

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование кафедры)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического оборудования

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему: «Роботизация дуговой сварки в производстве стальных резервуаров»

Обучающийся

А.А.Сандер

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

д.т.н., профессор В.П. Сидоров

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

Тольятти 2023

Содержание

Введение.....	3
1 Анализ способов сварки используемых при производстве резервуаров	5
1.1. Виды резервуаров.....	5
1.2 Ручная дуговая сварка покрытыми электродами.....	7
1.3 Автоматическая сварка под слоем флюса	11
1.4 Механизированная сварка.....	16
2 Анализ источников питания для роботизации рпи сварки	23
2.1 Источники для многодуговой сварки	23
2.2 Механизированная РПИ сварка.....	37
2.3. Разработка схемы экспериментальной установки и методики исследований	52
3 Роботизация сварки и применение в производстве	57
3.1 Автоматическая сварка.....	57
3.2 Роботизированная сварка	63
3.3. Роботизации дуговой сварки металлоконструкций.....	64
Заключение	67
Список используемой литературы и источников	68

Введение

Резервуарные металлические конструкции востребованы в газонефтехимической и других отраслях. Изготовление таких конструкций требует строгого соблюдения технологических норм и отраслевых стандартов. Изготовление резервуаров выполняют двумя методами[15].

– Полистовой метод. Листы из стали вальцуются под определенную форму и в дальнейшем свариваются на монтажной площадке. Такой метод используется в основном для резервуаров объемом более 10 тыс. м³ и считается более трудоемким.

– Метод рулонирования. На заводе–изготовителе производится сварка основных частей резервуара: крыши, стенки и днища. Для этого используются специальные установки для наворачивания стенки. Листы металла раскладываются на установке, где происходит сборка с соблюдением всех геометрических норм сварного соединения, а после свариваются автоматической сваркой.

Данные методы производства разрабатывались в 50–х годах XX века и проходили постепенную модернизацию, вместе с развитием возможностей сварочного оборудования. Однако в данный период большинство отечественных производителей недостаточно используют наиболее прогрессивные способы сварки ввиду малой распространённости среди заводов производителей резервуаров и отсутствия практической базы по их применению [5].

Повсеместное внедрение перспективных методов сварки, позволяющее значительно увеличивать скорость сварки изделий, при этом снижая трудозатраты на выпускаемую продукцию, вызывало бы повышение спроса на внедрение у заводов производителей, заинтересованности среди работников ввиду безопасности и облегчения труда в целом. На данный момент времени, роботизированная сварка присутствует в том или ином виде на некоторых заводах изготовителях резервуаров России, однако повсеместного

распространения она не получила. Применение импульсно–дуговых процессов в роботизированной сварке могло бы значительно увеличить производительность сварки, при этом не ухудшив ее качества[19].

Поэтому изучение с возможностью дальнейшего внедрения разнополярной импульсной роботизированной сварки, является перспективным. Применение этого способа сварки, может получить быстрое распространение, так как в нынешнее время для каждого производителя важен объем выпускаемой продукции сварке. По многим причинам, качество в заводских условиях достигается меньшими усилиями. Связно это с налаженными типовым технологическим процессами, при правильной постановки которых, исключается влияние человеческого фактора, что в дальнейшем влияет на скорость и качество выпускаемой продукции[9].

Для повышения качества внедряются усовершенствованные технологии сварки с применением современного оборудования. Способы сварки применяемые при изготовления резервуаров, следующие:

- Ручная дуговая покрытыми электродами
- Механизированная плавящимся электродом в среде защитных газов и смесях
- Механизированная сварка порошковой проволокой в среде активных газов и смесях или же без них
- Автоматическая под слоем флюса
- Автоматическая в среде защитных газов

Роботизация одного из этих методов сварки, а также изучение его положительных сторон для его дальнейшего повсеместного внедрения, в производстве металлоконструкций, является перспективным направлением в данный промежуток времени [11].

Цель работы – создание предпосылок для резкого увеличения применения роботизированной сварки в производстве резервуар

1 Анализ способов сварки используемых при производстве резервуаров

1.1. Виды резервуаров

В качестве базового предприятия служит завод по производству резервуаров и резервуарных металлических конструкций. Поскольку деятельность предприятия связана с работой по отраслевым стандартам и ГОСТ, материалы, используемые в производстве, строго регламентированы и подвергаются тщательному контролю производителем и заказчиком.

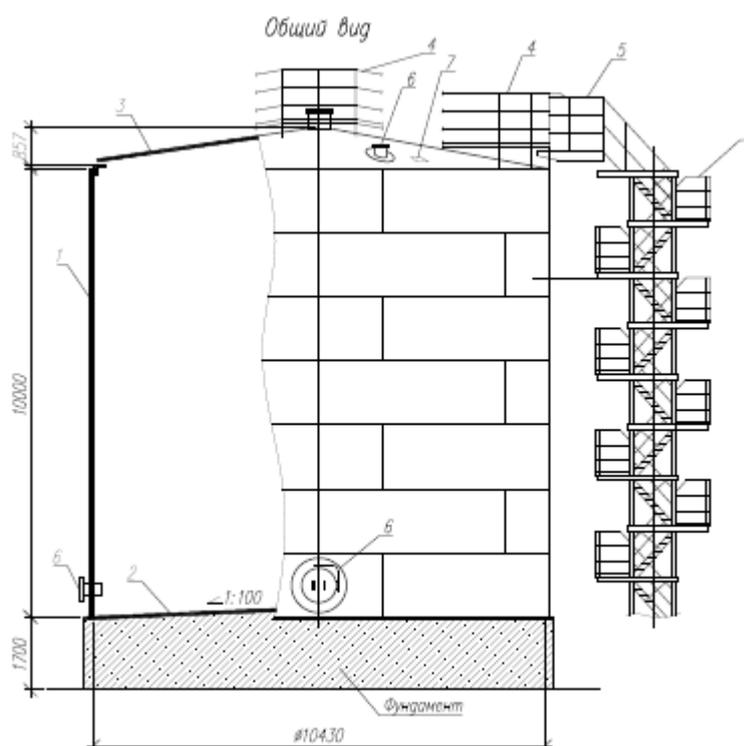


Рисунок 1. Общий вид резервуара. 1 Стенка; 2 Днище; 3. Крыша
4. Площадки ограждения на крыше; 5. Шахтная лестница; 6. Люки и
патрубки в стенке и крыше

Наиболее важными составляющими резервуара являются стенки, днище и крыша (рисунок 1). Они могут изготавливаться как листовым методом, так

и методом рулонирования. Как правило, резервуары объемом менее 10000 м³, изготавливаются методом рулонирования. От метода производства резервуара зависят используемый способ сварки и способы подготовки кромок.

Способы сварки резервуаров регламентируются ГОСТ 31385.

При производстве резервуаров для стенок и днищ используются стали толщиной от 4 до 18 мм. Для отдельных узлов резервуара могут быть использованы значительно большие толщины. Резервуары чаще всего изготавливаются из группы сталей М01 (Углеродистые и низколегированные конструкционные стали перлитного класса с пределом текучести до 360 МПа), такие, как Ст3сп, 20, 09Г2С, 17Г1С, 15ХСНД, а также М11 (Высоколегированные стали аустенитно–ферритного и аустенитного классов): 08Х18Н11, 10Х17Н13М3Т, 12Х18Н10Т.

Наиболее используемой маркой стали, для производства резервуаров, является сталь марки 09Г2С. Наличие легирующих элементов в стали, позволяет получать такие же прочностные характеристики, как у стали Ст3сп5, но при более низких толщинах. Что в конечном итоге снижает общую массу и стоимость.

Сочетание механических и физических свойств стали, допускает ее применение для изготовления деталей эксплуатируемых, а широком интервале температур от –70 до +450 °С. Сталь 09Г2С имеет хорошую свариваемость, это позволяет применять ее для сложных и ответственных конструкций нефтегазовых производств. Для повышения качества и повышения прочностных показателей, сталь подвергают закалке и отпуску. Высокие механические показатели при низких температурах позволяет эксплуатировать продукцию изготовленную из данной стали в районах Крайнего севера [3].

На базовом предприятии данная сталь является основной для производства продукции. Сварку производят в большинстве случаев производят без подогрева, однако при сварке больших толщин, сварке при

около нулевой температуре, может быть произведен подогрев до 100–120 °С. Сталь 09Г2С не подвергается закалки и не подвержена перегреву во время сварки, поэтому пластические свойства не снижаются и не увеличивается зернистость. Еще одним плюсом для ее применения — это отсутствие склонности к отпускной хрупкости и не снижение вязкости после отпуска. Совокупность факторов объясняет обоснованность применения ее, по сравнению с другими сталями с большим содержанием углерода которые свариваются хуже и меняют свойства после термообработки

С вышеприведенными свойствами объясняется удобство использования

Рассмотрим оборудование, способы и материалы применяемые на базовом предприятии.

1.2 Ручная дуговая сварка покрытыми электродами

Одним из способов сварке на базовом предприятии является ручная дуговая сварка покрытыми электродами [6]. Основные технологические процессы для ее применения:

- Крупноузловая сборка металлоконструкций перед сваркой
- Сборка рулонизируемых полотнищ на установках для наворачивания
- Сварка труднодоступных мест, там где нет возможности для доступа механизированной сваркой
- Сборка и сварка производственной оснастки, контейнеров и упаковки
- Ремонтная сварка рулонизируемых полотнищ

На последнем можно остановиться отдельно. Ремонт сварных швов, по результатам неразрушающего контроля, проводится на нижнем ярусе установки для наворачивания рулонизируемых полотнищ. Так как полотнище сваривается двухсторонним швом, с полным проплавлением, то ремонт проводится со стороны ближайшей к глубине залегания дефекта. Иногда, возникает необходимость ремонтной сварки в потолочном положении.

1.2.1 Сварочное оборудование для ручной дуговой сварки

Оборудование иностранного производства, такое как, Kemppi MASTER MLS 3500 (рисунок 2), FASTMiG M420, MEGMEET ARTSEN CM500 используется для ручной дуговой сварки



Рисунок 2. Kemppi MLS3500

Одним из преимуществ таких источников питания, является их мобильность, высокие показатели КПД (таблица 1).

Таблица 1 – Технические характеристики Kemppi MLS3500

Способы сварки	TIG, MMA
Диапазон тока	10–350 А
Напряжения для питания	380В
Мощность для питания	15 кВА
Напряжение в режиме XX	80 В
$U_{\text{раб min}}$	20,5 В
$U_{\text{раб max}}$	34 В
ПВ	40 %
I при ПВ100%	220 А

Продолжение таблицы 1

Коэффициент мощности	0,95
Габариты: ширина; длина; высота	180 мм; 500 мм; 390 мм
Масса	21 кг
КПД	0,86

Также свое применение находят источники питания отечественного производства, такие как: ВКСМ–1000, ВДУ–1601, ВДУ–506.. Основное применение таких источников, это автоматическая сварка, но при необходимости выполнения сборочных работ перед автоматической сваркой их используют для ручной дуговой [17].

1.2.3 Режимы, материалы для ручной дуговой сварки

Для ручной дуговой сварки используются электроды:

- Для сварки сталей ст3сп5, сталь 20, С245 отечественные электроды марок МР–3, УОНИ–13/45 и их импортные аналог ESAB ОК 46.00
- Для сварки сталей 09Г2С, 17Г1С, С345 отечественные электроды марки УОНИ–13/55 и импортные аналоги ESAB ОК 53.70, KOBELCO LB–52U, нержавеющей сталей ASI 347SI (аналог 12X18H10T), импортные электроды ОК 61.80, ОК 63.30

В таблице 2 приведены режимы ручной электродуговой сварки в различных пространственных положениях.

Таблица 2 – Режимы ручной дуговой сварки

Марка электрода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток при положении шва в пространстве, А		
		нижнем	вертикальном	потолочном
УОНИ 13–45	3	80–100	60–80	70–90
УОНИ 13/55	4	130–160	100–130	120–140
	5	170–200	140–160	–

Продолжение таблицы 2

MP-3	4	160–200	140–180	140–180
	5	180–260	160–200	–
	6	280–320	–	–

«Эффективность использования штучных электродов и сварочной проволоки, а также производительность сварки характеризуют коэффициентом наплавки, выражающим массу металла, наплавленного за один час и отнесенного к одному амперу сварочного тока: $\alpha_n = G_n / I_{свт}$ »

При ручной дуговой сварке α_n обычно составляет 7...10 г/А · ч, повышаясь до 11...15 г/А · ч для электродов с железным порошком в покрытиях. При автоматической и полуавтоматической сварке типичные значения 18...25 г/А · ч.

