

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)

Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического
оборудования

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Повышение производительности и качества при сварке
технологических трубопроводов на предприятиях нефтехимии

Студент(ка)	<u>А.С. Сливкин</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)
Руководитель	<u>А.С. Климов</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)
Консультанты	<u>Т.А. Варенцова</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)

Руководитель программы: д.т.н, профессор В.В. Ельцов
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) _____ (личная подпись)
« _____ » _____ 20 ____ Г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н, профессор В.В. Ельцов
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) _____ (личная подпись)
« _____ » _____ 20 ____ Г.

Тольятти 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Современное состояние вопроса строительства и ремонта технологических трубопроводов	
1.1 Особенности эксплуатации и обнаружения дефектов в конструкциях нефтегазового сектора.	6
1.2 Описание объекта и вводные данные по необходимому ремонту оборудования.	9
1.3. Сведения о материале изделия.	12
1.4 Оценка состояния металла сварных труб при длительной эксплуатации.	16
1.5 Обзор современных электродных материалов и способов электродуговой сварки плавлением.	24
1.6 Формулировка задач диссертационного исследования	30
2 Анализ вариантов технологий сварки при строительстве и ремонте технологических трубопроводов	
2.1 Учёт особенностей и условий при строительстве и ремонте технологических трубопроводов	32
2.2 Сварка технологических трубопроводов из жаропрочных сталей штучными электродами.	39
2.3 Исследование технологических возможностей сварки порошковой проволокой.	48
2.4 Сварка технологических трубопроводов из жаропрочных сталей механизированной сваркой проволокой сплошного сечения.	52
3 Повышение эффективности строительства и ремонта технологических трубопроводов	
3.1 Анализ обнаруживаемости дефектов при использовании различных способов контроля качества.	60

3.2 Аппаратное обеспечение повышения эффективности методик контроля качества.	61
3.3 Выбор защитного газа.	64
3.4 Повышение эффективности механизированной сварки в защитных газах	68
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.	77
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.	79

ВВЕДЕНИЕ

Сварочное производство как часть мировой экономики, связанной с изготовлением металлических конструкций, испытывает в последние годы существенное влияние спадов и подъемов в финансовой и деловой активности. Предприятия и организации, сферой деятельности которых являются изготовление и применение электродных материалов для дуговой сварки плавлением, стремятся оперативно адаптироваться к динамично изменяющимся потребностям рынка.

Известно, что механизированная дуговая сварка в защитных газах приводит к росту производительности сварочных работ по сравнению с ручной дуговой. Системы механизированной дуговой сварки на трубопроводах, разработанные ведущими мировыми компаниями (ESAB, Lincoln Electric, CRC) используются уже не менее 40 лет. Однако все эти разработки касаются условий сварки при строительстве магистральных газопроводов. Опыт механизации ремонтных сварочных работ при производстве и ремонте технологических трубопроводов в монтажных условиях крайне ограничен.

В настоящее время при строительстве и ремонте технологических трубопроводов применяются технологии, которые предусматривают использование ручной дуговой сварки. С одной стороны, это связано с простотой сварочного процесса, его доступностью для монтажных условий ремонта, широким спектром имеющихся сварочных материалов и оборудования. В то же время ручной метод сварки регламентирован различными нормативно-техническими документами, которыми руководствуются при выполнении работ на технологических трубопроводах, в том числе и под давлением. Главным недостатком является сравнительно низкая скорость сварки, что отражается на продолжительности процесса строительства и ремонта.

При ремонте поврежденных участков трубопроводов используют бандаж и муфты различных конструкций. Они обеспечивают усиление

стенки трубы, а также сохранение работоспособности магистрали при нарушении целостности стенки в месте дефекта под муфтой. Для соединения отдельных цилиндрических элементов между собой, а также с трубопроводом, применяют продольные стыковые и кольцевые нахлесточно-стыковые сварные швы.

Таким образом, существует необходимость в интенсификации ремонтно-сварочных работ с одновременным повышением их качества и безопасности. Одним из вариантов выхода из такого положения является применение технологий механизированной дуговой сварки в защитных газах новейшими сварочными материалами.

Определенную тревогу вызывают низкий уровень технического оснащения сварочного производства и засилье устаревших технологий. В этом плане изготовителям сварочных материалов для всех способов дуговой сварки целесообразно ориентироваться на использование новейших достижений в технике и технологии, отслеживая ситуацию и стимулируя потребителей также к переходу на современный уровень оснащенности.

В решении возникающих проблем не следует полагаться только на собственный опыт, обращение к печатным техническим и рекламным изданиям. Квалифицированную помощь можно получить у специалистов ведущих научно-исследовательских и конструкторско-технологических институтов, особенно по таким вопросам, как обоснованный выбор решения, анализ причин возникновения проблем и поиск пути их устранения, повышение квалификации персонала, оценка перспективности инноваций и т. п. В мире бурно развивающихся информационных технологий следует использовать все имеющиеся возможности.

Таким образом, актуальной будет цель диссертации – повышение производительности и качества сварочных работ при строительстве и ремонте технологических трубопроводов на предприятиях нефтехимии.

1 Современное состояние вопроса строительства и ремонта технологических трубопроводов

1.1 Особенности эксплуатации и обнаружения дефектов в конструкциях нефтегазового сектора

В связи с резким увеличением цен на энергоносители и износом основного оборудования значительная часть предприятий нефтегазового комплекса нуждается в техническом переоснащении. Проведение реконструкции в первую очередь связано как с необходимостью уменьшения энергозатрат при производстве того или иного вида продукции, так и с увеличением глубины переработки используемого сырья.

Учитывая, что значительная часть дорогостоящего оборудования находится в эксплуатации более 20...30 лет, речь может идти только о его поэтапной модернизации. Таким образом, возникает необходимость дальнейшего использования части технологического оборудования, отработавшего свой нормативный срок эксплуатации, что, в свою очередь, требует разработки более точных методов неразрушающего контроля и оценки возможной его дальнейшей эксплуатации.

К основным условиям эксплуатации сварных конструкций обычно относят среду, с которой они контактируют, нагрузки, температуру, радиацию и время их совокупного воздействия. Влияние нагрузки различают по длительности воздействия и скорости приложения (статические, циклические, динамические и др.). Нагрузки могут возникать как от внешних воздействий, так и собственных деформаций при структурных превращениях и неравномерных нагревах. В сочетании с формой сварных соединений и элементов конструкций образуются сложные локальные напряжения, которые оказывают влияние на прочность и дальнейшую работоспособность сварных конструкций.

Различают циклический и динамический характер нагружения, который также относят к наиболее тяжелым режимам работы сварных конструкций. Многие стали чувствительны к скорости приложения нагрузок, особенно при наличии концентраторов напряжений, что, в свою очередь, требует проведения термической обработки после сварки и предъявления более жестких требований к нормам неразрушающего контроля ответственных элементов.

Для обеспечения устойчивости сварных конструкций при воздействии больших сжимающих усилий основное значение играет толщина применяемого металла, форма конструктивных элементов. Температурные требования также существенно зависят от материала. Например, черные металлы характеризуются пониженной прочностью при наличии концентраторов напряжений, что диктует определенные требования к выбору металла, его термообработки и к допускаемым размерам дефектов [25].

Особая ситуация возникает в области высоких температур эксплуатации оборудования, где важен правильный выбор соответствующей жаропрочной стали. В противном случае при длительном воздействии температуры это может привести к изменению прочности и пластичности материала, его структуры, тепловому охрупчиванию и разрушению.

Влияние среды на конструкцию еще более разнопланово. Например, коррозия металла при сочетании с нагрузками дает коррозионное растрескивание и усталость. Влияние температуры и нагрузок еще более усугубляет ситуацию.

Многолетние обследования нефтехимического оборудования, которое эксплуатировалось в широком диапазоне температур, давления, агрессивности среды, содержания H_2 , H_2S и др., позволили выявить большое количество случаев низкотемпературных слоистоводородных повреждений корпусов аппаратов, изготовленных из низкоуглеродистых и низколегированных сталей. На рис. 1.1 приведена гистограмма распределения повреждений по маркам сталей относительно общего

количества исследованных случаев. На качественном уровне рис. 1.1 хорошо отражает реальное состояние оборудования. Так, наибольшую склонность к низкотемпературному слоистому водородному расслоению проявляют металлоконструкции, изготовленные из сталей марок 16ГС и 09Г2С, в отличие от аппаратов, изготовленных из сталей марок сталь 20, сталь СтЗсп.

