вт. Толщина расчетной пластины принималась 10 мм. Материал сталь 20. Теплофизические коэффициенты

принимали по справочным данным: объемная теплоемкость  $5,23 \text{ Дж}/(\text{см}^3 \cdot \text{C})$ , температуропроводность  $a = 0,08 \text{ см}^2/\text{с}$ . Координата  $y$  в поперечном направлении принималась равной толщине пластин  $y=10 \text{ мм}$ . Координата по толщине пластины (ось  $Z$ ) принимали равной половине толщины пластины:  $z = 5 \text{ мм}$ . Расчет велся по схеме нормально-кругового источника тепла на поверхности плоского слоя. Осевой тепловой поток источника тепла принимался  $3500 \text{ Вт}/\text{см}^2$ .

Из графика фиг. 4 видно, что температура металла в продольном и поперечном направлениях изменяется незначительно.

Пример. Проводили двухдуговую в среде углекислого газа двухстороннюю автоматическую сварку таврового соединения из низкоуглеродистой стали 20 с толщиной стенки и полки  $10 \text{ мм}$  по известному способу. Полка располагалась горизонтально, а стенка – вертикально. Швы выполнялись в нижнем положении. Электроды сварочных горелок располагались под углом  $45$  градусов по отношению к стенке и полке. Катеты угловых швов проектировались одинаковыми  $K = 6 \text{ мм}$ . Диаметр электродов дуги, расположенных со смещением торцев  $150 \text{ мм}$  выбирался  $1,2 \text{ мм}$ . Токи каждой из дуг  $300 \text{ А}$ , скорости подачи электродных проволок  $450 \text{ м}/\text{час}$ . Напряжение на дугах  $34 \text{ В}$ . Скорость сварки составляла  $26 \text{ м}/\text{час} = 0,72 \text{ см}/\text{с}$ . На данном режиме получили требуемый катет швов  $K=6 \text{ мм}$ . На макрошлифе получили провар углового шва сваренного передним электродом  $3 \text{ мм}$  и площадь проплавления основного металла  $8 \text{ мм}^2$ . Провар углового шва, сваренного задним электродом составил  $5 \text{ мм}$  и площадь проплавления основного металла  $15 \text{ мм}^2$ . Расчетный коэффициент потерь на угар и разбрызгивание составил  $7\%$ .

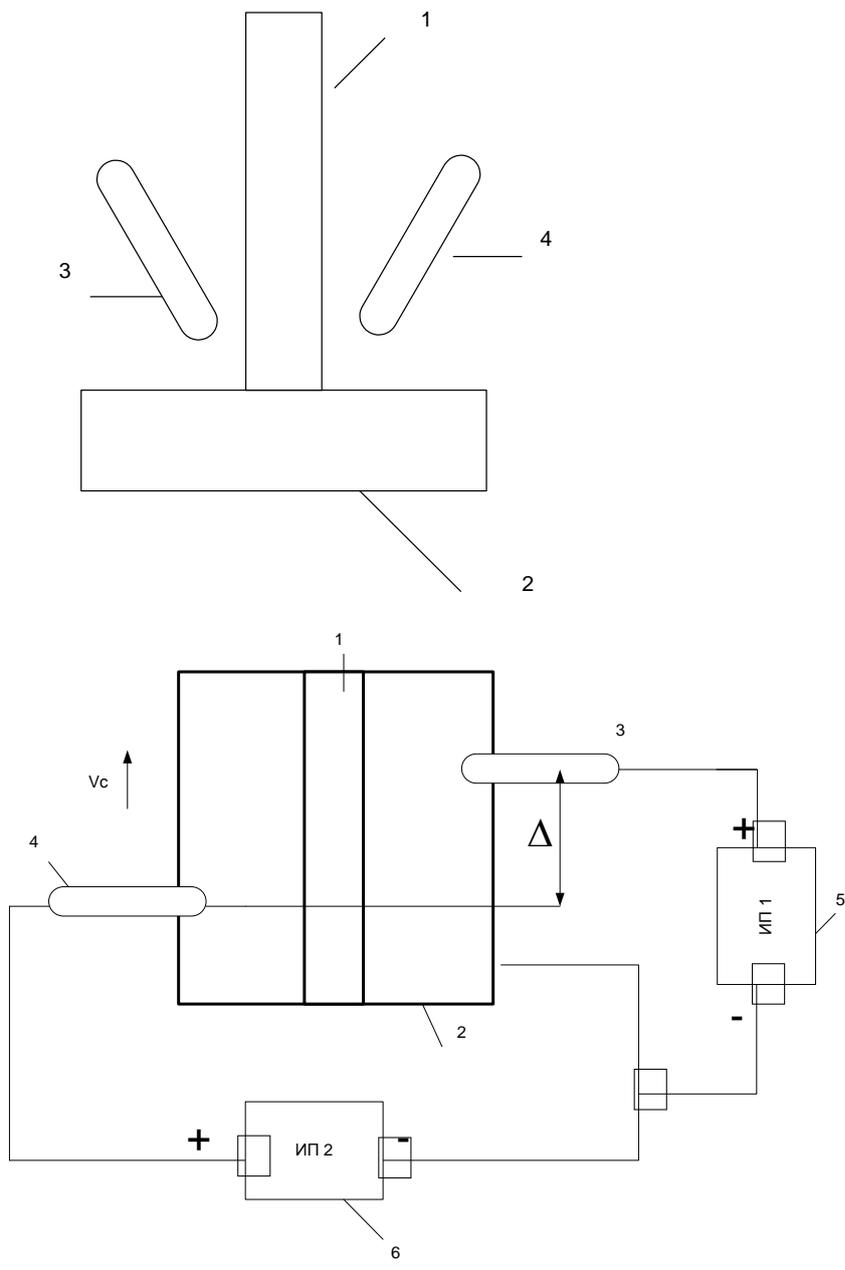
После этого выполняли двухдуговую двухстороннюю сварку такого же соединения по предлагаемому способу. Режимы сварки передней дуги оставались такими же, как и в известном способе. Дистанцию между электродами установили  $150 \text{ мм}$ . Диаметр электрода задней дуги был выбран  $1,0 \text{ мм}$ , а ее ток составлял  $250 \text{ А}$ . Скорость подачи электродной проволоки