Сам темп плавления электродов и проволоки описывают коэффициентом расплавления:

$$\alpha_p = G_p / I_{свт}, \text{ где } G_p \text{ — масса расплавленного электродного металла.}$$

Количество наплавленного металла меньше расплавленного из-за потерь на разбрызгивание и на угар. Коэффициент потерь $\alpha_{п} = (\alpha_p - \alpha_n) / \alpha_p$. [1].

Защита сварочной ванны обеспечивается за счет разложения обмазки электродов при сварке. При разложении обмазки образуются газы, которые и защищают шов [24].

Роботизация ручной дуговой сварки затруднена ввиду того, что скорость плавления электрода возрастает к концу сварки. Приходится увеличивать скорость сварки, для получения одинакового количества наплавленного металла [2].

1.3 Автоматическая сварка под слоем флюса

Автоматическая сварка под слоем флюса, обладает рядом достоинств, таких как стабильность процесса сварки, практически полным отсутствием потерь на разбрызгиваем металла. Во время автоматической сварки, формирование шва происходит без участия сварщика и влияние человеческого фактора исключается. При автоматической сварки под флюсом, защита сварочной ванны обеспечивается за счет расплавления флюса внутри которого горит дуга. Защита сварочной ванны при этом в разы лучше чем при сварке покрытыми электродами [10].

Флюсы бывают плавными и керамическими. Флюсы получают путем сплавления его компонентов и последующим дробление (плавные флюсы), или связыванием порошкообразных компонентов (керамические флюсы). Недостатком таких флюсов является гигроскопичность и необходимость обязательной прокалки перед сваркой. В случае недостаточной прокаливается флюса, не исключено порообразование и не сплавление свариваемых кромок [26].

На базовом предприятии автоматическая сварка под слоем флюса применяется для сварки рулонизируемых полотнищ, а также в качестве эксперимента и исследования возможности дальнейшего применения для сварки щитовой кровли резервуаров.

1.3.1 Сварочные материалы и режимы для автоматической сварки

Для автоматической сварки под слоем флюса используются следующие сочетания сварочных материалов:

- Для стали Ст3сп5, С245 сварочная проволока Св–08ГА с плавным флюсом марки АН–348А или керамическими UF–02, ESAB ОК FLUX 10.71
- Для стали 09Г2С, С345 сварочная проволока Св–10НМА с плавным флюсом АН–47 или керамическими UF–02, ESAB ОК FLUX 10.71

– Для нержавеющей сталей AISI 347si (аналог 12X18H10T) ESAB AUTROD 347SI с флюсом ОК FLUX 10.92, AISI 316Ti(аналог 10X17H13M3T) ESAB AUTROD 316LSI с флюсом ОК FLUX 10.93.

Перед сваркой ответственные конструктивные элементы проходят обязательную подготовку кромок. В частности, для стенок и днищ производится продольно и поперчено фрезерная обработка листа на фрезерных станках, для того чтобы выдержать отклонение 1 мм на 1 метр длины боковой кромки. Такая операция обязательна, ведь при автоматической сварке крайне важно соблюдать зазор между кромками свариваемых деталей (рисунок 3).

Заводское соединение
рулонизируемых полотнищ



Рисунок 3. Типовое сварное соединение

В таблице 3 приведены режимы сварки стали 09Г2С и Ст3сп, используемые на базовом предприятии, данные режимы были утверждены при аттестации технологии сварки. Резервуары входят в перечень опасных производственных объектов, утвержденных РОСГОРТЕХНАДЗОРОМ, базовое предприятие в обязательном порядке проходит проверку готовности к применению технологии сварки

Таблица 3 – Режимы автоматической сварки под флюсом

δ, мм	d _Е , мм	Номер слоя	I, А	U _д , В	V _э , м/ч	V _с , м/ч
3–10	3	1–2	550–600	34–36	145	25,5
10–12	4	1–2	600–650	36–38	90	29

Продолжение таблицы 3

12–14	4	1–2	600–650	36–38	90	29
16–18	5	1	600–650	32–34	57	29
		2–3	700–750	36–38	66	29
19	5	1	600–650	32–34	57	29

Режимы сварки приведены для двухстороннего стыкового соединения без разделки кромок, с полным проплавлением (соединение С7 по ГОСТ 8713)

При рассмотрении данных таблицы 4 возникают вопросы. Скорости сварки и подачи указаны точно, а ток и напряжение дуги в определенном диапазоне. Для толщин от 3 до 10 мм режимы практически не меняются, что сомнительно. Это говорит о том, что тепловые условия сварки могут существенно меняться, что требует корректировки режимов. Разброс режимов можно оценивать с помощью расчета размаха R . Это понятие используется в теории математической статистики [12]. Лучше всего рассматривать относительный размах. Это отношение полуразности значений к их полусумме. С позиции тепловложения для данной толщины металла режим следует оценивать погонной мощностью. Это отношение произведения тока на напряжение дуги к скорости сварки. Представляет интерес изменение этой величины от толщины. Размах по мощности нужно оценивать с учетом того, что меньшему току соответствует меньшее напряжение дуги. Удельная энергия сварки определяется по формуле

$$Q = (U_d I) / (\delta V_c), \quad (1)$$

где U_d – напряжение дуги, I – сила тока, δ – толщина свариваемого металла, V_c – скорость сварки

Результаты расчетов сведены в таблице 4. Для меньшей толщины деталей использовали меньшую мощность

Таблица 4 – Анализ режимов

δ , мм	Полуразмах тока, %	Полуразмах мощности, %	Удельная энергия сварки минимум, кДж/см	Удельная энергия сварки максимум, кДж/см
10–12	4	7,2	73,3	84,7
12–14	4	6,5	62	70
16–18	3,5	3	21	47
19	3,5	3	45	51,8

Однако в зависимости от различных условий сварки, случаются отклонения от предельных значений на 10–20%. Также экспериментальным путем установлено, что при сварке нержавеющей стали обеспечивается значительно большая скорость сварки, с одновременным увеличением скорости подачи проволоки и силы тока [4]. Например, для получения качественного соединения из стали 12Х18Н10Т, силу тока приходилось увеличивать до 800А, подачу проволоки до 120 м/ч, при толщине пластины в 8мм. При использовании рекомендованных режимов, проплавление было недостаточным. Исходя из полученных данных, возникает вопрос о совершенствовании метода и использовании более современных источников питания и сварочных тракторов [21].

1.3.2. Оборудование для автоматической сварки

Поскольку в данный момент используемые источники питания типа ВКСМ–1000 (рисунок 4) и ВДУ–1002 совместно с тракторами АДФ–1002 (рисунок 5), не позволяют регулировать соотношение полупериодов тока, а также имеют большие габариты и массу и проблемы с запчастями в связи со значительным снижением объема их выпуска.



Рисунок 4. Источник питания для сварки ВКСМ–1000



Рисунок 5. Сварочный трактор АДФ 1002

Таблица 5 – Технические характеристики АДФ 1002

Пределы. тока, А:	200–1000
Диаметр проволоки, мм:	2,0–5,0
Защитная среда:	флюс
Напряжение питания, В:	380

Продолжение таблицы 5

Частота сети, Гц:	50
Кол-во фаз:	3
Скорость подачи проволоки, м/ч:	60–362
Скорость сварки, м/ч:	12–120
Ёмкость кассеты для проволоки, кг:	15
Ёмкость бункера для флюса, дм ³ :	6
Межосевое колесное расстояние, мм:	260
Колесная колея, мм:	320
Масса блока управления, кг:	30
Габаритные размеры, мм:	716x346x526
Вес, кг:	45
Частота сети, Гц:	50
Кол-во фаз:	3

Возможные пути совершенствования техпроцесса сварки под флюсом это применение сварки дугой с разнополярными импульсами тока прямоугольной формы для повышения скорости заполнения сварного шва [20]. По данным этой работы производительность наплавки дугой при 90% длительности импульсов обратной полярности выше в 1,5 раза, чем на переменном токе.

1.4 Механизированная сварка

Ещё одним способом сварки на базовом предприятии является механизированная сварка плавящимся электродом в среде защитного газа.

Для понимания влияния полярностей был проведен эксперимент с влиянием полярностей при механизированной сварке.

Для физического понимания влияния прямой и обратной полярности на процесс сварки, был проведен эксперимент с использованием

механизированной сварки. Суть эксперимента заключалась в том, чтобы определить влияние той или иной полярности на деформацию металла.

Для исследования влияния сварки на прямой и обратной полярности, проводится эксперимент, задача которого, при одной и той же скорости сварки, установить относительную величину деформации сварного соединения. На первом этапе используются две пластины 09Г2С толщиной 5мм, 100х120мм и свариваются односторонним тавровым соединением без полного проплавлением. Источник питания инверторного типа Kemppi FastMig M420, совместно с механизмом подачи проволоки FastMig MXf65 (рисунок 6).



Рисунок 6. Kemppi FastMIG M420+MXf65.

Перед сваркой образцы собираются на прихватки и с помощью угольника выставляются перпендикулярно. Прогнозируемые режимы сварки. Ток 120–140А, скорость подачи проволоки 3–4,5 м/мин, напряжение дуги 20–22В. Перед сваркой, скорость подачи подобрать исходя из навыков сварщика. Защитный газ – углекислота 100%, расход 8л/ мин. Проволока сплошного сечения 1,2мм 08Г2С, полированная производства Oliver.

Перед сваркой основных пластин была проведена пробная сварка на обратной полярности и подобрана скорость подачи проволоки исходя из умения сварщика – 7 м/мин (рисунок 7).



Рисунок 7. Пробная сварка пластин

После сварки пробных пластин на подающем механизме были зафиксированы последние параметры сварки (рисунок 8)



Рисунок 8. Подобранные режимы сварки

При этом напряжение, при котором удалось накладывать шов равномерной чешуйчатости 27–28В. Фактические режимы сварки оказались другими. Сила тока на данном источнике питания регулируется автоматически и задается источником, для поддержания скорости плавления электрода. При сварке на обратной полярности сила тока составила 196А (рисунок 9А). Далее была изменена полярность тока, путем перестановки клемм. Во время сварки с использованием прямой полярности сила тока составила 140А (рисунок 9Б).



А)

Б)

Рисунок 9. Режимы сварки

Что говорит о том, что тепловложение в металл на прямой полярности при той же скорости плавления электрода оказалось ниже. На рисунке 10, фотографии образцов после сварка справа– ПП, слева– ОП.



А)

Б)

В)

Рисунок 10. Образцы сваренные на прямой и обратной полярности.

При сварке на обратной полярности отмечено более сильное покраснение металла с обратной стороны, что также говорит о более сильном тепловложении в металл.

В целом сварка на прямой полярности оказалось более затруднительной для сварщика и формирование валика шва с такими же геометрическими характеристиками потребовало изменения режимов сварки.

Горение дуги при сварке на обратной полярности, более стабильно чем на прямой.

На прямой полярности чешуйчатость шва неравномерная, сварочная ванная в момент сварки не имела равных краев, и для поддержания стабильного горения приходилось изменять угол наклона горелки и высоту. Отклонение, платины от вертикальной плоскости практически не заметно, глубину и наличие несплавлений можно оценить по макрошлифу [13].

Этот эксперимент оказался не настолько показательным и в дальнейшем при проведении проходного эксперимента следует брать меньшие толщины и образцы больших размеров.

Зная некоторые параметры, возможно произвести расчет коэффициента потерь.

Расчет коэффициента расплавления α_p производится по формуле:

$$\alpha_p = V_{\text{Э}} \cdot \rho / j, \quad (2)$$

где $V_{\text{Э}}$ – скорость расплавления электрода, см/с. Переводим 7 м/мин в см/с $7 \cdot 100 / 60 = 11,67$ см/с.

ρ – плотность стали 7,8 г/см³.

j – плотность тока, А/см².

Сечение проволоки:

$$S = \pi D^2 / 4 = 1,13 \text{ мм}^2 \text{ или } 1,13 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2. \quad (3)$$

Плотность тока на обратной полярности:

$$J = 190 / 1,13 \cdot 10^{-2} = 16814 \text{ А/см}^2. \quad (4)$$

Отсюда для обратной полярности:

$$\alpha_{\text{РО}} = 11,67 \cdot 7,8 / 16814 = 0,054 \text{ г/(Ас)} = 19,5 \text{ (г/Ач)} \quad (5)$$

Коэффициент расплавления на прямой полярности:

$$\alpha_{\text{РП}} = 19,5 \cdot 190 / 140 = 26,5 \text{ г/(Ач)}. \quad (6)$$

Коэффициент расплавления на прямой полярности во столько раз больше, во сколько раз меньше ток, так как скорость подачи была одинакова. Коэффициент расплавления при прямой полярности увеличивается с ростом номинального напряжения дуги.