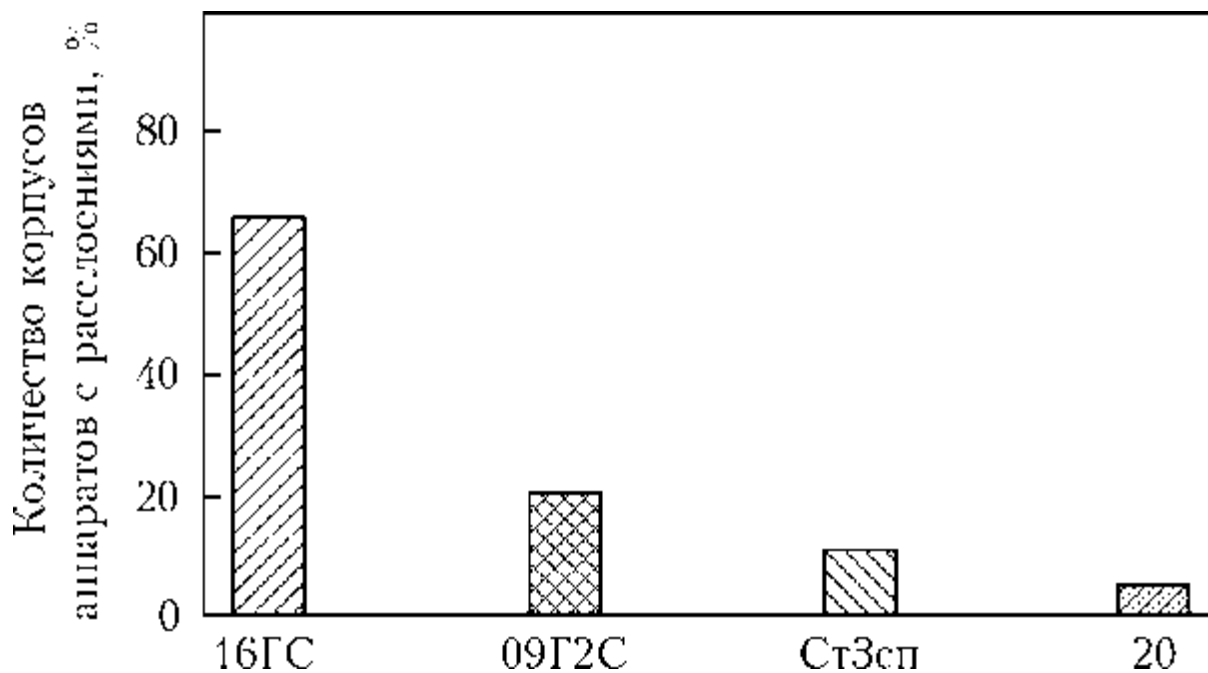


Рисунок 1.1 – Доля корпусов аппаратов с обнаруженными в них коррозионными расслоениями

На практике выявлено значительное количество случаев, когда изготовленное оборудование из сталей марок 09Г2С и 16ГС, без уточнения требований к их категориям, подвергалось отбраковке уже через 2...4 года эксплуатации [25]. Для металлопроката с резко выраженной зональной сегрегацией, залегающей на глубинах, равных половине или трети толщины листа, слоистые растрескивания развиваются в зоне, характеризующейся значительной анизотропией прочностных свойств в направлении толщины. Данный тип повреждений может отличаться по своей скорости развития в плоскости листа, носить ступенчатый или плоскостной характер. По мере накопления повреждений в дальнейшем может наблюдаться деформирование более тонкой стенки под действием внутреннего давления.

1.2 Описание объекта и вводные данные по необходимому ремонту оборудования

Установки каталитического риформинга представляют собой комплекс процессов, включающих гидроочистку сырья, каталитический риформинг и стабилизацию конденсата. В состав установок входит большое количество разнообразного и сложного оборудования, в том числе реакторные блоки с отделением трубчатых печей, эксплуатирующиеся при повышенных давлениях и температурах. Это оборудование подвергается воздействию агрессивных газовых сред, содержащих водород и сероводород. Такое воздействие в определенных условиях приводит к водородной коррозии, проявляющейся в изменении структуры металла, деградации механических характеристик [26, 27, 28], что повышает опасность возникновения разрушения конструкции при гидравлических или пневматических испытаниях во время технических освидетельствований.

Трубчатые печи являются одним из основных аппаратов, определяющих производительность установок. Тепловой режим работы трубчатых печей колеблется в пределах от 350 до 450 °С для змеевиков сырьевых печей и повышается до 470...515 °С для змеевиков промежуточных печей процессов риформинга.

Радиантно-конвекционная трубчатая печь П-1 установки каталитического риформинга и гидроочистки ЛГ-35-11/300 (рис. 1.2) состоит из четырех рядом расположенных радиантных камер и примыкающей к ним общей конвекционной камеры. В каждой радиантной камере размещено по два змеевика из десяти труб размером 325x12 мм, соединяемых между собой коллекторами Ду 200; материал труб радиантной камеры и коллекторов – сталь марки 15X5М. Змеевик конвекционной камеры выполнен из стали марки 12CrMo19.5 TGL 15089 (немецкий аналог стали отечественного производства марки 15X5М); размер труб змеевика 325x12 мм. В трубчатых печах производится нагрев смеси сырья с циркулирующим газом и, кроме

того, промежуточный подогрев парогазовых потоков между реакторами. Тепловой режим работы трубчатой печи приведен в табл. 1.1.



Рисунок 1.2 – Установка ЛГ-35-11/300

Таблица 1.1 - Рабочие условия эксплуатации печных труб печи П-1 установки каталитического риформинга и гидроочистки ЛГ-35-11/300

Наименование	Температура, °С		Давление газопродуктовой смеси (пары бензина и водородосодержащий газ), МПа	
	ВХОД	ВЫХОД	ВХОД	ВЫХОД
Конвекционная камера	250	350	5,0	4,55
Радиантная камера I	420...450	520	4,0	4,0
Радиантная камера II	420...450	520	4,0	4,0
Радиантная камера III	473	520	4,0	3,8
Радиантная камера IV	500	520	4,0	3,6

Различные оценки явлений старения металла трубопроводов свидетельствуют прежде всего о сложности данной проблемы и значительных трудностях прогнозирования последствий продолжительной эксплуатации. Это подтверждает высказанное в работе [29] мнение о целесообразности дифференциального подхода к оценке текущего состояния металла действующих трубопроводов в зависимости от конкретных условий

эксплуатации, внешних воздействий, исходных характеристик материала и т.п. В большинстве проведенных исследований отмечается незначительное влияние условий эксплуатации на стандартные механические свойства металла труб. Это практически нивелирует значение фактора старения металла при расчетах на прочность трубопроводов в рамках традиционно принятых подходов. Такая оценка приемлема только для материала без дефектов, способного к пластическому (вязкому) разрушению при заданных температурно-силовых нагрузках.

Что касается старых трубопроводов, тем более с пониженными значениями характеристик сопротивления разрушению материала, то подобный подход к оценке прочности является недостаточным. На основе реальных остаточных свойств металла труб необходимо выполнить расчетную оценку прочности трубопровода с такими дефектами металла, параметры которых, согласно действующей нормативной документации, считаются допустимыми.

Решение этой и других подобных задач требует комплексного нормативного и технологического обеспечения, включая методики расчетной оценки прочности, определение параметров дефектности и свойств материала, правила обследования, восстановления поврежденных участков и др.

Если рассматривать влияние фактора времени, то практически во всех случаях отсутствуют образцы-свидетели, на основании которых можно было бы выполнить наиболее достоверную оценку изменений параметров состояния материала. Очевидно также, что полностью отсутствует информация об исходных характеристиках материала, которые определяются новыми методами испытаний. Отметим, что некорректная оценка уровня исходных свойств может привести к ошибочным выводам относительно последствий процессов старения.

Как подчеркивалось в работах [26, 29], нельзя игнорировать некоторые особенности трубного металла, например, довольно существенный разброс

исходных значений механических свойств или изменения качественных характеристик в разные периоды времени, что связано с широкомасштабностью производства трубной стали и труб, особенно в прошедшие годы, а также с усовершенствованием производственных технологий.

Таким образом, оценка текущего состояния металла с точки зрения его пригодности к эксплуатации при заданных условиях должна производиться с обязательным учетом уровня качества труб прежнего производства.

Жесткие условия эксплуатации трубчатой печи П-1 с наработкой материала в течении 200 тыс. ч, при парковом ресурсе в 100 тыс. ч поставили задачу определить работоспособность материала труб для оценки возможности продления срока службы печи, поскольку надежность и безопасность оборудования, выработавшего нормативный (расчетный) срок службы, зависят от состояния металла и вопросы возможности дальнейшей эксплуатации решаются на основании изучения характера изменения физико-механических свойств материала в процессе его эксплуатации.