составила 600 м/час. Напряжение на передней дуге 34 В, на задней 31 В. На таком режиме также получили катет шва от действия задней дуги  $K=6$  мм. На макрошлифе получили провар углового шва сваренного передним электродом 3 мм и площадь проплавления основного металла 8 мм<sup>2</sup>. Провар углового шва сваренного задним электродом составил 3,3 мм и площадь проплавления основного металла 8 мм<sup>2</sup>.

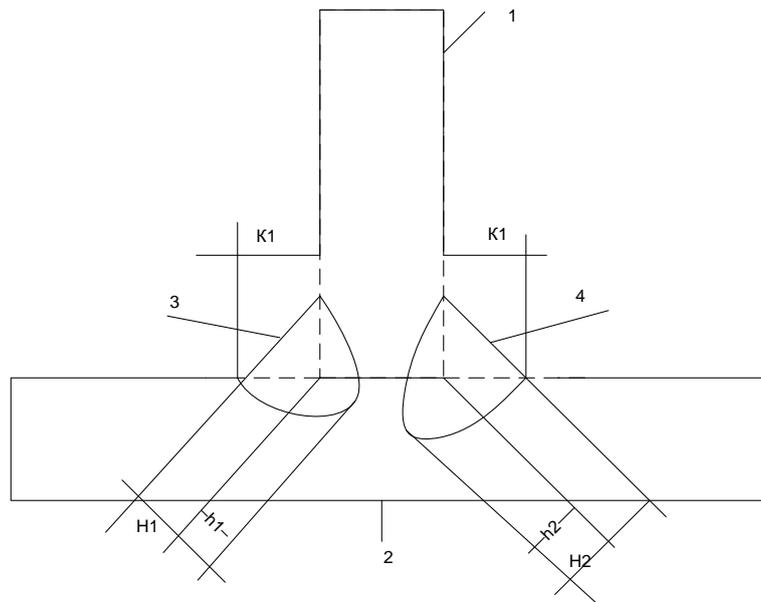
Таким образом, предлагаемый способ обеспечивает технический эффект, заключающийся в снижении провара основного металла от действия задней дуги, уменьшении площади проплавления основного металла и снижении сварочных деформаций. Способ может быть осуществлён с помощью известных в технике средств: известных и применяемых на производстве источников питания для сварки, плавящихся электродов разного диаметра. Следовательно, предлагаемый способ обладает промышленной применимостью.

### **Формула изобретения**

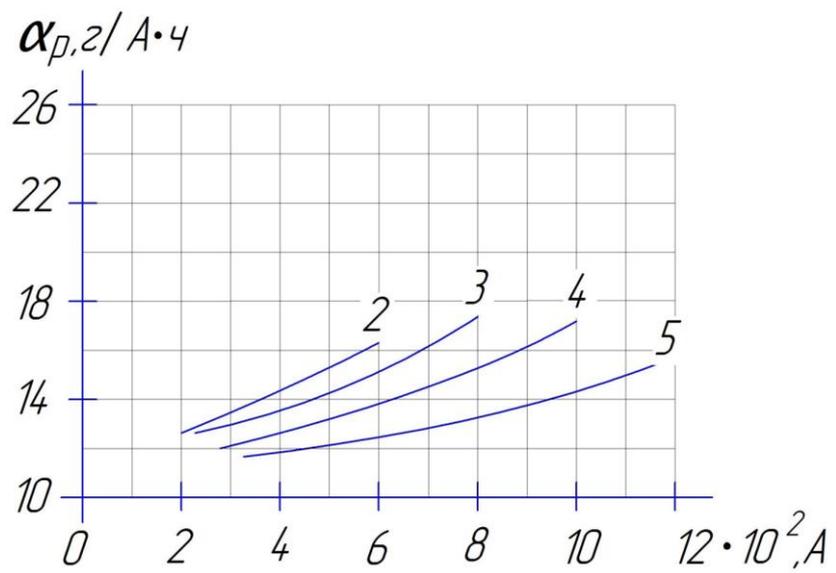
Способ дуговой сварки, при котором сварку угловых швов ведут одновременно с двух сторон таврового соединения деталей без разделки свариваемых кромок с расположением полки тавра в горизонтальной плоскости, причем с каждой стороны стыка деталей устанавливают по одному плавящемуся электроду, электроды смещают в направлении движения сварочных дуг относительно друг друга, зажигают сварочные дуги и перемещают электроды вдоль стыка в одном направлении с одинаковой скоростью, при этом мощность сварочных дуг на каждом из электродов регулируют отдельно, отличающийся тем, что диаметр электрода передней сварочной дуги выбирают большим, чем диаметр заднего, мощности передней и задней сварочных дуг выбирают обеспечивающими заданный катет швов, а дистанцию между электродами выбирают из условия обеспечения *близкого* провара угловых швов.



Фиг.1



Фиг. 2



Фиг. 3