При обратной полярности коэффициент расплавления в меньшей степени зависит от номинального напряжения.

Так образом, этот опыт нам подтвердил для сварки в CO_2 немногочисленные литературные данные о том, что производительность расплавления и наплавки использовании прямой полярности. Соответственно провар основного металла изменяется наоборот.

На данной сварочной установке, когда задается скорость расплавления электрода, а ток назначается установкой получается, что ожидаемого эффекта от изменения полярности не будет. Уменьшение тока приведет к уменьшению провара основного металла. Кроме того, провар уменьшится еще и по причине того, что проплавление анодной области меньше, чем катодной. Уменьшение провара приведет к снижению прочности угловых швов[7].

2 Анализ источников питания для роботизации РПИ сварки

2.1 Источники для многодуговой сварки

Один из методов повышения производительности это многодуговая сварка. Многодуговая сварка может производиться дугами, создающим одну сварочную ванну, и дугами, создающими разные сварочные ванны. В первом случае сварка называется трехфазной, во втором двухдуговой.

При двухдуговой сварке дуги перемещаются последовательно вдоль шва. Расстояние между дугами должно выбираться так, чтобы вторая дуга горела между электродом и кристаллизованным металлом, но не остывшим металлом от первой дуги там, где флюс находится еще в расплавленном состоянии. Головка должна позволять менять расстояние между электродами и угол между ними. При необходимости, сварочные дуги могут иметь отличную друг от друга величину подачи тока и скорости подачи проволоки.

В этом случае механизмы, обеспечивающие подачу электродной проволоки, должны иметь независимые системы регулирования. При незначительной разнице в силах тока и скоростях подачи может быть общее регулирование скорости, а дополнительное изменение скорости может производиться сменными роликами. Однако основное изменение скорости должно производиться сменными шестернями или вариаторами. Вся установка должна иметь управление, сосредоточенное на одном пульте [8].

К недостаткам многодуговой сварки можно отнести сильное магнитное взаимодействие дуг. При протекании тока в одном направлении сварочные дуги отталкиваются. Наоборот, при противоположном протекании тока дуги притягиваются. Чередую направление тока в дугах можно обеспечивать их управляемое перемещение. Многодуговая сварка является намного более гибким технологическим процессом, так как появляются несколько дополнительных параметров процесса. Можно использовать электроды

разного диаметра и с разным легированием. Даже использование стандартных проволок позволяет получить очень большой спектр легирования сварного шва.

Сварка по узкому и щелевому зазору показана на рисунке 11, при сварке деталей толщиной более 50мм требуется V-образная разделка кромок, для обеспечения доступа обычной горелки и выполнения многочисленных проходов. При узкощелевой разделке требуется горелка типа «кинжал» прямоугольного поперечного сечения, внутри которой подаётся сварочная проволока, ток, защитный газ и охлаждающая жидкость. Для обеспечения надёжного сплавления кромок изогнутый под углом токоподводящий наконечник совершает периодические качающие движения с короткой задержкой на боковых поверхностях разделки. На рисунке 11 справа показана разделка по щелевому зазору



Рисунок 11. Сварка по узкому и щелевому зазору

Использование узкой разделки позволяет существенно экономить время на изготовление разделки и электродный металл. Соответственно экономится электроэнергия и повышается производительность сварки. Уменьшаются сварочные напряжения и деформации. По сравнению с традиционной разделкой со скошенными кромками объём зазора для сварки в узкую разделку составит едва ли одну треть. При толщине листов 300 мм достаточно узкой разделки шириной всего 20 мм.

Удельный расход электродного металла при сварке можно определить по формуле:

$$g = V_c / 2\rho, \quad (6)$$

где B_C – средняя ширина разделки, см, ρ – плотность электродного металла, г/см³.

Однако сварка в защитных газах в щелевую разделку требует высокой точности соблюдения подготовки кромок и параметров сварки.

2.1. Источник для автоматической РПИ сварки под слоем флюса

Источники питания, используемые в сварке, преобразуют токи сети на два рода тока постоянный (DC) и переменный (AC).

Технологии сварки, используемые при работе на источниках, достигли хороших показателей по производительности и при под управлением автоматике, достигли определенного максимума. Для увеличения скорости сварки, стало развиваться направление сварки с использованием нескольких дуг. В основном применяется двухдуговая сварка.

Сущность двух дуговой сварки заключается в следующем. Основная дуга – ее питание происходит от источника питания постоянного тока и движется она впереди сварочной ванны. Обеспечение глубины проплавления происходит за счет постоянного тока положительной полярности. Питание второй дуги происходит источником питания с переменным током. За счет двух одновременного горения двух дуг поддерживается стабильность.

Поскольку обе дуги создают одну общую сварочную ванну, может возникнуть влияния магнитного поля, вызывающее отклонение их друг от друга. Для избегания влияния магнитных полей дуг, друг на друга, одна из дуг питается источником питания переменного тока. Полярность дуги питаемой от источника переменного тока и направление магнитного поля, создаваемого ей изменятся с частотой 50 раз в секунду. За счет этого минимизируется влияние дуг друг на друга и позволяет контролировать влияние их друг на друга.

Коэффициент наплавленного металла является ещё одним плюсом применения этого метода. В период постоянного тока отрицательной полярности, происходит нагрев электродной области, поэтому в момент отрицательного импульса постоянного тока, коэффициент наплавки на 30% выше, чем при положительном импульсе. При подаче тока разных полупериодов на вторую дугу, за счет наличия полупериода с отрицательным импульсом, коэффициент наплавки увеличивается на 15%. Исходя из этого, двухдуговая сварка позволяет увеличить коэффициент наплавленного металла на 15%, чем при сварке одним электродом, при этом снизив влияние магнитных полей дуг, друг на друга [27].

Однако использование третьей дуги для дальнейшего совершенствования процесса, добавило ряд вопросов, связанных с внедрением этого процесса. Влияние магнитных полей третьей дуги, на первые две, было основной проблемой. Для его компенсации третья дуга должна работать на переменном токе и иметь сдвиг фаз относительно второй дуги. Использование схемы подключения Скотта, позволило бы решить данную проблему. Построение схемы заключается в подключение второго трансформатора, по схеме позволяющей получить постоянный сдвиг фаз между дугами. Фактором, оставляющим внедрение такой схемы, является жесткая привязка к настройкам оборудования. Любая рассинхронизация фаз, приводила бы к необходимости перенастройки трансформатора.

С практической точки зрения это означало, что настройка системы выполнялась один раз, при внедрении в производство, и после этого не подвергалась каким-либо изменениям. Для технологии сварки, ограничивающим фактором стал источник питания. Принцип работы источника, должен был удовлетворять следующим требованиям. Изменение напряжения и тока сети питания в соответствии и изменяемыми режимами сварки, при этом частота работы источника питания оставалась такой же, как и у питающей сети и для исключения наложения токов друг на друга, источник

должен работать на одной фазе [28]. Для работы такого источника, потребовался бы ток мощностью около 260А и напряжением переменной сети 380В. Не многие электрические сети позволяют выполнить данное условие.

Источники питания от производителя Lincoln Electric PowerWave® AC/DC 1000 (рисунок 12) – инвертор с цифровым управлением, который позволяет получать различные формы тока, без изменения аппаратной составляющей источника.



Рисунок 12. Lincoln Electric AC/DC 1000

Особенностями данного источника является:

- Изменение вольтамперных характеристик на жесткую или падающую
- Наличие возможности выбора формы тока – прямоугольную или синусоидальную
- Настройка частоты тока от 10 до 100Гц

- Настройка соотношения длительности отрицательного и положительного полупериода(баланса полярности)
- Смещение нулевой точки отсчета полуволны, для возможности изменения амплитуды отрицательного и положительного полупериода волны
- Настройка сдвига фаз между дугами от 0° до 359° .

Для понимания каждой из особенности рассмотрим их детально.

На рисунке 13 представлено сравнение прямоугольной и синусоидальной формы волны.



Рисунок 13. Сравнение видов волн

На графике для наглядности изображены обе формы волн. В зависимости значения переменного тока 50 или 60 Гц, количество пересечения нулевой точки в секунду будет от 100 до 120 раз в секунду соответственно. Однако в короткий период времени, когда ток переходит ноль, отмечается нестабильное горение дуги. У тока прямоугольной формы, переход происходит значительно быстрее, поэтому устойчивость горения дуги значительно выше.

Ещё одно преимущество тока прямоугольной формы, можно увидеть на рисунке 14. Связано оно с регулировкой частоты

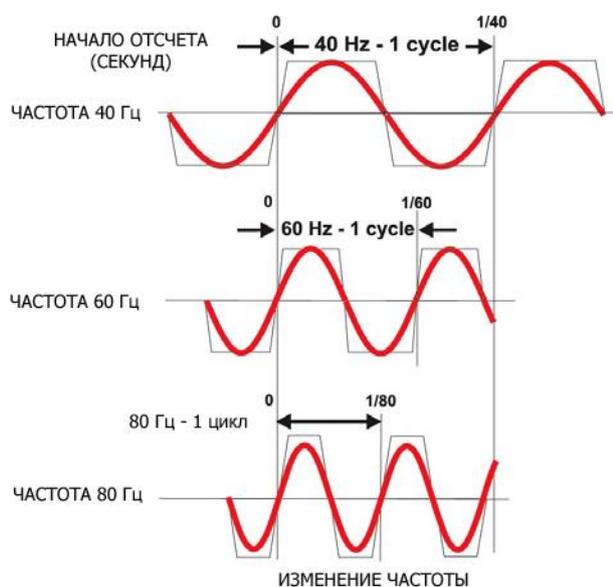


Рисунок 14. Сравнение частоты волн

При изменении частоты тока, меняется время пребывания волны в околопиковых значениях, а также время перехода с одной полярности на другую. На графиках видно, увеличение времени пребывания волны в том или ином полупериоде, при уменьшении частоты [29]. Кроме того, от площади на графике под волной, зависит коэффициент наплавки и глубина проплавления, а также стабильность горения дуги. Чем больше площадь на графике под волной, тем больше энергии выделяется во время горения дуги.

На практике изменение частоты переменного тока служит для изменения формы зоны проплавления стыковых и угловых швов.

Производитель оборудования приводит следующий пример:

Выполняется сварка углового шва на следующих режимах:

- диаметр проволоки 4мм
- сварочный ток 525А
- смещение нулевой точки волны: 25% положительный период, 10% отрицательный период
- скорость сварки 83 см/мин

На рисунке 154 изображено влияние изменения частоты волны на глубину проплавления, отмечается значительное увеличение проплавления при частоте 70Гц

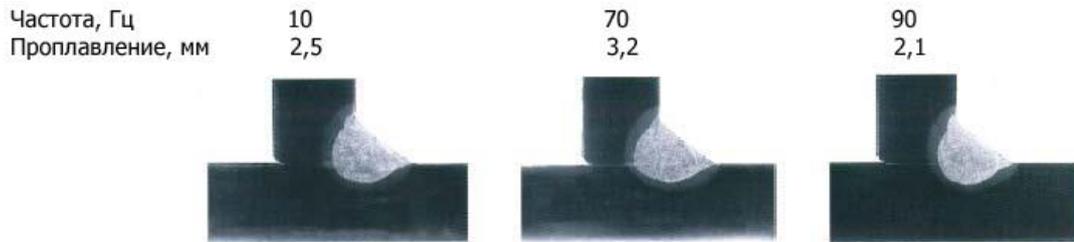


Рисунок 15. Макрошлифы

Пример изменения длины полуволны показан на рисунке 16. Отношение к длительности периода волны измеряется в процентах. Оно показывает время нахождения дуги в положительном или отрицательном полупериоде и называется балансом полярностей

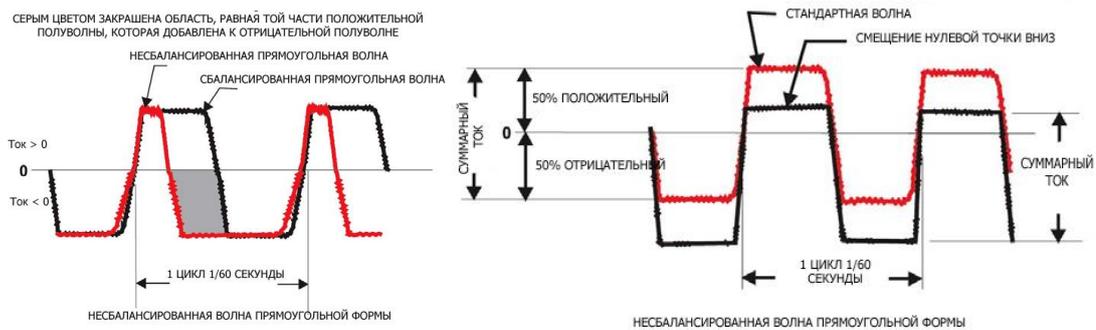


Рисунок 16. Пример изменения полуволны

На приведенных схемах волна черного цвета изображена с балансом 50%, а красного 25%. При изменении соотношения положительного и отрицательного полупериода волны, оказывается возможным изменять соотношения между фазами наплавки и проплавления. При уменьшении

величины баланс, увеличивается коэффициент наплавки и уменьшается глубина проплавления. С помощью данной регулировки можно изменять коэффициент наплавки, исключать прожоги и увеличивать скорость сварки не меняя общую погонную энергию.