1.3. Сведения о материале изделия

1.3.1 Жаропрочные стали

На рассмотренной выше установке каталитического риформинга в каждой радиантной камере размещено по два змеевика из десяти, соединяемых между собой коллекторами; материал труб радиантной камеры и коллекторов – сталь марки 15X5M. Змеевик конвекционной камеры выполнен из стали марки 12CrMo19.5 TGL 15089 (немецкий аналог стали отечественного производства марки 15X5M). Среднелегированные хромомолибденовые жаропрочные стали, к числу которых относятся сталь марок 15X5M и 12CrMo19.5, по сложившейся в нефтепереработке практике используются в виде труб в печных змеевиках и обвязочных трубопроводах реакторного блока, поскольку хорошо зарекомендовали себя в гидрогенизационных процессах.

Были проведены лабораторные исследования материала контрольных участков труб, вырезанных из змеевика конвекционной камеры и коллектора радиантной камеры II, содержащие сварные швы. Химический состав металла исследуемых элементов печного змеевика приведен в табл. 1.2, здесь же указаны требования стандартов к химическому составу данных марок сталей.

Основными легирующими элементами этих сталей являются хром, молибден и ванадий. Молибден как один из главных элементов, определяющих жаропрочность стали, находится в основном в твердом растворе. Он уменьшает диффузионную подвижность атомов и скорость движения дислокаций. Определенное количество молибдена позволяет получить оптимальное сочетание прочности и пластичности стали. При этом участие молибдена в образовании карбидов ограничено. В его присутствии формируются карбиды хрома и ванадия. Последний положительно влияет на повышение длительной прочности и предела ползучести благодаря образованию термической стойкости карбидов.

Одним из основных условий технологии ремонтной сварки являются мероприятия, предупреждающие образование холодных трещин в сварных соединениях. Как известно [30, 31], образование холодных трещин (замедленное разрушение) обусловлено сочетанием трех факторов: образованием закалочных структур в зоне термического влияния (ЗТВ) или металле шва; содержанием диффузионного водорода и уровнем остаточных сварочных напряжений в сварном соединении. Отсутствие закалочных структур в сварном соединении можно обеспечить выбором тепловых режимов и условий сварки. Как правило, это достигается применением предварительного и сопутствующего нагрева, при которых скорость охлаждения будет способствовать формированию структуры металла ЗТВ, устойчивой против образования трещин.

Таблица 1.2 – Химический состав исследуемого металла (числитель – основной металл, знаменатель – сварной шов) [32]

Химические элементы	Наименование			
	Труба конвекционной камеры из стали 12CrMo19.5	Сталь 12CrMo19.5 по стандарту TGL 15089	Коллектор III радиантной камеры из стали 15X5M	Сталь 15X5M по ГОСТу 200072-74
C	0,120 / 0,108	0,08-0,15	0,12 / 0,085	0,15
Mn	0,42 / 0,41	0,30-0,60	0,47 / 1,4	0,5
Si	0,23 / 0,23	0,30-0,50	0,25 / 0,45	0,5
Cr	4,80 / 4,73	4,0-6,0	5,6 / 4,6	4,5-6,0
Mo	0,56 / 0,56	0,45-0,65	0,53 / 0,59	0,45-0,60
Ni	0,09 / 0,09	-	0,15 / 0,11	0,6
S	0,016 / 0,025	0,020	0,0075 / 0,069	0,025
P	0,010 / 0,010	0,025	0,026 / 0,065	0,030
Al	0,04 / 0,04	-	-	-
Cu	0,12 / 0,13	-	0,14 / 0,77	0,20
W	0,05 / 0,05	-	0,01 / 0,01	0,3
V	0,05 / 0,05	-	0,02 / 0,13	0,05
Ti	0,05 / 0,05	-	0,005 / 0,03	0,03

Комплекс механических характеристик основного металла и сварных соединений получен при комнатной и высоких температурах, которые соответствовали рабочим условиям – 365 °С для стали марки 12CrMo19.5 и 525 °С для стали марки 15X5M (табл. 1.3).

Эффект резкого снижения ударной вязкости металла шва свидетельствует о протекании процессов водородной коррозии. Это согласуется с результатами структурных исследований, подтвердивших изменения микроструктуры вследствие длительной эксплуатации при высоких температурах. Так, в металле швов возникло ослабление границ зерен вследствие сегрегации неметаллических включений, что привело к его охрупчиванию.

Таблица 1.3 – Механические характеристики исследуемого металла (числитель – основной металл, знаменатель – сварное соединение) [32]

Температура испытаний, 0С	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	Ψ , %	S_K , МПа	KCV, Дж/см ²
труба конвекционной камеры из стали марки 12CrMo19.5						
20	807/558	702/369	20,1/17,1	72/78	1550/1516	208/11,3
365	682/445	603/324	16,0/14,8	67/74	1245/1012	192/137
коллектор радиантной камеры II из стали марки 15X5M						
20	669/665	600/549	21,0/16,8	77/77	1505/1438	267/3,8
525	446/431	435/403	18,5/16,1	83/80	900/825	235/106

1.3.2 Низколегированные конструкционные стали

Для вспомогательных трубопроводов применяется сталь 17Г1С (табл. 1.4).

Таблица 1.4 – Химический состав стали 17Г1С (ГОСТ 19281-79) [33]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As
0,15 – 0,2	0,4 – 0,6	1,15 – 1,6	до 0,3	до 0,04	до 0,035	до 0,3	до 0,008	до 0,3	до 0,08

Таблица 1.5 – Механические свойства стали 17Г1С [4]

Сортамент	σ_B	σ_T	δ_5
-	МПа	МПа	%
Лист, ГОСТ 5520-79	510	345-355	23
Трубы, ГОСТ 10705-80	490	343	20

Пригодность стали к сварке определяется испытаниями на свариваемость, которая в большинстве случаев подменяется испытаниями на

склонность к образованию трещин различного типа. Например, для сварных соединений углеродистых и легированных сталей используют такие показатели, как сопротивляемость образованию горячих трещин, холодных трещин, ламелярных трещин, трещин отпуска и др. [34].

Сложностями при сварке конструкций из стали 17Г1С являются:

- высокая вероятность получения холодных трещин;
- влияние концентраторов напряжения на возможное разрушение конструкций;
- высокая вероятность получения горячих трещин;
- из-за разупрочнения околошовной зоны становится невозможным получить металл сварного соединения схожим со свойствами основного металла.

Холодные трещины наиболее часто возникают по причине закаливается стали при быстром охлаждении и насыщении металла шва и зоны термического влияния водородом. Они, как правило, зарождаются по истечении некоторого времени после сварки и наплавки (замедленное разрушение) и развиваются в течение нескольких часов или даже суток.

1.4 Оценка состояния металла сварных труб при длительной эксплуатации

В ряде работ, посвященных оценке состояния действующих газо- и нефтепроводов, высказывается мнение об отрицательном влиянии длительности эксплуатации на работоспособность материала трубопроводов. В результате проведенных ранее исследований материала длительно эксплуатируемых (до 35 лет) нефтепроводов [13, 14] не выявлено значительных изменений основных служебных свойств металла труб, что позволило сделать вывод о возможности сохранения работоспособности металла трубопроводов в процессе их длительного силового нагружения. При этом не исключается возможность появления локальных изменений тре-

щиностойкости металла трубопровода, связанных с развитием деформационного старения [15, 16].

В отличие от нефтепроводов в газопроводах возможно развитие протяженных разрушений. Последствия процессов старения материала могут представлять значительную опасность для работы газопроводов. Поэтому большое значение имеет сохранение в металле длительно эксплуатируемых газопроводов прочностных и особенно вязкостных свойств.

Накопление данных о свойствах металла долговременно работающих газопроводов позволит с большей достоверностью судить о влиянии фактора длительного нагружения на материал трубопровода. В связи с этим было исследовано состояние металла образцов труб, вырезанных из действующих газопроводов, а также из соответствующих труб аварийного запаса. До 1970-х гг. при сооружении газопроводов использовали трубы из нормализованных и горячекатаных сталей. Трубы из современных сталей контролируемой прокатки начали применять позже. Срок работы таких газопроводов, как правило, не превышает 20 лет.

В настоящей работе исследовали образцы труб, соответствующие представительному ряду материалов газопроводов с достаточно длительным (более 25 лет) периодом эксплуатации.

Бесшовные горячедеформированные трубы диаметром 508 мм (сталь типа 19Г) поставлялись в 1950-1970-х гг. из бывшей ЧССР. В отличие от сварных они имеют повышенную разностенность.

Горячеправленные трубы диаметром 529 мм производства Ждановского металлургического завода им. Ильича впервые стали изготавливать для систем трубопроводов нефти и газа в бывшем СССР из листовой кремнемарганцевой стали 10Г2СД (впоследствии 10Г2С1) с пониженным (до 0,12 %) содержанием углерода. Существенным недостатком технологического процесса их производства являлось применение односторонней сварки продольного шва, хотя механические характеристики основного металла и

сварного соединения существенно улучшались благодаря горячей правке труб при нагреве до температуры нормализации стали.

Прямошовные трубы диаметрами 720 (сталь 17ГС) и 1220 мм (17Г1С) производства Челябинского трубопрокатного завода, а также трубы диаметром 1020 мм (сталь 17Г1С) производства Новомосковского трубного завода (НТЗ) являлись наиболее распространенной продукцией, поставляемой для сооружения нефте- и газопроводов. В отличие от труб диаметром 530... 820 мм, изготавливаемых из горячекатаной стали, трубы диаметрами 1020 и 1220 мм выполняли только из нормализованных листов.

Трубы, производимые в ФРГ из нормализованной листовой стали типа 17Г1СФ, начали использоваться для строительства газопроводов диаметром 1420 мм самыми первыми.

До 1975 г. (до введения СНиП П-45-75) трубы изготавливали без учета ряда современных требований к их качеству. В частности, металл труб не контролировали по критериям, служащим для оценки сопротивления протяженным разрушениям. Не производили и обязательный в современных условиях производства 100%-й ультразвуковой контроль листового проката и сварных соединений труб. После введения требований, касающихся ударной вязкости на образцах с V-образным надрезом и доли вязкой составляющей в изломе образцов типа DWTT, полностью отказались от производства упомянутых труб.

Материал труб после длительной эксплуатации и труб аварийного запаса исследовали в соответствии с требованиями технических условий, по которым они были изготовлены, а также с современными требованиями (СНиП 2.05.06-85) с учетом критериев оценки сопротивления иницированию и развитию вязких и хрупких разрушений.

Определены стандартные основные прочностные и пластические свойства, характеристики вязкости, хладостойкости, сопротивления протяженным разрушениям (на полнотолщинных образцах типа DWTT), а также структурные особенности состояния металла.

Сопротивление инициированию и стабильному развитию вязкой трещины определяли с помощью деформационных критериев: раскрытия вершины дефекта в момент инициирования вязкой трещины δ_i и угла раскрытия вязкой трещины при ее стабильном развитии $\text{tg } \alpha$.

Оценивали возможное изменение различных показателей металла труб относительно их исходного состояния. Свойства металла труб в этом состоянии устанавливали на основе анализа требований нормативной документации, обработки данных сертификатов. При определении влияния эксплуатационных нагрузок учитывали также результаты испытаний труб аварийного запаса.

Химический состав металла труб из всех исследованных сталей по результатам контрольного анализа соответствовал нормативным требованиям, а структурные параметры основного металла и металла швов были в основном характерными для применяемых марок сталей и типов сварных соединений.

Материал труб после длительной эксплуатации и труб аварийного запаса исследовали в соответствии с требованиями технических условий, по которым они были изготовлены, а также с современными требованиями (СНиП 2.05.06-85) с учетом критериев оценки сопротивления инициированию и развитию вязких и хрупких разрушений.

Определены стандартные основные прочностные и пластические свойства, характеристики вязкости, хладостойкости, сопротивления протяженным разрушениям (на полнотолщинных образцах типа DWTT), а также структурные особенности состояния металла.

Сопротивление инициированию и стабильному развитию вязкой трещины определяли с помощью деформационных критериев: раскрытия вершины дефекта в момент инициирования вязкой трещины δ_i и угла раскрытия вязкой трещины при ее стабильном развитии $\text{tg } \alpha$.

Оценивали возможное изменение различных показателей металла труб относительно их исходного состояния. Свойства металла труб в этом

состоянии устанавливали на основе анализа требований нормативной документации, обработки данных сертификатов. При определении влияния эксплуатационных нагрузок учитывали также результаты испытаний труб аварийного запаса.

Химический состав металла труб из всех исследованных сталей по результатам контрольного анализа соответствовал нормативным требованиям, а структурные параметры основного металла и металла швов были в основном характерными для применяемых марок сталей и типов сварных соединений.

Результаты механических испытаний образцов основного металла приведены на рис. 1.3...1.5. Эксперименты показали, что все служебные характеристики основного металла исследованных труб (кроме бесшовной) после длительной эксплуатации удовлетворяли требованиям нормативной документации, в соответствии с которой они были изготовлены, и находятся в поле разброса или на уровне аналогичных показателей металла труб в исходном состоянии. Это касается и труб аварийного запаса.

Металл бесшовной трубы диаметром 508 мм производства ЧССР имеет пониженные значения предела текучести и временного сопротивления. Указанные отклонения обусловлены недостаточным легированием стали бесшовной трубы, нормативные требования к которому были ограничены только сверху ($C < 0,18 \%$, $Mn < 1,5 \%$). Пониженной исходной прочности способствовала крупнозернистая структура металла данной трубы. Следует отметить, что характеристики прочности металла отдельных сварных труб, в частности σ_T металла трубы из стали 17Г1С и σ_B металла трубы из стали 17ГС, находятся на нижнем граничном уровне соответствующих требований (рис. 1.4), что в общем свидетельствует о недостаточных гарантиях прочности металла труб соответствующего периода их производства.

Металл образцов с острым надрезом в интервале температур +60...-40 °С имеет достаточную ударную вязкость вплоть до температуры -20 °С для всех исследованных труб, за исключением трубы аварийного запаса из

стали 10Г2СД (рис. 1.5). В металле указанной трубы значение ударной вязкости соответствует нижнему уровню, требуемому современными нормами. Температура перехода в хрупкое состояние металла исследованных труб составляла 0 °С и ниже, за исключением бесшовной трубы с температурой перехода в хрупкое состояние металла 20 °С.

В целом ударная вязкость металла труб после длительной эксплуатации и труб аварийного запаса мало отличается от ее сертификатных значений для соответствующих материалов.

Нужно отметить, что свойства металла труб, которые находились в эксплуатации, существенно не отличаются от таковых металла труб аварийного запаса (после длительного хранения).

Сопротивление протяженному разрушению, оцениваемое по доле вязкой составляющей в изломе образцов DWTT, не во всех исследованных трубах соответствует нормам СНиП 2.05.06-85 (рис. 1.6). В частности, пониженное сопротивление разрушению при температуре 0 °С выявлено в металле трубы производства ФРГ.

Металл сварных соединений всех исследованных труб (кроме одной) с достаточным запасом удовлетворяет установленным требованиям по прочностным и вязкостным свойствам (табл. 2, рис. 4). Низкая прочность разрушившегося по основному металлу сварного соединения трубы диаметром 1020 мм из стали 17Г1С (производства НТЗ) обусловлена пониженным уровнем прочностных свойств основного металла.

Таким образом, результаты проведенных исследований подтверждают возможность сохранения служебных свойств металла трубопроводов в условиях длительного силового нагружения (в течение плановых и даже сверхплановых сроков эксплуатации).

При длительной эксплуатации работоспособность газопроводов будет определяться не столько связанным со старением общим ухудшением свойств трубного металла, сколько другими факторами, способствующими локальному повреждению материала.