С помощью регулировки смещения нулевой точки для изменения положительной и отрицательной амплитуды полуволны, можно увеличить фазу влияющую на проплавление или наплавку. Сварочная установка PowerWaver AC/DC 1000 позволяет смещать нулевую точку в диапазоне от -25% до $+25\%$. При смещении нулевой точки происходит увеличение амплитуды положительного или отрицательного полупериода волны, по сравнению со сбалансированной волной, где эти полупериоды одинаковые. Также это можно представить как виде наложения постоянного тока разной полярности на обычную волну. Увеличение положительной амплитуды волны ($+25\%$) приведет к увеличению постоянной составляющей тока положительной полярности и более высокому проплавлению, а при смещении нулевой точки в противоположную (-25%) увеличится количество наплавленного металла и снизится проплавление.

Регулировка сдвига фаз между дугами в диапазоне от 0° до 359° . При помощи цифрового управления удается достигать сдвига фаз между дугами [31]. При использовании функции, появляется возможность соединять два и более сварных источника в единую машину, а при необходимости использовать по отдельности. На рисунке 17 показаны диаграммы смещения сдвига фаз

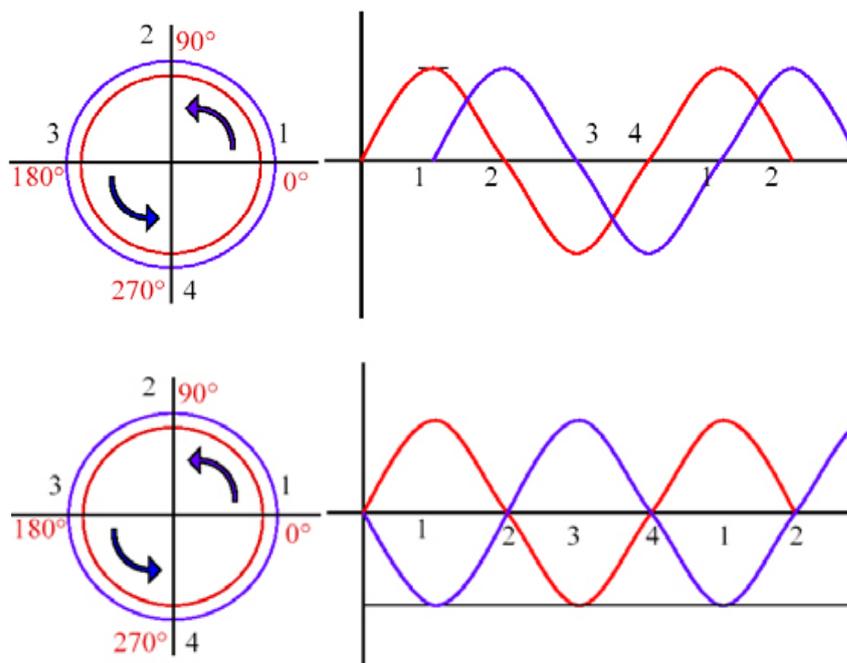


Рисунок 17. Диаграмма смещения сдвига фаз

На первой диаграмме изображен сдвиг фазы на 90° . Такой сдвиг фаз необходим для работы на двух дугах. В этом случае, пиковое значение одной волны, совпадает с переходом через ноль другой. При таком смещении снижается влияние волн друг на друга.

На второй диаграмме изображен сдвиг фазы на 180° . При таком сдвиге фаз, волны будут оказывать максимальное влияние друг на друга. Так как волны достигают своих пиковых значений одновременно.

Таким образом, при правильном подборе режимов сварки, величины смещения полупериодов и фаз сдвига можно достигать значительного увеличения скорости сварки, без потери качества. На рисунке 18 приведен график зависимости наплавленного металла, от силы тока при разных величинах смещения полупериодов и сдвига фаз

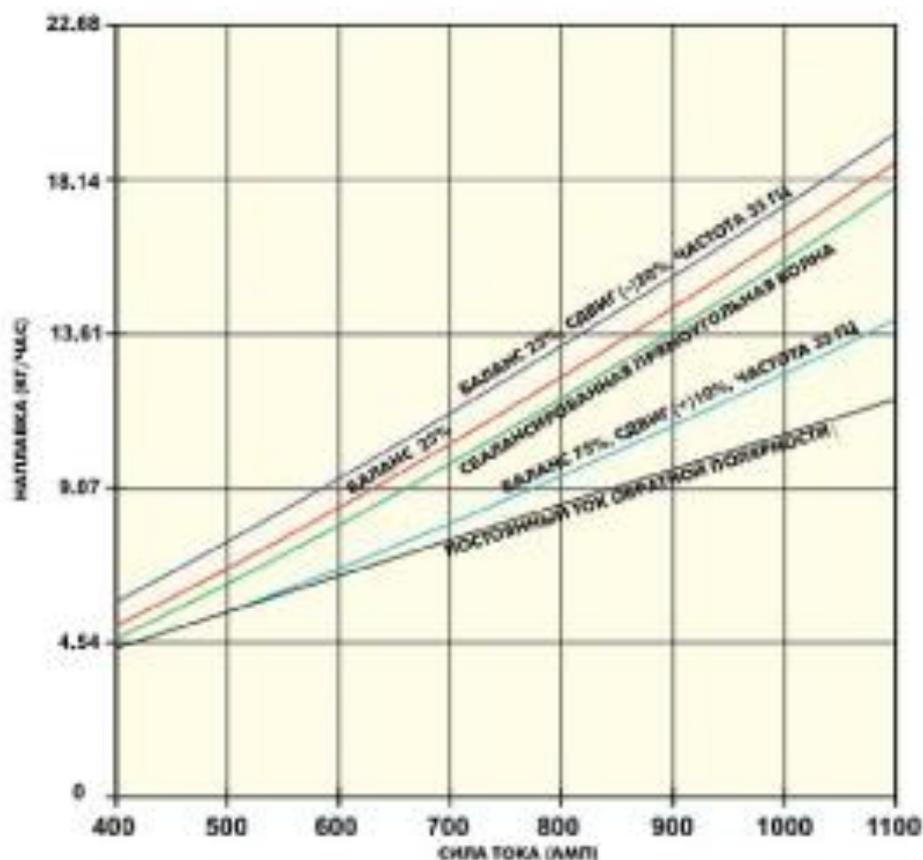


Рисунок 18. График зависимости наплавленного металла

Например, при сварке на токе 800А, используя оборудование PowerWave AC/DC, увеличивается скорость наплавки более чем на 40%, по сравнению с наплавкой на постоянном токе обратной полярности. Во время внедрения новых технологий сварки, показателем ее эффективности, будет являться качество получаемых соединений. Оно определяется по механическим свойствам сварного соединения [30].

Повышение скорости наплавки металла, обеспечивает увеличение скорости сварки, что в свою очередь влияет на уменьшение погонной энергии. Для конкретизации, можно сравнить механические испытания образцов на двух разных режимах сварки (таблица 6–7)

Таблица 6. Используемые режимы сварки

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

Таблица 7. Результаты механических испытаний

Режим сварки	Предел прочности на разрыв, МПа	Предел текучести, МПа	Удлинение (2 дюйма)	Тест по Шарпи при -51°С	Тест по Шарпи при -29°С
DC+	538	459	30	85	158
АС, баланс 30%, частота 40 Гц	567	480	28	77	135

При сравнении двух результатов видно, что применение разнополярной импульсной сварки снижает количество погонной энергии на каждый проход, увеличивает скорость сварки и наплавки более чем на 40% при этом не ухудшая механические свойства соединения[18].

2.1.2 Применение автоматической РПИ сварки под слоем флюса

Такой способ сварки можно применить как для сварки при использовании рулонирования элементов конструкции, так и для отдельных конструкций, таких как щитовая кровля, в которой сварные швы прямолинейные и могут свариваться как механизированной, так и автоматической сваркой.

При сварке полотнища, очень важно сварку производить в нужном порядке, а также следить за тепловложением в металл. Поскольку большое тепловложение приведет к деформации металла и образованию неровностей и

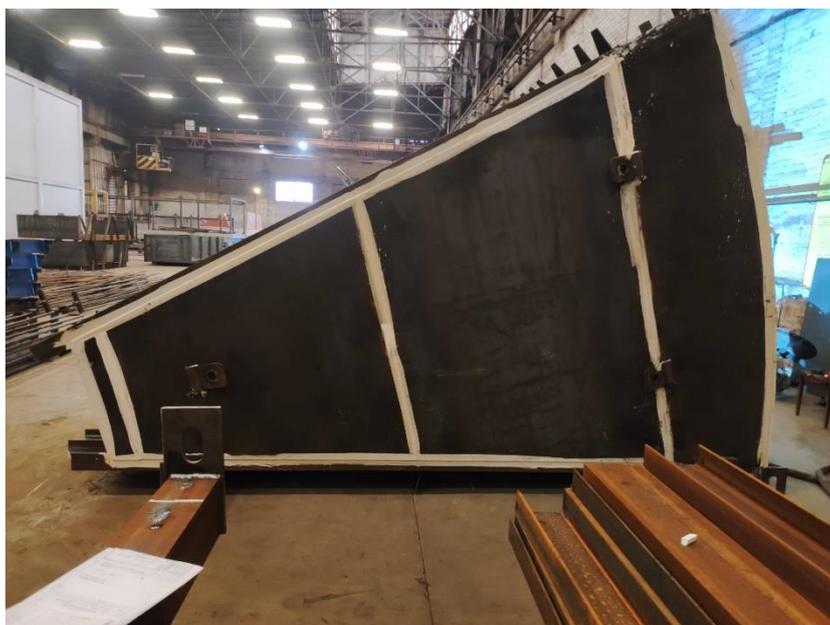


Рисунок 20. Готовая часть щитовой крыши

Использование более мобильных автоматических установок значительно сократило бы время наладки оборудования и увеличило общую производительность [25].

Согласно приведенному выше описанию способа применение сварки РПИ. Для угловых швов, с оборудованием РПИ уменьшается провар корня, что, по – видимому, будет не столь критично, поскольку на такой настил не действует такая большая нагрузка, как на остальные части резервуара, но при этом производительность наплавки будет значительно увеличиваться в том или ином полупериоде. Решение этого вопроса необходимо совместно с конструкторами резервуаров. Возможно рассмотрение применения комбинации разных способов.

Дуга обратной полярности под флюсом обладает большей проплавающей способностью по сравнению с дугой прямой полярности вследствие большей величины эффективного падения напряжения катодной области. Этим объясняется и уменьшение провара с уменьшением доли обратной полярности при сварке разнополярными импульсами [2].

2.2 Механизированная РПИ сварка

Для разнополярной импульсной сварки в современных источниках питания для аргодуговой сварки применяются новые полупроводниковые приборы, электронные элементы управления, повышающие точность регулирования и стабилизации параметров режима сварки, при этом габариты источников значительно уменьшаются, вместе с уменьшением комплектующих. Полупроводниковые преобразователи формируют в сварочной цепи переменный прямоугольный ток, благодаря которому повышается стабильность горения дуги.