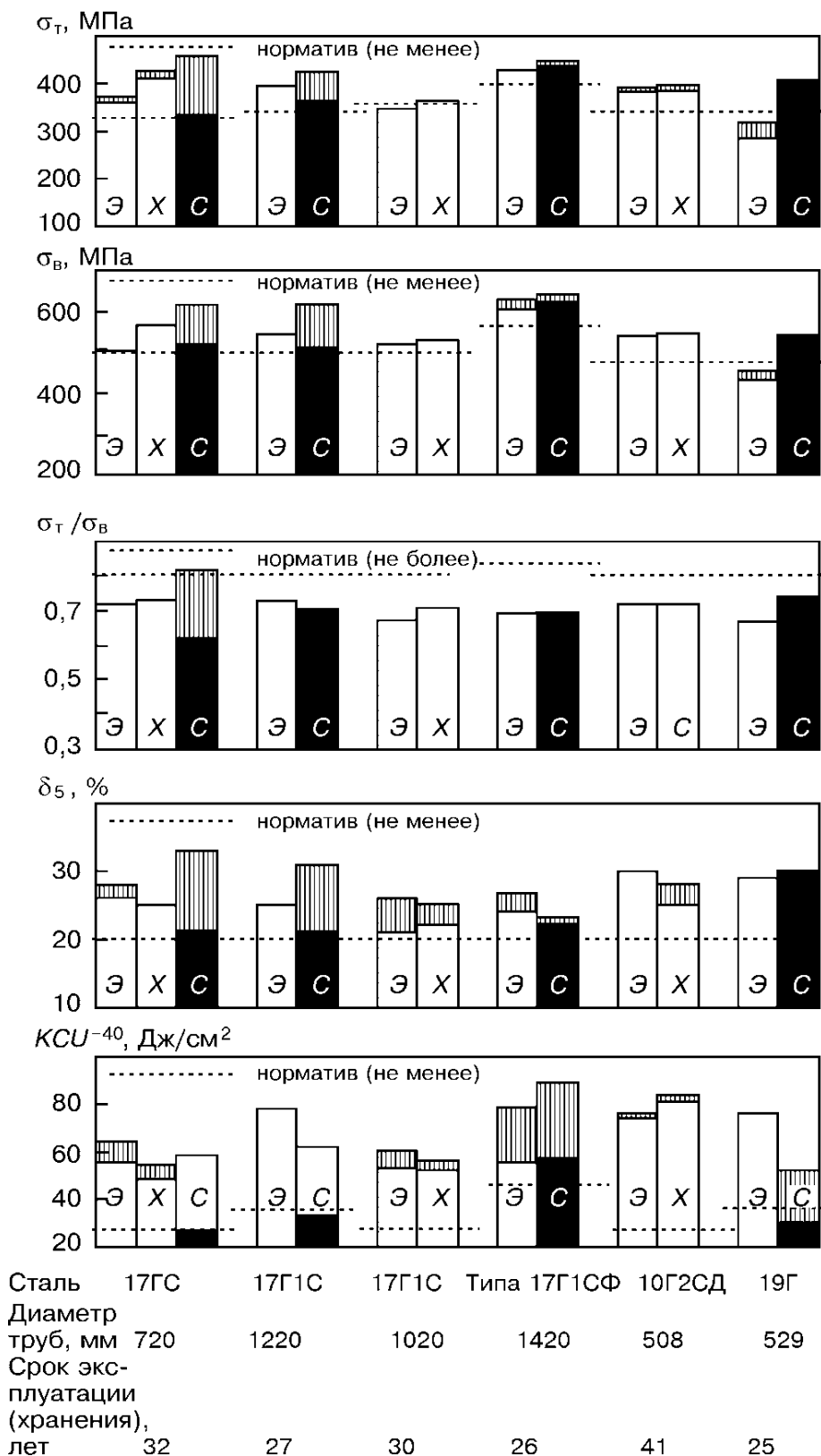


Рисунок 1.3 – Механические свойства основного металла исследованных труб: Э – трубы после эксплуатации; Х – трубы аварийного запаса; С – сертификатные данные; заштрихованная зона – область разброса значений

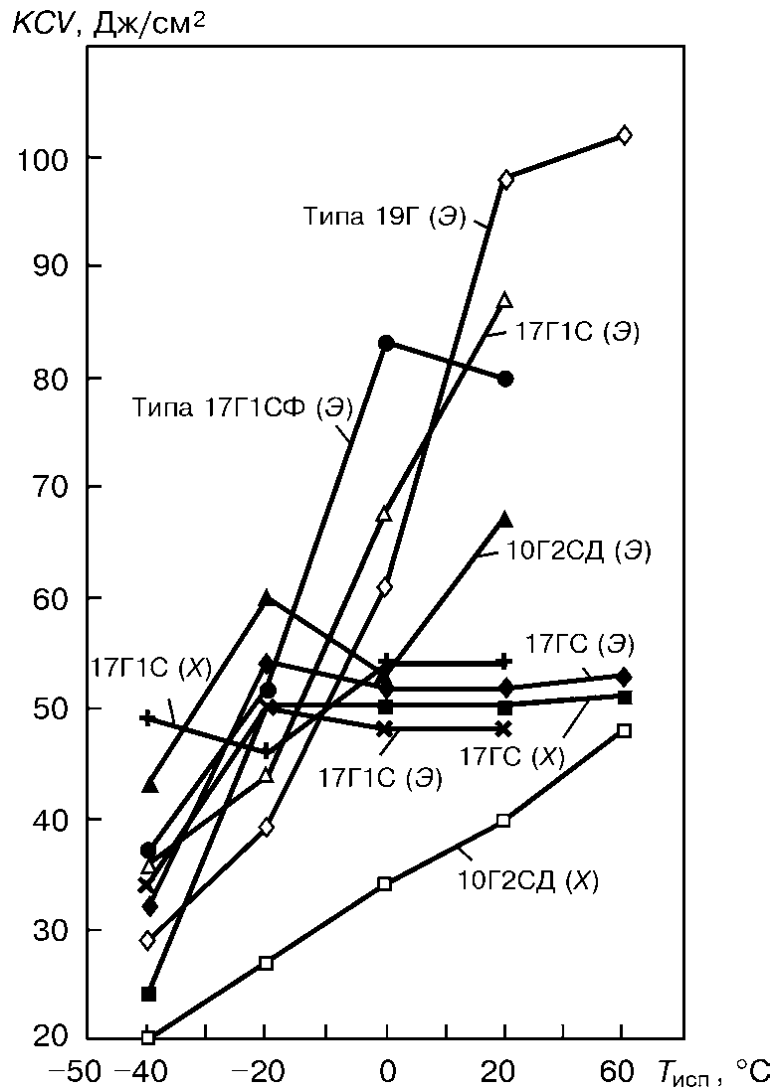


Рисунок 1.4 – Ударная вязкость основного металла исследованных труб

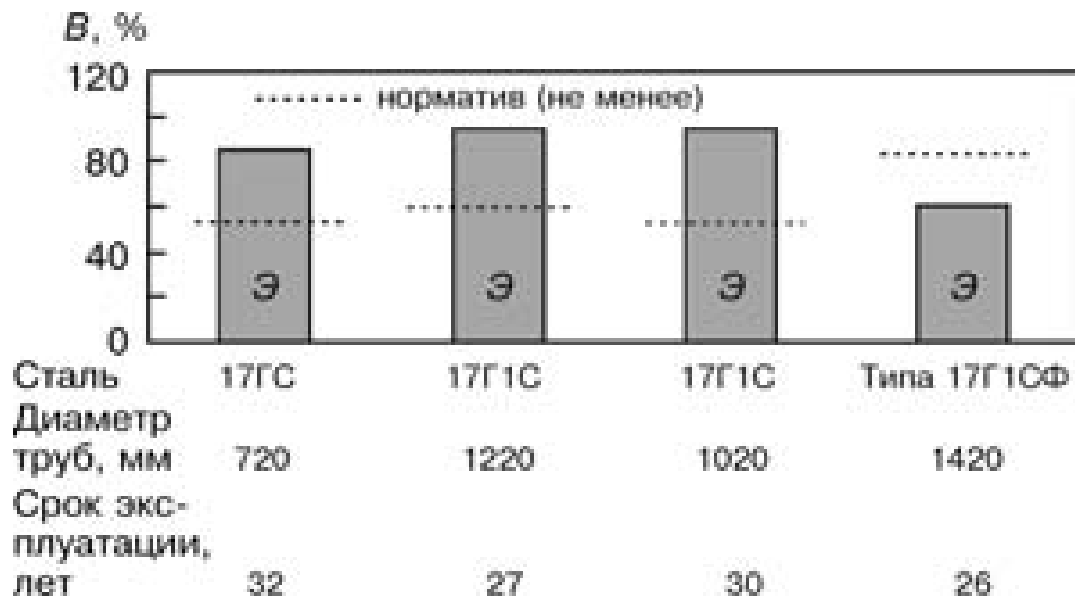


Рисунок 1.5 – Доля вязкой составляющей B в изломе образцов DWTT при температуре испытаний $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Уже упоминалось о том, что ранее трубы изготавливались без учета современных требований. Тем не менее, горячекатаные и нормализованные трубные стали первых поколений в большинстве случаев вполне соответствуют условиям эксплуатации газопроводов в районах с умеренным климатом. С точки зрения обеспечения служебных свойств металла самые большие опасения могут вызывать трубопроводы, построенные с использованием труб из нормализованных сталей. Действительно, как следует из приведенных данных, металл таких труб (производства ФРГ) не вполне надежен в отношении сопротивления растяженному разрушению.

Для труб прежнего производства с недостаточными технологическими гарантиями требуемого качества особое значение приобретает выявление и устранение дефектов, снижающих прочность трубопроводов. Значительную опасность могут представлять дефекты в зонах холодного деформирования, поскольку при этом заметно ухудшается сопротивление разрушению металла труб.

1.5 Обзор современных электродных материалов и способов электродуговой сварки плавлением

1.5.1 Ручная дуговая сварка штучными электродами

Производителям сварочных материалов для планирования и обеспечения устойчивого функционирования предприятий важно опираться на статистические данные и прогнозы в отношении тенденций изменения потребностей рынка как в целом, так и по конкретно производимым материалам с оценкой конкурентоспособности в каждой области их применения.

Основную группу электродных материалов массового и специализированного назначения для сварки составляют штучные покрытые электроды, проволоки сплошного сечения и порошковые проволоки. Механизированные и автоматизированные процессы сварки проволоками

предусматривают использование дополнительных присадочных и защитных материалов (флюс, газ), за исключением порошковых проволок. Общей тенденцией в изменении структуры производства и применения электродных материалов, особенно в развитых в экономическом отношении странах Юго-Восточной Азии (Япония, Южная Корея, КНР), Америки (США, Канада, Бразилия) и Европы (Великобритания, Германии, Франция, Италия, Голландия и др.), является устойчивый рост использования материалов для механизированной и автоматизированной (включая роботизированную) сварки [18].

Штучные электроды с покрытием являются наиболее широко применяющимся электродным материалом, универсальным с точки зрения организации процесса сварки в заводских и монтажных условиях. Обустройство сварочного поста требует небольших капитальных вложений в оборудование, а расходы на электроды относительно невелики.

К недостаткам, которыми обладает сварка штучными электродами, можно отнести малую производительность плавления, которая обусловлена низкой плотностью тока на электроде, потерю части электродного материала на огарки, а также существенную зависимость качества сварных соединений от квалификации и кондиции сварщика. Тем не менее, следует отметить широкие границы для регулирования сварочных свойств за счёт возможности существенного изменения состава покрытия электродов. Это приводит к тому, что и в настоящее время сохраняется высокая конкурентоспособность ручной дуговой сварки штучными электродами по сравнению с механизированными способами сварки.

Уровень технологии изготовления и поставки заказчикам электродов на ведущих предприятиях стран СНГ существенно вырос и приблизился к мировому по основным показателям. Решены вопросы качества нанесения покрытия, стартового участка, маркировки, расфасовки и упаковки. Номенклатура электродов остается относительно узкой. Отчасти это связано с объективными причинами состояния рынка потребления.

При разработке электродов недостаточно используются современные методы анализа и исследований, в частности компьютерное моделирование с применением базы данных о материалах, изучение сенсорики процесса сварки со статистической обработкой, достижения в области материаловедения, например опыт ряда зарубежных фирм по нанесению на покрытие индикаторных меток, указывающих степень влажности или температуру прокалки, что важно для электродов с основным покрытием.

Классификация покрытых электродов сближается с международными стандартами (ISO 2560A, EN 757, EN 1600 и др.) по основным требованиям и признакам, облегчающим выбор нужного типа и марки электродов потребителями. Тенденции мирового рынка свидетельствуют о необходимости увеличения объема информационного сопровождения.

Кроме показателей механических свойств, химического состава, содержания водорода и данных по параметрам режимов для различных положений сварки, необходимо приводить сведения о рентгеновской плотности, сопротивляемости образованию трещин, проплавлению основного металла, разбрызгиванию, отделимости шлака, характеристикам сварочного аэрозоля и т. п. Более подробная информация в рекламных материалах и сопроводительной документации вызывает доверие потребителей и снижает вероятность предъявления претензий, связанных с недостаточной информированностью.

Большую роль в стабильности производства покрытых электродов, как и других электродных материалов, играют формы организации экономических связей с потребителями. Актуально стимулирование потребителей к применению современных источников питания с обратной связью, позволяющих сварщику с держателя электрода дистанционно подстраивать параметры сварки.

1.5.2 Механизированная сварка в защитных газах проволоками сплошного сечения

В ведущих в экономическом отношении странах мира проволоки сплошного сечения для электродуговой сварки составляют более половины всего производства сварочных материалов [18]. При разделении по классам свариваемого металла проволоки используют преимущественно для сварки углеродистых и низколегированных, нержавеющей сталей, а также алюминиевых и титановых сплавов. Для достижения требуемых служебных свойств сварных соединений возможно регулирование показателей за счет состава не только проволоки, но и защитного материала (моногазы или смеси газов).

Плотность тока при сварке проволоками сплошного сечения существенно выше, чем штучными электродами, что позволяет регулировать характеристики плавления в широких пределах, реализовать синергетические и комбинированные управляемые процессы для сварки различных металлов и объектов применения. В частности, управление переходом электродного металла в шов может обеспечить устойчивые характеристики при переносе с короткими замыканиями, капельном без замыканий, осевом струйном, пульсирующем струйном или модульно-регулируемом по поверхностному натяжению капли металла.

На основе использования современных физических и математических моделей, а также компьютерного моделирования процесса дуговой сварки плавлением созданы современные системы источников питания полупроводникового и инверторного типов с программно управляемыми характеристиками электрических параметров, связанных прямым и обратным адаптивным управлением с механизмом подачи проволоки в зону плавления. Это позволило не только обеспечить надежность выполнения алгоритма сварки, но и существенно снизить энергозатраты, устранить влияние субъективного фактора. Рациональное, программно управляемое

тепловложение в металл позволило достичь повышения значений свойств сварных соединений.

В последние годы большое внимание уделяется состоянию проволоки при поставке (допуски, точность изготовления, намотки, состояние и качество поверхности). По качеству омеднения или покрытия неомедненной проволоки имеются новые решения, позволяющие не только улучшить показатели применимости при механизированной и автоматической сварке, но и существенно уменьшить валовые выделения сварочного аэрозоля.

1.5.3 Механизированная сварка порошковыми проволоками

Для применения порошковых проволок в большинстве случаев требуется такое же оборудование, как и для проволок сплошного сечения. Однако в первом случае имеются определенные преимущества в технологичности, производительности и металлургической приспособляемости для сварки сталей широкой номенклатуры.

В 1974 г. в британский стандарт впервые ввели порошковую проволоку с металлическим сердечником (массовая доля неметаллических материалов не более 4 %). Сварочные порошковые проволоки классифицированы европейскими стандартами (EN 758, EN 12073) и стандартами ISO (ISO 17632, ISO 18276, ISO 17633), введенными в действие в 2004–2005 гг. Не все национальные стандарты адаптированы к нововведениям, поэтому зачастую проволоки порошковые с металлическим сердечником классифицируют по стандартам на проволоку сплошного сечения.

В производстве и применении порошковых проволок лидерство в последние годы сохраняют страны Юго-Восточной Азии (Япония, Южная Корея, КНР), где производство порошковых проволок превышает выпуск штучных электродов и приближается по объему к проволокам сплошного сечения. В США, Франции, Великобритании, Германии объемы применения порошковых проволок сравнялись с объемами ручной дуговой сварки покрытыми электродами за счет как развития собственных производств, так

и допуска на свои рынки производителей из Юго-Восточной Азии (Японии, Южной Кореи).

Страны СНГ существенно отстают в этой области, что способствовало приходу на эту часть рынка продукции японских, южнокорейских и ряда европейских производителей. К сожалению, подобная ситуация складывается и в сфере закупки оборудования для механизированной и автоматизированной сварки.

В структуре применения порошковых проволок основную долю составляют проволоки для сварки в защитных газах (порошковые проволоки с рутиловым, основным и металлическим сердечниками). Особую группу составляют самозащитные проволоки, позволяющие вести процесс сварки без дополнительной защиты газом или флюсом, а потому наиболее приемлемые для сварочно-монтажных работ.

После бурного роста потребления порошковых проволок (особенно газозащитных) в 1970–1980-е годы зафиксирован временный спад, вызванный объективными причинами (большой диаметр, повышенное выделение дыма, недостаточный уровень показателей свойств). К 2000 г. вновь возросло потребление порошковых проволок благодаря существенному повышению качества изготовления, параметров свойств и применяемости для сварки сталей различных классов в отраслях промышленности и строительства.

Большинство типов порошковой проволоки, в сравнении с проволоками сплошного сечения, обеспечивают лучшие технологические свойства (форму шва и провар соединения) и производительность сварки.