Современные источники питания – сварочные инверторы преобразовывают постоянный ток в переменный с возможностью задавать форму импульса тока, частоту, амплитуду и выходное напряжение. Свое распространение инверторные источники питания получили за счет ряда преимуществ по сравнению с традиционными источниками питания трансформаторного типа. Как правило, инверторы TIG-сварки имеют блок поджига (встроенный осциллятор) и стабилизирующий высокочастотный блок, который способствует стабильному переходу через ноль.

Также существуют источники питания MIG/MAG сварки с РПИ, которые можно автоматизировать и применять для автоматической сварки. Одним из таких источников является DW 300 AC/DC (рисунок 21).

Отличительной особенностью такого источника питания является возможность работы, как на постоянном так и переменном токе с изменяемыми импульсами, что будет универсальным и практичным решением для производства. Возможно применение импульсной разнополярной сварки для сварки щитовой кровли, описанной ранее.



Рисунок 21. Установка DW–300

Таблица 8 – Характеристики установки

Количество фаз	3
Номинальное энергопотребление	18 кВА
Номинальный рабочий цикл	80%
Максимальный сварочный ток	300 А
Номинальное напряжение нагрузки	29 В
Ограничения сварочного тока	30 – 300 А
Пределы напряжения сварочной дуги	12–36 В
Макс. напряжение без нагрузки	81 В
Размеры (Д x Ш x В)	705 x 300 x 595 (без ручки)
масса	66 кг

2.2.1 Обоснование использования импульсной сварки, на примере сварки нержавеющей сталей

Одной из особенностей, выявленной при сварке нержавеющей сталей, типа ASI 316Ti (10X17H13M3T), ASI 321(12X18H10T) являлась

невозможность производить качественную и быструю сварку без использования импульсно–дуговых процессов. Первоначально производилась сварка нахлесточного соединения. Сварные соединения рассмотрим на примере щитовой кровли резервуара выполненной из двух видов стали (рисунок 21).

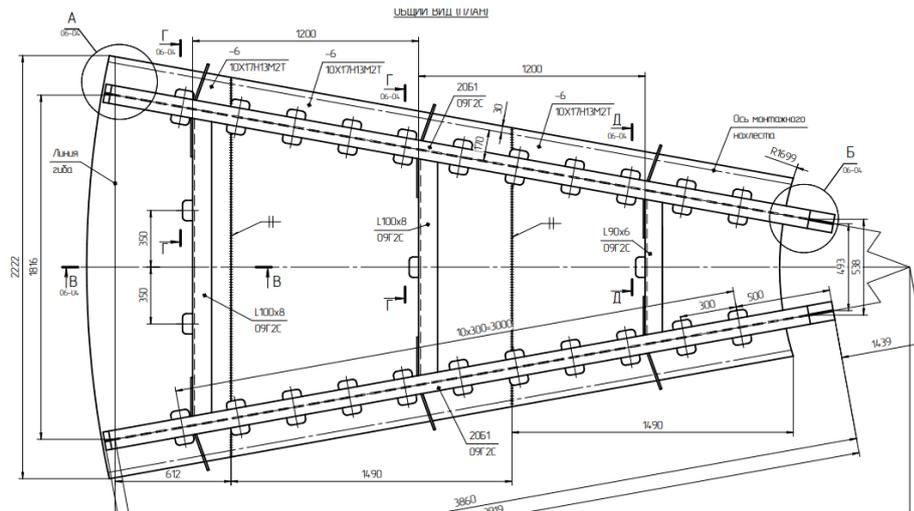


Рисунок 21. Щитовая кровля

Рассматривая конкретный резервуар, для которого применяется такая конструкция, необходимо отметить, что перекрытие крыша будет выполнена из двух типов перекрытия: щит и настил(рисунок 22).

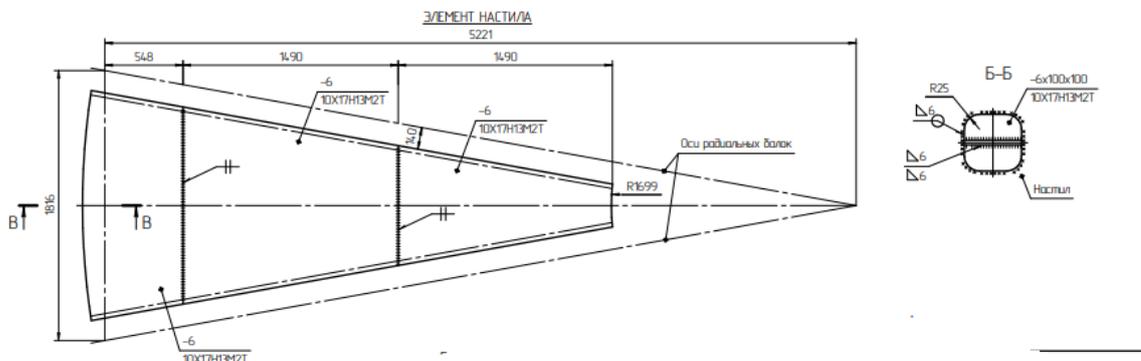


Рисунок 22. Настил крыши

Такая конструкция применяется для снижения веса крыши резервуара, что также влияет на конечную стоимость выпускаемой продукции, без снижения эксплуатационных характеристик. При монтаже крыша монтируется «через щит», то есть между двумя щитами оставляют место для одного щита, которое позже закрывается настилом.

Перед сборкой щита, выполнялась сварка настила, показан на рисунке 2, а также элементов перекрытия щита. Использовалась автоматическая сварка, под слоем флюса. Данному предпочтению было отдано ввиду того, что сварка будет выполнена более быстро и качественно, чем при использовании механизированной, однако и во время этой сварки, возникали сложности. В частности, для получения качественного соединения из стали 12Х18Н10Т, силу тока приходилось увеличивать силу тока 800А, подачу проволоки до 120 м/ч, при толщине пластины в 8мм. При использовании рекомендованных режимах, проплавление было недостаточным. Данное изделие выполнено из стали 10Х17Н13М3Т, что значительно повлияло на режимы автоматической сварки. Перед сваркой изделия, в обязательном порядке производится сварка пробной пластины швом С7 по ГОСТ 8713, такой же толщины из той же марки стали. При сварке пластины было выявлено, что режимы, применяемые ранее «режут» данную сталь. Опытным путем были установлены режимы ниже рекомендуемых. Ток сварки составлял 450–500А, напряжение 32–34 В, скорость подачи проволоки 80м/ч. Сварочные материалы и оборудование используемые при сварки:

Сварочный флюс: плавный керамический ESAB ОК FLUX 10.92;
Сварочная проволока: ALFA GLOBAL ER316Ti, 316ti по AWS A5.9 аналог Св-04Х19Н11М3. Сварочный трактор ТС16–2, совместно с балластными реостатами РБ–300 и источником питания ВДМ–1202С.

Использование импульсно дуговых процессов могло бы положительно сказаться в данном случае, поскольку было бы возможно работать на

переменному токе и для увеличения проплавления увеличивать преобладание прямой полярности. В подтверждение тому можно привести результаты экспериментов, проведенных ранее. Эксперименты проводились на алюминиевых сплавах. В таблице 9 приведены результаты экспериментов.

Таблица 9 – Параметры сварных соединений

№ образца	$I_{св}, A$	$t_{св}, c$	$Q_{ар}, л /мин$	Баланс полярности ПП/ОП	D сварной точки, мм	D нижней точки, мм	Глубина проплавления, мм
1	100	10	8	90/10	8	4	3
2	100	10	3	90/10	8	3,5	3
3	100	10	3	75/25	9	5	2,5
4	100	10	3	25/75	11	5	2
5	100	10	7	60/40	10	3	3
6	100	10	7	40/60	10	3	2,5
7	100	10	7	25/75	13	4	1,5
8	100	10	7	40/60	10	4	2

«Проведено сравнение образцов и параметров сварки, в результате выяснено, что с увеличением длительности обратной полярности уменьшается степень проплавления изделия, однако при этом увеличивается ширина точки. Точки, сваренные с преобладанием обратной полярности, имеют характерный металлический блеск, что подтверждает ранее известные утверждения, о хорошей очистки сварочной ванны за счет катодного распыления на обратной полярности. Точки, сваренные с большим преобладанием прямой полярности (90/10), имеют потемнения и различные включения. Это подтверждает то, что получение качественного сварного соединения на прямой полярности невозможно».

Такие выводы были сделаны по сварке алюминиевых сплавов, однако их можно перенести и на нержавеющую сталь, поскольку целью является получение соединения с глубоким проплавлением и небольшим количеством наплавленного металла.

2.2.3 Особенности механизированной импульсной сварки

Первоначально была произведена сварка нахлесточных соединений на самом щите. Приваривалась пластина 6x150x200 мм к элементам настила, сваренных ранее автоматической сваркой. Как указано в литературе, сварку нержавеющих сталей рекомендуется выполнять на короткой дуге, в режиме капельного переноса [5,6]. Для выполнения этого условия были установлены следующие режимы сварки. Подача проволоки 4 м/ч, напряжение 22,5 В. Сварка производилась на сварочном оборудовании КЕМРР (рисунок 23).

Источник питания инверторного типа Kemppi FastMig M420, совместно с механизмом подачи проволоки FastMig MXf65.



Рисунок 23. Kemppi FastMIG M420+MXf65.

Источник питания производит автоматическую регулировку тока, а зависимости от скорости сварки. Данный источник питания не имеет режима импульсной сварки. Что, как выяснилось позже, оказывает значительную

роль, при сварке нержавеющей стали. При режимах сварки указанных выше, сварное соединение имело следующий вид (рисунок 24). Как видно на рисунке, шов имеет правильную чешуйчатость, катет соответствует установленным нормам, отсутствуют подрезы и не сплавления. Минусом такой сварки является скорость. При дальнейшем увеличении скорости подачи проволоки и напряжения, шва такого же качества получить не удавалось. При скорости подачи проволоки, свыше 6 м/мин начинался струйный перенос, что не позволяло получить правильную чешуйчатость шва, а также приводило к большому тепловложению в металл и деформации. При сварке ток достигал 250–270А, что не позволяло выполнять швы, длиной более 300мм, поскольку был отмечен перегрев наконечника горелки. Медный наконечник, приобретал белый цвет в следствии перегрева, а после остановки сварки, проволока в нем залипала. Перегрев, можно также объяснить более высоким сопротивлением нержавеющей стали и более низкой теплопроводностью, по сравнению с черной сталью. Поэтому, применимость таких режимов сварки и дальнейшее ее использование было не целесообразно. Одним из вариантов являлось переход на другое оборудование и другие режимы сварки.



Рисунок 24. Нахлесточное сварное соединение.

Одним из решения данной проблемы, было использование сварочного аппарата с поддержкой функции импульса и двойного импульса.

Был выбран источник питания совместно с источником питания MEGMEET DEX PM3000S (рисунок 25).



Рисунок 25. MEGMEET DEX PM3000S

Его характеристики приведены в таблице 9

Таблица 9– Характеристики источника питания

Режим управления	полностью цифровой
Напряжение питания	-3x380 В +-25% (285 – 475 В)
Частота сети питания	45 – 65 Гц
Потребляемая мощность	9,2 кВА (8,7 кВт)
Коэффициент мощности	0,94
Эффективный КПД	90%
Номинальное напряжение холостого хода	54,2 В

Продолжение таблицы 9

Диапазон тока сварки	30 – 300 А	
Диапазон напряжения дуги	12–30 В	
Номинальный рабочий цикл	280А / 60% / 40°С	
Процессы сварки	CO ₂ /MAG/MMA, DC	CO ₂ /MAG/MIG, DC/импульс/двойной импульс
Последовательность сварки	2–такта	2–такта / 4–такта / 4– такта спец.
Диаметр проволоки	0,8/1,0/SP мм	0,8/1,0/1,2/SP мм
Свариваемые материалы	Углеродистая сталь	Углеродистая / нержавеющая сталь, Алюминиевые сплавы
Регулировка скорости подачи проволоки	1,4 – 28 м/мин	
Динамика дуги	–9–+9	
Класс защиты	IP23S	
Габаритные размеры	610 x 260 x 398 мм	
Масса	25,4 кг	

Принцип импульсной сварки заключается в следующем: сварочная ванна формируется путем переноса расплавленного металла в сварочную ванну капельным путем, по принципу переноса одной капли в одном импульсе

Импульсная MIG/MAG сварка представляет собой вариант обычного процесса сварки MIG/MAG, в котором ток пульсирует с частотой. Некоторые современные аппараты позволяют регулировать частоту импульса. Поскольку скорость подачи электродной проволоки не равна скорости её плавления, был введён дополнительный импульс для контроля переноса металла при работе на малых токах путем наложения импульсов высокого тока короткой

длительности. Цикл (рисунок 26) состоит из применения многократного импульсного тока в течение постоянного фонового тока, что обеспечивает образование капли на конце электрода.