По способу изготовления порошковые проволоки подразделяются на вальцованные (изготовленные путем формовки холоднокатаной ленты заданного размера в круглый профиль, заполняемый порошковой смесью на промежуточной стадии формовки) и так называемые бесшовные, полученные путем заполнения агломерированным флюсом длинномерной трубной заготовки на специальных вибростендах.

В последние годы освоено заполнение трубной заготовки из ленты (штрипса) непосредственно перед сваркой продольного шва, выполняемой лазером или токами высокой частоты. Последующий процесс изготовления включает доформовку прокаткой и волочение по схеме, подобной при изготовлении проволоки сплошного сечения с применением промежуточных отжигов. Такая технология позволяет достигать низкого содержания водорода в проволоке и наносить любые виды покрытия на поверхность.

Для реализации данной технологии требуются значительные капиталовложения в оборудование и эксплуатационные расходы. В связи с этим стоимость продукции повышается в среднем вдвое, по сравнению с проволокой вальцованной.

Современные порошковые проволоки поставляются в готовом для применения виде (по стандарту EN 759) и пригодны для сварки с использованием серийного оборудования.

1.6 Формулировка задач диссертационного исследования

В диссертационном исследовании поставлена цель – повышение производительности и качества сварочных работ при строительстве и ремонте технологических трубопроводов на предприятиях нефтехимии.

Рассмотрены особенности эксплуатации и обнаружения дефектов в конструкциях нефтегазового сектора. Выполнено описание объекта и вводные данные по необходимому ремонту оборудования. Проведён анализ технологических свойств и свариваемости материалов для изготовления технологических трубопроводов.

Выполнена оценка состояния металла сварных труб при длительной эксплуатации. При анализе современных электродных материалов и способов электродуговой сварки плавлением рассмотрены: 1) ручная дуговая сварка штучными электродами; 2) механизированная сварка в защитных

газах проволоками сплошного сечения; 3) механизированная сварка порошковыми проволоками.

На основании вышеизложенного можно сформулировать задачи диссертационного исследования, решение которых позволит достигнуть поставленной цели:

- 1) Обосновать выбор сварочных материалов для строительства и ремонта технологических трубопроводов;
- 2) Выполнить оценку эффективности сварки технологических трубопроводов с использованием основных способов сварки;
- 3) Предложить мероприятия по повышению эффективности сварочных и контрольных операций при строительстве и ремонте технологических трубопроводов.

2 Анализ вариантов технологий сварки при строительстве и ремонте технологических трубопроводов

2.1 Учёт особенностей и условий при строительстве и ремонте технологических трубопроводов

2.1.1 Выбор сварочных материалов

В настоящее время при строительстве и ремонте магистральных и технологических для механизированной дуговой сварки в защитных газах регламентированы к применению проволоки сплошного сечения и порошковые проволоки, которые должны соответствовать требованиям [2–6].

Для отработки технологии механизированной дуговой сварки в защитных газах во всех пространственных положениях (потолочное, вертикальное, горизонтальное на вертикальной поверхности, нижнее), выбраны следующие сварочные материалы: проволока сплошного сечения Св-08Г2С (Украина); порошковые проволоки DW-50, DW-A55 (Kobelco, Япония), E71T-1 (Baoding lanyu welding material, КНР) и ППС-ТМВ7 («ТМ. ВЕЛТЕК», Украина). Такой выбор обосновывается необходимостью сравнить сварочно-технологические характеристики новых, современных высококачественных порошковых проволок с хорошо известной по опыту широкого применения в промышленности более дешевой проволокой Св-08Г2С с целью определения возможности их дальнейшего применения в условиях ремонта МГ под давлением. Все проволоки имели одинаковый диаметр 1,2 мм.

2.1.2 Влияние скорости ветра на качество формирования стыковых сварных швов

При выполнении сварки одним из факторов, влияющим на качество сварного соединения, считают надежность защиты расплавленного дугой металла шва от воздуха. Для механизированной дуговой сварки в полевых и

монтажных условиях этот фактор становится критическим, поскольку следует ожидать вредного воздействия порывов ветра на газовую защиту дуги. Поэтому существует потребность в экспериментальном определении влияния скорости ветра v_B на эффективность защиты зоны сварки и, соответственно, на качество формирования стыковых сварных соединений в зависимости от расхода защитного газа Q_G .

На первом этапе экспериментально получены предельные значения расхода защитного газа Q_G , которые позволяют избежать возникновения пор для заданных скоростей движения воздуха v_B .

Установлено, что в полевых и монтажных условиях сварки проволокой сплошного сечения Св-08Г2С в CO_2 исключается возникновение пор при скорости ветра до 2 м/с, а также показано, что применение порошковой проволоки повышает допустимую скорость ветра до 2,6 м/с из-за наличия газошлаковой защиты из компонентов сердечника. Такой результат достигается при увеличении расхода газа Q_G с 10...15 л/мин ($v_B = 0...0,25$ м/с) до 30 л/мин.

Поскольку известно, что в низколегированных сталях азот и кислород являются вредными примесями [7, 8], на втором этапе работ были проведены эксперименты по определению влияния скорости ветра v_B на содержание этих элементов в металле шва. Для проведения газового анализа были изготовлены образцы Ми99 из металла, который был наплавлен при разных величинах v_B .

Исследования выполняли с использованием газового анализатора LECO TC 436. Результаты приведены в табл. 2.1.

Видно, что при расходах защитного газа в количестве, необходимом для максимально допустимых скоростей v_B , содержание азота и кислорода в металле шва увеличивается незначительно. По абсолютной величине полученные значения содержания азота в 3,0...3,5 раза меньше максимально рекомендованного (0,02 %) для механизированной сварки в CO_2 . Общее содержание кислорода в шве, выполненном проволокой сплошного сечения,

меньше такого, которое было получено для Св-08Г2С ранее (0,0573 %) в работе [9]. Относительно порошковой проволоки следует отметить, что некоторое увеличение [O] в металле шва свя-ано с его наличием в сердечнике, но в абсолютном измерении содержание кислорода находится на уровне нормативных значений для проволок с рутиловым типом сердечника (0,06...0,085 %) [10].

Таблица 2.1 – Содержание азота [N] и кислорода [O] в наплавленном металле, %

Сварочный материал	Расход защитного газа $Q_{г}$, л/мин	[N], %	[O], %	Скорость ветра $v_{в}$, м/с
Св-08Г2С	10	0,0065	0,045	0,0
	27	0,0068	0,045	2,0
Е71Т-1	10	0,0054	0,056	0,0
	30	0,0058	0,062	2,5

2.1.3 Механические свойства металла стыковых и нахлесточно-стыковых швов

При ремонте поврежденных участков трубопроводов используют бандажи и муфты различных конструкций. Они обеспечивают усиление стенки трубы, а также сохранение работоспособности магистрали при нарушении целостности стенки в месте дефекта под муфтой.

Для соединения отдельных цилиндрических элементов между собой, а также с трубопроводом, применяют продольные стыковые и кольцевые нахлесточно-стыковые сварные швы. Нормативно-техническая документация требует, чтобы сварочные материалы отвечали следующим условиям:

- временное сопротивление разрушению при испытаниях на статическое растяжение должно быть не ниже нормативного значения временного сопротивления разрушения (разрыв) основного металла трубы;
- твердость металла шва должна быть не более HV10–280, зоны термического влияния - не более HV10–300 для труб с классом прочности до K55

включительно и не более HV10–325 для труб с классом прочности выше K55 до K60 включительно;

- ударная вязкость металла шва должна быть не менее 34 Дж/см² (по Шарпи) при температуре на 20 °С ниже минимальной температуры стенки трубы газопровода при эксплуатации.

Для определения механических свойств сварных соединений были сварены стыки толщиной 16,0 мм с разделкой кромок под общим углом 60°. Каждый слой выполнялся за один проход (рис. 2.1, а). Материалом служила трубная сталь X70 с механическими характеристиками $\sigma_T > 480$ МПа, $\sigma_B > 560$ МПа, $\delta_5 > 18$ %.