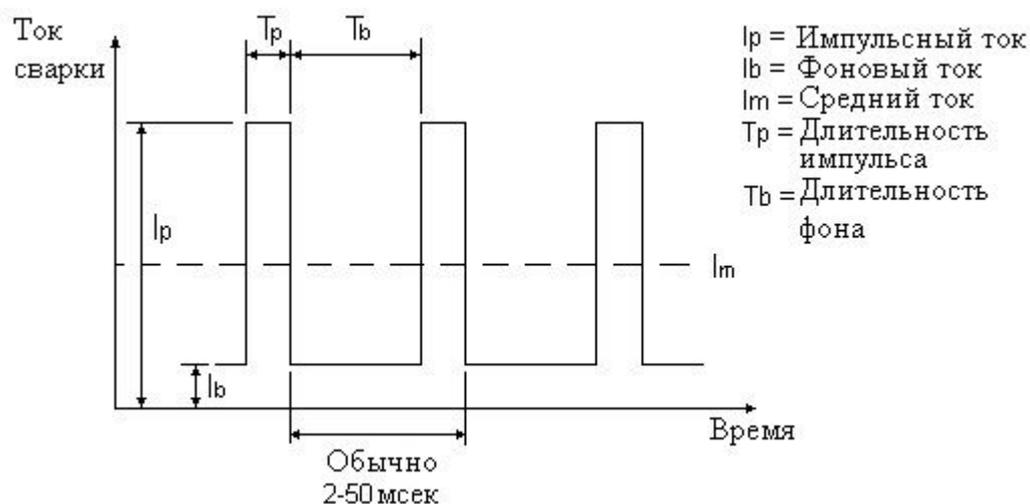


Рисунок 26. Цикл импульсной сварки

Методом подбора тока импульса и дуги можно ускорить плавку проволоки электрода, способствовать изменению формы и размеров сварочного шва. Наконец, можно уменьшить нижний предел сварочного тока, который отвечает за стабильность горения дуги.

Управляемый перенос металла помогает улучшить качество сварки. Данный метод является одним из самых лучших и эффективных [22]. Во время осуществления импульсной сварки разбрызгивания совершенно отсутствуют, не образуются несплавления. По сравнению со сваркой неплавящимся электродом импульсная сварка позволяет в 3—8 раз повысить производительность процесса и значительно снизить сварочные деформации при практически одинаковом качестве сварных соединений. Импульсная сварка может применяться для конструкций ответственного назначения из разных марок сталей, алюминиевых, медных, никелевых сплавов и титана толщиной от 1 до 50 мм при выполнении швов во всех пространственных

положениях. Благодаря высокой пространственной стабилизации дуги (рисунок 27) и возможности применения вылета электрода большой длины этот процесс может быть успешно применен для сварки стыковых соединений толстолистовых материалов с узкощелевой подготовкой кромок.

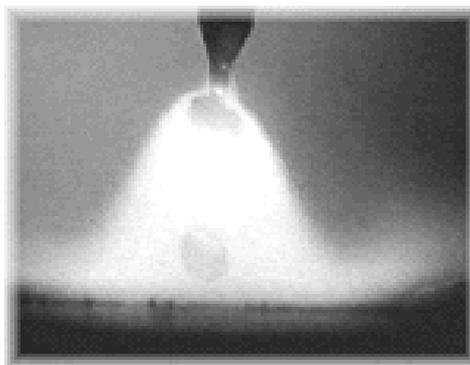


Рисунок 27. Капельный перенос при импульсной сварке.

Применяемый сварочный аппарат позволяют использовать широкий диапазон амплитуд импульсов различной длительности и формы волны на частотах от нескольких герц до нескольких сотен герц. Амплитуда и длительность импульса, объединённые должным образом, создают дугу, способную расплавить и отсоединить каплю электродной проволоки диаметром, близким к толщине этой проволоки.

Такая дуга в паузах между возбуждениями импульса не оказывает существенного влияния на глубину расплавления металла. За счет этого достигается устойчивое горение дуги в пространстве, улучшается качество сварки: отсутствует разбрызгивание расплавленного металла проволоки, целиком устраняются кратеры из сварных точек при уменьшении требуемых участков перекрытия в месте сварного шва. Выбор целесообразного отношения токов дуг (импульсной и дежурной) способен также значительно ускорить процесс сварки, но этот процесс является сложной

операцией. Высота и длительность импульса зависят от состава проволоки, её диаметра и в меньшей степени от состава защитного газа.

Так же можно отметить принцип двойного импульса, он заключается в следующем.

Сутью MIG/MAG процесса с двойными импульсами является модулирование высокочастотного несущего сварочного тока, вырабатываемого силовым инвертором, с низкочастотными импульсами, которые формируются вторичным инвертором. При этом существенно изменяется форма импульса и соотношения ток/пауза. За счет изменения формы импульса и угла наклона фронта волны импульса появляется возможность получения управляемого мелкокапельного переноса в режиме короткого замыкания.

Режим короткого замыкания характеризуется плавным перетеканием капли с конца электродной проволоки в сварочную ванну [18].

Размер капли практически соответствует диаметру электродной проволоки, что позволяет уменьшить размер ванны жидкого металла и улучшить растекание капли в ванне. Уменьшение размера ванны ведет к правильному равномерному формированию обратного валика, повышая качество корневого прохода и улучшая условия сварки тонкого металла. При работе с тавровыми швами двойной импульс тока позволяет получить шов с вогнутым катетом и избежать появления вероятных концентраторов напряжений в зоне сплавления.

Итог перехода на импульсную сварку дал весьма положительный результат. Необходимо учитывать то, что большинство сварочной проволоки для сварки нержавеющей сталей, рекомендуют использовать режим MIG-PULS. Также в процессе сварки выявлено, то что использовать горелку для подающего механизма длиной 4 и 5 метров нельзя. Причиной этому является сварочная проволока, которая более «мягкая», чем проволока для

нержавеющей стали. При использовании таких горелок происходит ее замятие на подающих роликах.

В результате были подобраны следующие режимы сварки:

Для нахлесточных соединений (на рисунке 26, пластины укладываемые между балкой и щитом), первый слой режим двойного импульса, для получения глубокого проплавления качественного сплавления. Режимы: подача проволоки – 6 м/мин, напряжение – 26В, ток сварки – 170А. Второй слой режим одинарного импульса, для получения шва правильной геометрической формы. Режимы: подача проволоки – 7,5 м/мин, напряжение – 29В, ток сварки – 195А. При этом отмечено, лучшее сплавление чем при сварке без импульса.

Ещё одним плюсом, который значительно увеличивает производительность – отсутствие брызг, на зачистку которых уходило значительное время. Но у импульсной сварки также есть и минусы, один из которых пространственные положения при сварке. Импульсную сварку выполняется преимущественно в нижнем положении. В других положениях, шов начинает стекать и получить качественное проплавление с правильным формированием обратного валика, практически невозможно.

2.2.3 Технические характеристики установки для сварки плавящимся электродом с РПИ

В качестве установки для сварки плавящимся электродом с РПИ возможно использовать в качестве источника питания, который имеют функцию сварки разнополярными прямоугольными импульсами тока. Для экспериментальной установки возможно использовать источник питания AURORA TIG200P, который есть на базовом предприятии. В качестве подающего механизма, возможно использование ПДГО–510.

Характеристики источника питания AURORA TIG200P (рисунок 8) приведены в таблице.



Рисунок 28. AURORA TIG200P

Источник для аргодуговой сварки на постоянном токе TIG DC (5–200А) и для сварки алюминия переменным током TIG AC (20–200А).

Таблица 10 – Технические характеристики

Напряжение питающей сети	230,В
Потребляемая мощность	9,5кВа
Рекомендуемая мощность генератора	7,5кВт
Потребляемый ток (TIG/MMA)	28.2,А
TIG сварка	
Напряжение холостого хода	56,В
Сварочный ток	10–200А
MMA сварка	
Сварочный ток	10–160А

Характеристики подающего механизма ПДГО–510 (рисунок 9) приведены в таблице 11



Рисунок 29. ПДГО–510.

Таблица 11 – Технические характеристики

Напряжение питания, В	27
Частота, Гц	50
Номинальный сварочный ток, А	500
Диапазон регулирования сварочного тока, А	60~500
Номинальное рабочее напряжение, В	50
Номинальный режим работы ПВ при цикле 5 мин., %	60
Мощность электродвигателя подающего механизма, Вт	145
Диаметр порошковой проволоки, мм	1,2~2,0
Диаметр стальной сплошной проволоки, мм	1,0~1,6
Пределы регулирования скорости подачи проволоки, м/ч	120~1100

2.3. Разработка схемы экспериментальной установки и методики исследований

Для совместной работы источника питания и подающего механизма понадобится блок питания БП-02 (рисунок 30), для независимого питания подающего механизма.



Рисунок 30. Блок питания БП-02

Большинство современных подающих механизмов работают только совместно с источниками питания того же производителя. Однако, ПДГО-510 может работать независимо от других источников питания, через свой источник питания, что будет актуальным для проведения экспериментов по разнополярной сварке. На рисунке 31 представлена экспериментальная схема установки.



Рисунок 31. Экспериментальная схема установки

Методики исследования:

В процессе сварки с регулируемыми прямоугольными импульсами тока соотношение доли прямой и обратной полярности, могут значительно влиять на форму и размеры сварных соединений. Поэтому представляется интересным получить зависимости изменений данных параметров от процентного соотношения полярностей. Ожидаемым результатом является возможность изменения глубины проплавления, получение качественного шва и повышения эффективности процесса сварки плавящимся электродом с регулируемыми импульсами тока.

На первом этапе исследования будет проводиться эксперимент по изучению геометрических параметров сварного соединения. Неизменным останется подача защитного газа 8 л/мин, скорость подачи проволоки 4 м/мин, сварочный ток 120А. При этом изменялся баланс полярности от 10/90 (прямая/обратная) до 90/10 с шагом 15%, и сварочный ток.

На втором этапе будет произведен разрыв сварных образцов в механической лаборатории, для определения прочностных характеристик, а также сделаны макрошлифы, для определения глубины проплавления.

2.3.1 Разработка методики расчета химического состава шва при роботизированной импульсной сварке

Определить химический состав сварного шва, можно на по его макрошлифам используя анализатор рентгенофлуоресцентный (рисунок 11). С помощью такого прибора проводят входной контроль нержавеющей стали на базовом предприятии. Сталь проверяется на соответствие представленному сертификату качества.



Рисунок 32. Анализатор рентгенофлуоресцентный

После проведения анализа, будет производиться расчет, который в дальнейшем будет анализироваться с полученными результатами.

Сварной шов состоит из основного и наплавленного металлов, которые в процессе сварки перемешиваются, образуя общую сварочную ванну (рисунок 9.1). При этом в сварочную ванну попадают химические элементы из основного металла в количестве, пропорциональном доли основного металла в металле шва O , и из проволоки в количестве, пропорциональном доли наплавленного металла в металле шва H :

$$i_H = \frac{F_H}{F_{\text{ш}}} = \frac{5,4}{18} = 0,3, \quad (8)$$

где F_0 – площадь основного металла в металле шва;

$$i_0 = \frac{F_0}{F_{\text{ш}}} = \frac{12,6}{18} = 0,7 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} F_{\text{ш}} = F_0 + F_h &= \frac{2}{3} \times e \times H + \frac{3}{4} \times e \times a = \frac{2}{3} \times 4,2 \times 4,5 + 5,4 = 12,6 + 5,4 \\ &= 18 \text{мм}^2, H = H_{\text{пр}} + a = 2,4 + 2,1 = 4,5 \text{мм} \\ a &= 0,7K = 0,7 \times 3 = 2,1 \text{мм}, \end{aligned} \quad (10)$$

где F_H – площадь наплавленного металла в металле шва;

$F_{\text{ш}}$ – площадь шва.

площадь шва определяется по формуле, где H – высота шва,

$$e = 1,4K = 1,4 \times 3 = 4,2 \text{мм} \quad (11)$$

После вычисления O и H необходимо рассчитать химический состав шва.

Содержание каждого элемента вычисляется по формуле

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \times I_0 + \mathcal{E}_H \times I_H, \quad (12)$$

где \mathcal{E}_0 – содержание элемента в основном металле;

\mathcal{E}_H – содержание элемента в электроде.

$$\begin{aligned} Ni &= 6 \cdot 0,7 + 7,2 \cdot 0,3 = 6,36\% \\ C &= 0,08 \cdot 0,7 + 0,08 \cdot 0,3 = 0,08\% \\ Si &= 0,8 \cdot 0,7 + 0,8 \cdot 0,3 = 0,8\% \end{aligned}$$

$$Mn = 0,8 \cdot 0,7 + 1,5 \cdot 0,3 = 1,01\%$$

$$Ti = 0,5 \cdot 0,7 + 0,45 \cdot 0,3 = 0,49\%$$

$$Nb = 0,8 \cdot 0,3 = 0,24\%$$

(13)

После расчета химического состава по диаграмме Шеффлера (рисунок 33) определяется его структура. При этом необходимо пользоваться формулами

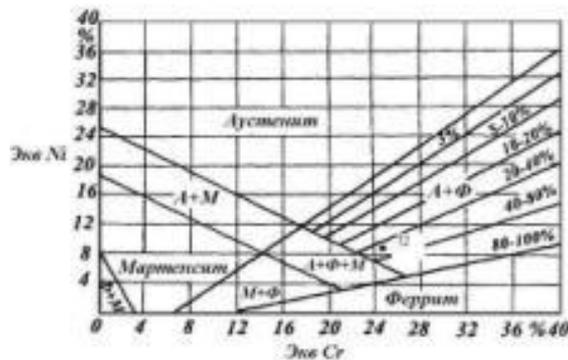


Рисунок 33. Диаграмма Шеффлера

$$Cr = 22 \cdot 0,7 + 21 \cdot 0,3 = 21,7\%$$

$$\text{Экв}Ni = \%Ni + 30 \cdot \%C + 30\%N + 10 \cdot \%B + 10 \cdot \%Mn$$

$$= 6,36 + 30 \cdot 0,08 + 0,5 \cdot 1,01 = 9,3\%$$

$$\text{Экв}Cr = \%Cr + 2 \cdot \%Mo + 5\%Ti + 2 \cdot \%Al + 2 \cdot \%Nb + 1,5 \cdot \%Si + \%V$$

$$+ 1,5 \cdot \%W = 21,7 + 5 \cdot 0,49 + 2 \cdot 0,24 + 1,5 \cdot 0,8 = 25,83\%$$

(14)

По значениям ЭквCr и ЭквNi на диаграмме Шеффлера наносится точка, соответствующая структуре сварного шва – Т2 (рисунок 33).



Рисунок 35. Широкий щит

Сварку этого изделия удалось роботизировать как полностью, так и частично. Длина сварных швов, свариваемых таким методом около 27 метров.

В первом случае сварка производится сборка и последующая сварка каркаса внутренней части каркаса щита. Далее щит переворачивается и производится

Автоматическая (роботизированная) сварка настила. При этом использовалось следующее оборудование:

– Сварочные выпрямитель ВДМ–1200, два трактора ТС–16 подключенных по схеме многопостового подключения (рисунок 34)

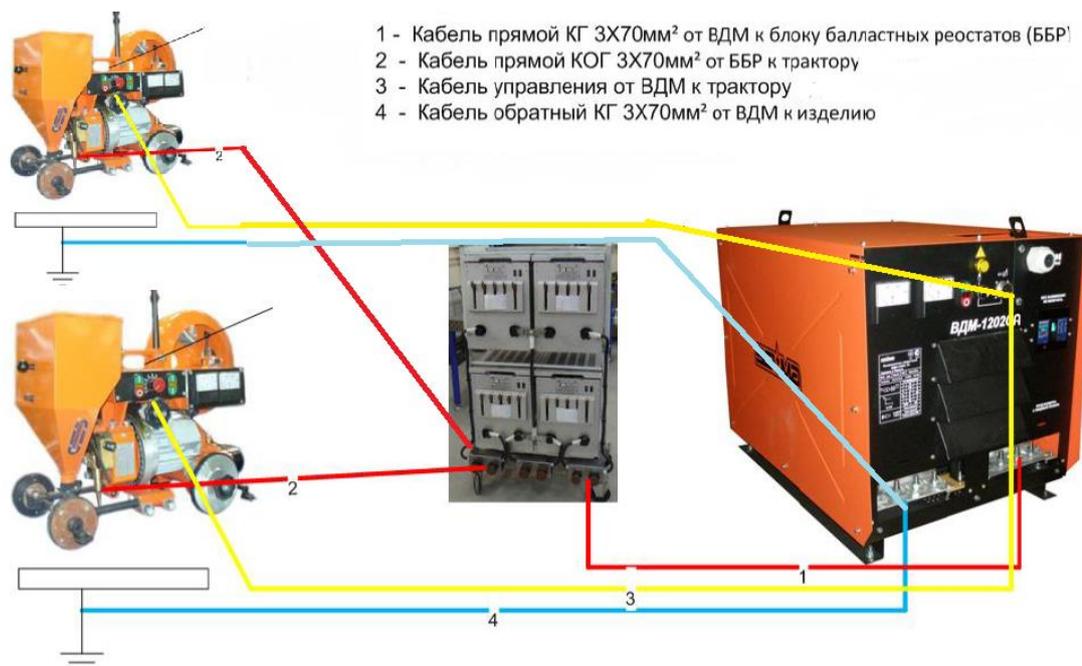


Рисунок 34 – Схема подключения сварочных тракторов

Таблица 12 – Режимы сварки

Толщина металла, мм	Диаметр проволоки, мм	Номер слоя	Род и полярность тока	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, в	Скорость подачи проволоки, м/ч	Скорость сварки, м/ч
3–10	3	1–2	Постоянный обратный полярности	450–600	34–36	145	25,5
10–12	4	1–2		600–650	36–38	90	29
12–14	4	1–2		600–650	36–38	90	29
16–18	5	1		600–650	32–34	57	29
		2–3		700–750	36–38	66	29
19	5	1		600–650	32–34	57	29
		2–3		700–750	36–38	66	29

В таблице 12 приведены типовые режимы сварки однако в как замечено не было замечено ранее отклонения режимов могут случаться в разные стороны 10–20%

Поскольку сварка производилась на токах 400–500 А, удалось использовать один источник питания на два трактора, при этом на тракторах были установлены одинаковые режимы сварки (скорость сварки, скорость подачи проволоки)

Два трактора выставлялись друг напротив друга, и запускались для сварки нахлесточного стыка настила и балки.

Однако минусом данного способа сварки является значительное увеличение катета сварного шва. Обусловлено это тем, что происходит сварка разнотолщинных элементов, настил имеет толщину 4мм, а полка балки 20Б1 8мм. Соответственно катет сварного шва допускается не более 5мм, фактическое значение 12мм и более (рисунок 35). Такое увеличение обусловлено тем, что кромка настила в определённый момент сварки, уже оплавилась, в то время как балка только начинает прогреваться и оплавляться ввиду большей толщины. Расплавленный металл с настила начинивает «натекать» на менее разогретую балку.



Рисунок 35. Сварные швы после автоматической сварки

Натека металла возможно избежать, если производить сварку «в лодочку» и более тонкой сварочной проволокой, но тут возникает риск ссыпания флюса. Еще одним минусом является большое тепловложение при сварке. Крыша резервуара является сферической и балка завальцована под определенны радиус. Происходит термическая усадка металла, который был раннее подвергнут растяжению и стрелка – параметр, по которому определяется величина вальцовки, уменьшается на 10–20 мм. Что является пороговым значение, так как допуск на этот параметр 15мм (рисунок 36).

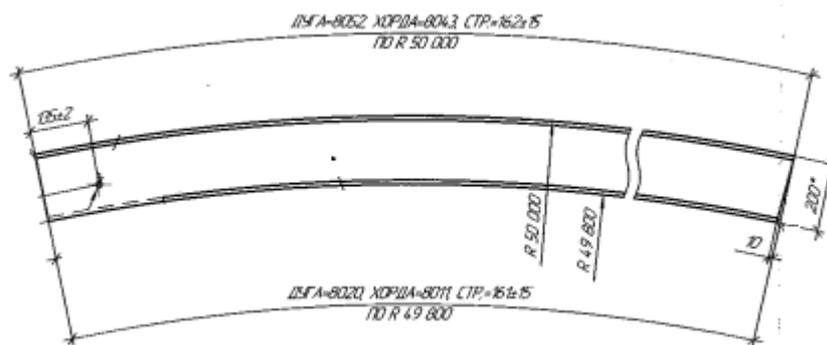


Рисунок 36. Вальцовка балки

Исправление такого дефекта возможно термической правкой, или предварительным увеличением прогиба примерно на величину усадки. Все эти мероприятия не являются трудозатратными и будут весьма оправданы, поскольку качество сварных швов, получаемых после автоматической сварки, довольно высоко, такие швы не требуют дальнейшей доработки и в них практически отсутствуют дефекты (подрезы, неравномерная чешуйчатость) в отличие от механизированной сварки.

Изготовление резервуара начинается с подготовки полуфабрикатов из профильного и листового металлического проката. Профильные детали, как швеллер, уголок и двутавровая балка могут быть изготовлены сварным способом (рисунок 37). Для изготовления балки, необходима специализированная технологическая линия, которая будет в себя включать:

- машины для раскроя листового металла
- сборочные приспособления для получения заготовки
- автоматизированные колонны сварки под флюсом
- стенды для правки грибовидности балки

При этом роботизированной частью будет являться сварка и последующая правка балки.



Рисунок 37. Сборка балки под сварку.

На базовом предприятии, рассматривалась возможность изготовления балок 20Б1 из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Изготовление сварной балки, оказалось в несколько раз дешевле, чем покупка горячекатаной. Однако при этом было выделен ряд проблем. Повышенная грибовидность балки и затрудненная термомеханическая правка. Одним из решения для исключения после сварочных деформаций, это правильный подбор режимов сварки (рисунок 38), обеспечивающий минимальное тепловложение.



Рисунок 38. Режимы сварки

Сварка производилась на следующих режимах:

- Напряжение: 33 Вольта
- Скорость сварки: 80 см/мин
- Скорость подачи проволоки: 125 см/мин

При сварке на данных режимах удалось получить полное проплавление заготовок толщиной 8мм тавровым швом ТЗ.

Для сварки использовалась колонна фирмы ESAB MECNTRAC 3000 совместно с источником питания ARISTO 1000 AC/DC SAW. Управление параметрами осуществляется с помощью цифровых контроллеров.

3.2 Роботизированная сварка

Во втором случае, сварка производилась на сварочных роботах Fronius.

В данном случае, сварка получалась полностью роботизированной. Качество сварных швов, получаемой при этой сварке, было примерно похоже на механизированной сварку, поскольку производилась той же проволокой на тех на же режимах. При этом возникновение дефектов, характерных механизированной сварке, полностью избежать не удалось. На швах местами присутствовали подрезы или надрывы, которые в дальнейшем подвергались зачистке и ремонту уже обычными методами сварки.



Рисунок 39. Сварка настила кровли

На рисунке 39 показана сварка настила кровли, который в дальнейшем будет укладываться на балки (каркас кровли). В данном случае порядок сварки и сборки немного отличается, в нем появляется дополнительный этап сборки каркаса и настила между собой, так как настил и каркас провариваются отдельно друг от друга на разных работах. Сделано это для того, чтобы ускорить производство и минимизировать число перенастроек работа.

3.3. Роботизации дуговой сварки металлоконструкций

Наиболее возможным и целесообразным направлением роботизации производства будет являться, автоматическая сварка в защитных газах комплектующих резервуара (люки, патрубки, фланцы), а также кровли.

Рассмотрим пример технического решения, сварки Люка лаза овального Ду 600х900 (рисунок 40).

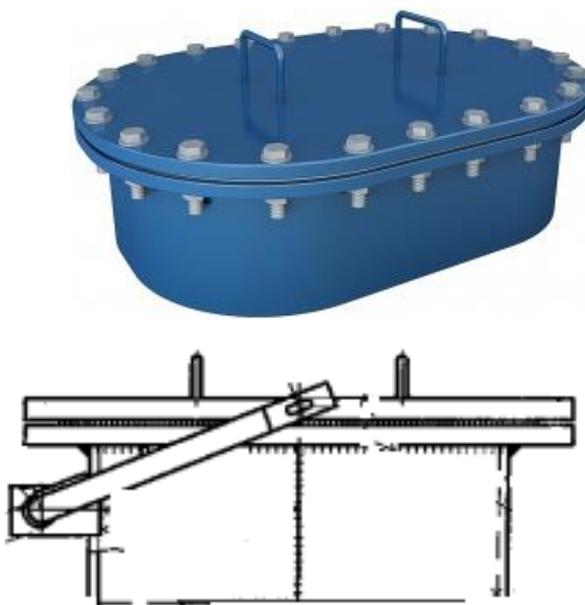


Рисунок 40. Люк лаз овальный 600х900

Люк лаз изготавливается из двух обечайек, вальцованных в полуовалы и свариваемых между собой, а также из овального фланца. В конструкции люка имеется четыре детали, соединяемые между собой сваркой. Соединение двух половинок обечайки, при этом сварной шов накладывается с двух сторон. Основной и внутренний (подварочный) шов фланца.

На рисунке 41 показана возможная установка для сварки данного изделия. Также установку можно использовать для сварки круглых люков, патрубков.

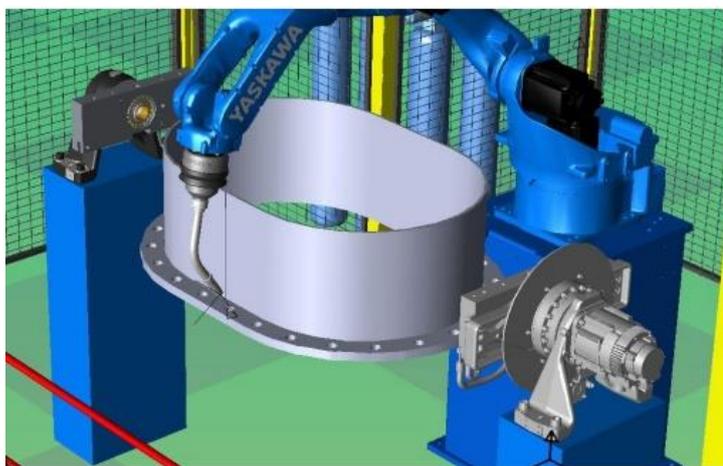


Рисунок 41. Роботизированный комплекс сварки.

Установка состоит из следующих компонентов:

- Специализированная сварочная рука – робот
- Одноосевой позиционер
- Источник питания, в качестве источника питания выбран Fronius TPS500i
- Устройство подачи проволоки Fronius

Рассмотрена и применение альтернативных производителей, имеющих роботизированный интерфейс. Одним из таких будет являться MEEGMET ARTSEN 500.

Преимуществом роботизации сварки данного изделия будет являться, повышение производительности качества сварки, поскольку минимизируется

человеческий фактор. К недостаткам можно отнести то, что при сварочное оборудование будет иметь ограниченный спектр выпускаемых изделий.

По – сколько люки и патрубки занимают небольшую составляющую часть резервуара и целесообразность применения будет оправдала на производствах выпускающих большое количество резервуаров.

Однако применение таких роботизированных установок в качестве универсальных, для сварки других мелкогабаритных изделий резервуара, таких как площадки обслуживания, мелких крепления, нестандартных конструкций особого назначения может сыграть значительную роль в повышении скорости выпускаемой продукции, поскольку источник питания и установка для сварки позволит перенастраивать ее для выпуска другой продукции.

Заключение

Роботизация и автоматизация производства является неотъемлемой частью современного производства резервуаров. В целях повышения качества, скорости выпуска продукции многие предприятия стремятся роботизировать свое производство с минимальными затратами.

В данный момент на базовом предприятии отсутствуют, какие-либо роботизированные комплексы сварки, однако присутствует потенциал для его внедрения и получения положительных результатов, поскольку производство резервуаров является значительной отраслью нефтегазохимической промышленности, поэтому внедрение новых методов может значительно продвинуть производителя на рынке.

В работе рассмотрены, способы сварки резервуарных металлоконструкций возможность роботизации сварки тех или иных участков производственных линий. В процессе выполнения работы:

– Проведен анализ уже используемых способов сварки на базовом на предмет их совершенствования путем роботизации сварки, экспериментальная сварка образцов, для понимания общей востребованности и роботизации и пути ее развития.

– Оценено наличие готовых решений в области роботизации и автоматизации сварки с использованием современных источников питания для сварки в среде защитных газов и под слоем флюса для дальнейшего на производственных участках и линиях

– Определены наиболее возможные направления роботизированной сварки, это сварке в среде защитных и активных газов комплектующих резервуаров, а также РПИ импульсная сварка под флюсом основных конструкций.

– Предложены установки роботизированной сварки позволяющие выпускать различные крупноузловые части резервуаров с использованием различных способов сварки.

Список используемой литературы и источников

1. Акулов, А. И. Технология и оборудование сварки плавлением / А. И. Акулов, Г. А. Бельчук, В. П. Демянцевич. М. : Машино– строение, 1977. 432 с.
2. Аль–Шамки А.А.О., Шепелев А.Ф., Финаев В.И. Особенности плавления присадочного и основного металла при плазменной сварке в аспекте создания систем автоматического управления // Инженерный вестник Дона. – 2019. – №10.
3. Бурмистров Е. Г. Основы сварки и газотермических процессов в судостроении и судоремонте : учебник / Е. Г. Бурмистров. –3– е изд., стер. – Санкт– Петербург : Лань, 2020. –552 с. – ISBN 978– 5– 8114– 5234– 7. – Текст : электронный // Лань : электронно– библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/138176> (дата обращения: 15.11.2022). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
4. Вартгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Вартгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
5. Дидковский В.Н. Резервуары из рулонных заготовок. : Металлургия, 1960. – 65 с.
6. Ельцов, В. В. Технология сварки плавлением : учебное пособие / В. В. Ельцов. — Тольятти : ТГУ, 2019. — 180 с. — ISBN 978–5–8259–1277–6. — Текст : электронный // Лань : электронно–библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/139761> (дата обращения: 29.11.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
7. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах М. : Металлургия, 1989. – 384 с.
8. Климов, А. С. Роботизированные технологические комплексы и автоматические линии в сварке : учебное пособие для вузов / А. С. Климов, Н. Е. Машнин. — 4–е изд., стер. — Санкт–Петербург : Лань, 2021. — 236 с. — ISBN 978–5–8114–6792–1. — Текст : электронный // Лань : электронно–

библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/152449> (дата обращения: 12.04.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

9. Козловский, С. Н. Введение в сварочные технологии : учебное пособие / С. Н. Козловский. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 416 с. — ISBN 978-5-8114-1159-7. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/167867> (дата обращения: 06.03.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

10. Ленивкин В.А., Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. М.: Машиностроение, 1989. 264 с.

11. Людмирский Ю. Г., Солтовец М. В., Грицына А. Н. Принципы организационно-технологического проектирования роботизированных сварочных комплексов // Advanced Engineering Research. – 2007. – Т. 7. – №. 1. – С. 47–53.

12. Львовский, С. М. Основы математического анализа : учебник / С. М. Львовский. — Москва : Высшая школа экономики, 2021. — 368 с. — ISBN 978-5-7598-2405-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/258773> (дата обращения: 07.06.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

13. Масаков, В. В. Сварка нержавеющей стали : учебное пособие / В. В. Масаков, Н. И. Масакова, А. В. Мельзитдинова. — Тольятти : ТГУ, 2011. — 184 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/139749> (дата обращения: 26.06.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

14. Медянцев А. А., Трофимов Д. В. Применение СМТ технологии при сварке алюминиевых понтонных // ББК Ж. я431 (0) П78 МЛ-05 Редакционная коллегия: Горохов Александр Анатольевич, к. т. н., доцент, председатель организации. – 2014. – С. 53.

15. Надежность резервуара вертикального стального : учебное пособие / Э. Ш. Гайсин, Ю. А. Фролов, Г. Е. Коробков [и др.]. — Уфа : УГНТУ, 2020. —

142 с. — ISBN 978–5–7831–2044–2. — Текст : электронный // Лань : электронно–библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/245231> (дата обращения: 06.02.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

16. Николаев, А. К. Трубопроводный транспорт углеводородов / А. К. Николаев, В. В. Пшенин, Н. А. Зарипова. — 2–е изд., стер. — Санкт–Петербург : Лань, 2023. — 76 с. — ISBN 978–5–507–47153–9. — Текст : электронный // Лань:электронно–библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/332690> (дата обращения: 06.06.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

17. Оборудование и основы технологии сварки металлов плавлением и давлением : учебное пособие для вузов / Г. Г. Чернышов, Д. М. Шапин, В. И. Гирш [и др.] ; под редакцией Г. Г. Чернышова, Д. М. Шашина. — 3–е изд., стер. — Санкт–Петербург : Лань, 2021. — 464 с. — ISBN 978–5–8114–6853–9. — Текст : электронный // Лань : электронно–библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/152649> (дата обращения: 20.02.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

18. Потапьевский, А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом / А.Г. Потапьевский. М. : Машиностроение, 1974. 240 с.

19. Сидоров В. П., Советкин Д. Э. Наплавка покрытыми электродами дугой, питаемой разнополярными импульсами тока //Сварка. Реновация. Триботехника: материалы IX Уральской научно– практической конференции. –Нижний Тагил, 2019. – Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ, 2019. – №. 9. – С. 58– 63.

20. Сидоров В.П. Влияние баланса полярностей на эффективную мощность дуги при точечной плазменной сварке алюминиевых сплавов / В.П. Сидоров, Д.Э. Советкин // Вестник РГУПС. – 2019. – № 4. – С. 26–33.

21.Смирнов, И. В. Сварка специальных сталей и сплавов : учебное пособие / И. В. Смирнов. — 3–е изд., стер. — Санкт–Петербург : Лань, 2022. — 268 с. — ISBN 978–5–8114–4275–1. — Текст : электронный // Лань : электронно–

библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/206501> (дата обращения: 26.06.2022). — Режим доступа: для авториз. Пользователей

22. Соловьёв, В. В. Основы робототехники и области её применения : учебное пособие / В. В. Соловьёв, Л. О. Лауденшлегер. — Ухта : УГТУ, 2022. — 149 с. — Текст : электронный // Лань : электронно–библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/267860> (дата обращения: 06.06.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

23. Федосов С. А. К вопросу о влиянии полярности на глубину проплавления и скорость сварки / С. А. Федосов // Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства : сб. материалов Всероссийской науч.–техн. конф. (Тольятти, 25–28 октября 2011 г.) / под ред. В. П. Сидорова [и др.] – Тольятти : Издво ТГУ, 2011. – С. 97–98.

24. Федосов, С. А. Основы технологии сварки : учебное пособие / С. А. Федосов, И. Э. Оськин. — 2–е изд. — Москва : Машиностроение, 2017. — 125 с. — ISBN 978–5–9909179–3–4. — Текст : электронный // Лань : электронно–библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/107157> (дата обращения: 08.05.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

25. Шварц М. В., Малолетков А. В., Перковский Р. А. Применение лазерной системы слежения для управления процессом автоматической MIG/MAG сварки // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2013. – №. 09. – С. 1–12.

26. Шолохов М. А., Мельников А. Ю., Бузорина Д. С. Обеспечение качества сварных соединений путем применения алгоритма выбора параметров режима при роботизированной сварке // Сварка и диагностика. – 2020. – №. 2. – С. 57–60.

27. Martikainen J. K., Moisio T. J. I. Investigation of the effect of welding parameters on weld quality of plasma arc keyhole welding of structural steels // Welding journal– New York– . – 1993. – Т. 72. – С. 329– s.

28. Santosa A. S., Santoso B. N. P. ANALYSIS OF SAW WELDING PROCESS IN PRESSURE VESSEL TANK FOR AMMONIA FLUID WITH PRESSURE CAPACITY OF 13 Pa //Journal of Mechanical and Manufacture. – 2022. – T. 2. – №. 1. – C. 12–19.

29. Song S. et al. Penetration state recognition based on the double– sound– sources characteristic of VPPAW and hidden Markov Model //Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – T. 234. – C. 33– 44.

30. Wang C. et al. A Comparison of Vertical Electro–Gas Welding and Submerged arc Welding Methods on the Corrosion Behaviors of Crude Oil Storage Tank Steel in Simulated Seawater //Int. J. Electrochem. Sci. – 2022. – T. 17. – №. 221253. – C.

31. Yi J. et al. Structural design and kinematic analysis of a welding robot for liquefied natural gas membrane tank automatic welding //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – T. 122. – №. 1. – C. 461–474.