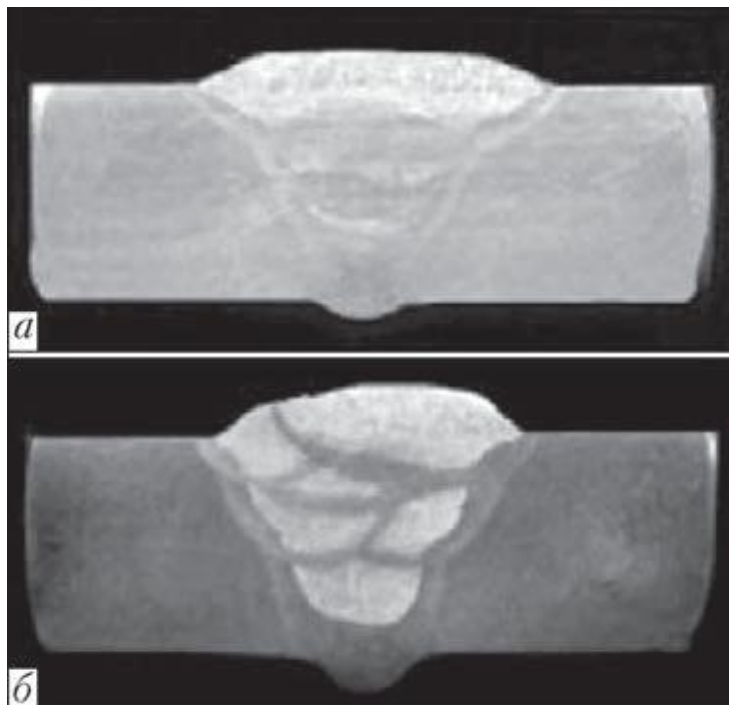


Рисунок 2.1 – Макрошлиф стыкового сварного соединения: сварка методом «один слой за один проход» (а); сварка ниточными валиками (б)

Сварку выполняли по комбинированной технологии – корневой шов стыкового соединения выполняли вручную штучным электродом диаметром 3 мм (УОНИ 13/45), разделку заполняли проволоками. Защитными газами служили углекислый газ CO₂ и смесь Ar (82 %) + CO₂ (18 %). Режимы сварки следующие: Св-08Г2С – $I_{св} = 140...150$ А, $U = 20...21$ В; порошковые

проволоки – $I_{св} = 200...220$ А, $U = 25...27$ В. Скорость сварки $v_{св} = 0,2...0,25$ м/мин, расход защитного газа $Q_{г} = 15$ л/мин.

Образцы для определения механических характеристик металла шва Ми12 тип II и ударной вязкости Ми50 тип 11 вырезали согласно требованиям [4, 6]. Результаты испытаний приведены в табл. 2.2. Анализ полученных результатов и их сравнение между собой показали, что с точки зрения выполнения первого условия проволоки E71T-1, DW-50, ППС-ТМВ7 и Св-08Г2С могут применяться при сварке сталей с классом прочности K55, а порошковая проволока DW-A55 – для труб с классом прочности K60 (X70). Измерение твердости металла в центре шва и ЗТВ показало, что все марки проволок соответствуют второму требованию (табл. 2.3).

Таблица 2.2 – Механические характеристики металла швов

Сварочный материал, защитный газ	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %	Ударная вязкость (KCV, Дж/см ²) при температуре, °С		
					0	-20	-40
Св-08Г2С, CO ₂	423	552	27,4	72,1	(168...138)/153	(91...88)/89	71...62)/67
Св-08Г2С, Ar+CO ₂	430	561	30,9	75,1	(177...154)/165	(98...93)/95	75...71)/72
E71T-1, Ar+CO ₂	444	557	29,0	71,6	(151...107)/128	(55...53)/53	63...32)/46
DW-A55, Ar+CO ₂	484	589	27,3	71,0	(176...152)/164	(147...128)/136	49...45)/46
DW-50, CO ₂	468	567	29,1	72,8	(44...40)/41	(23...22)/22	14...13)/13
ППС-ТМВ7, CO ₂	476	570	29,0	71,6	(172...170)/170	(125...110)/117	86...80)/83

Таблица 2.3 – Средняя твердость металла шва и ЗТВ (HV10)

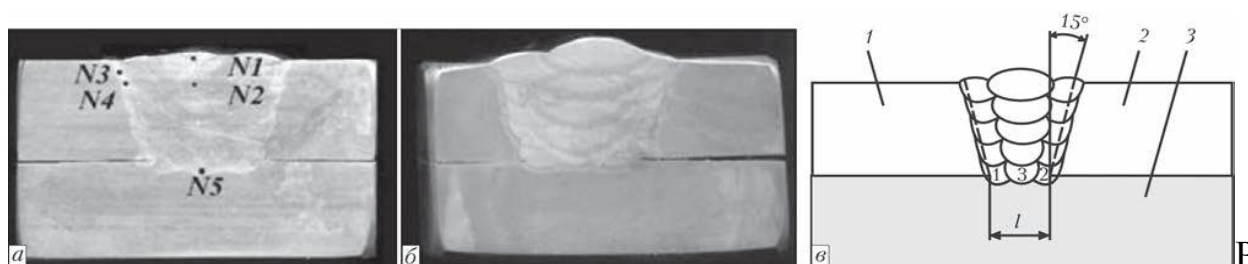
Исследуемый участок	Сварочный материал, защитный газ					
	Св-08Г2С, CO ₂	Св-08Г2С, Ar+CO ₂	E71T-1, Ar+CO ₂	DW-A55, Ar+CO ₂	DW-50, CO ₂	ППс-ТМВ7, CO ₂
Металл шва	149	148	148	153	149	148
ЗТВ	162	160	154	158	165	155

Анализ полученных результатов и их сравнение между собой показали, что с точки зрения выполнения первого условия проволоки E71T-1, DW-50, ППс-ТМВ7 и Св-08Г2С могут применяться при сварке сталей с классом прочности K55, а порошковая проволока DW-A55 – для труб с классом прочности K60 (X70). Измерение твердости металла в центре шва и ЗТВ показало, что все марки проволок соответствуют второму требованию (табл. 2.3).

Относительно показателей ударной вязкости (KCV) было установлено, что порошковая проволока DW-50 не соответствует третьему требованию при температурах испытания –20 и –40 °С (см. табл. 2.2). Было выдвинуто предположение, что одна из причин низких показателей ударной вязкости связана с техникой сварки, а именно – процесс заполнения разделки выполнялся с поперечными колебаниями на всю ее ширину с высокими значениями удельного тепловложения [11].

Поэтому было принято решение изменить схему заполнения разделки на такую, в которой сварка стыка выполнялась ниточными валиками без поперечных колебаний (рис. 2.1, б) с умеренным тепловложением. Результаты испытаний образцов металла шва, сваренного по новой схеме, показали существенное повышение механических характеристик и ударной вязкости ($\sigma_T = 540$ МПа; $\sigma_B = 612$ МПа; $\delta_5 = 27$ %; $\psi = 71,5$ %; $KCV_0 = (217...172)/197$, $KCV_{-20} = (160...101)/125$, $KCV = (87...51)/70$ Дж/см²). В качестве защитного газа использовали CO₂.

Сравнение этих результатов с предварительно полученными показывает, что для повышения механических характеристик и ударной вязкости металла сварных соединений необходимо изменить предварительно выбранную технику сварки стыка на такую, которая предусматривает заполнение разделки ниточными валиками без колебаний. Данный вывод был подтвержден при оценке ударной вязкости нахлесточно-стыковых соединений, в которых каждый слой выполнялся отдельными валиками 1, 2 в угол на каждую кромку, после чего внутри накладывался валик 3 (рис. 2.2). При проведении сварки использовались проволоки ППС-ТМВ7 и Св-08Г2С.



а, б – макрошлиф соединения с использованием соответственно проволоки Св-08Г2С и ППС-ТМВ7; в – схема разделки кромок и сварки (1, 2 – стенка усиливающего элемента: муфты (1) и технологического кольца (2); 3 – стенка газопровода; l – зазор между элементами муфты)

Рисунок 2.2 – Нахлесточно-стыковое сварное соединение

2.1.4 Требования к оборудованию для сварки

Оборудование для механизированной дуговой сварки в защитных газах должно включать профессиональные источники питания, которые предназначены для работы в тяжелых условиях. Аппараты должны иметь степень защиты не менее IP23. В комплектацию должны входить четырехроликовые выносные механизмы подачи проволоки с водяным охлаждением, которые позволяют подавать проволоку в шланги длиной до 6 м. Все требования к оборудованию, материалам, защитным газам изложены в разработанной технологической документации.

Можно отметить, что использование механизированной дуговой сварки в защитных газах с применением традиционных (Св-08Г2С) и современных сварочных материалов (DW-A55, E71T-1) позволяет достичь требований, предъявляемых к эксплуатационным характеристикам отремонтированных участков трубопровода.

2.2 Сварка технологических трубопроводов из жаропрочных сталей штучными электродами

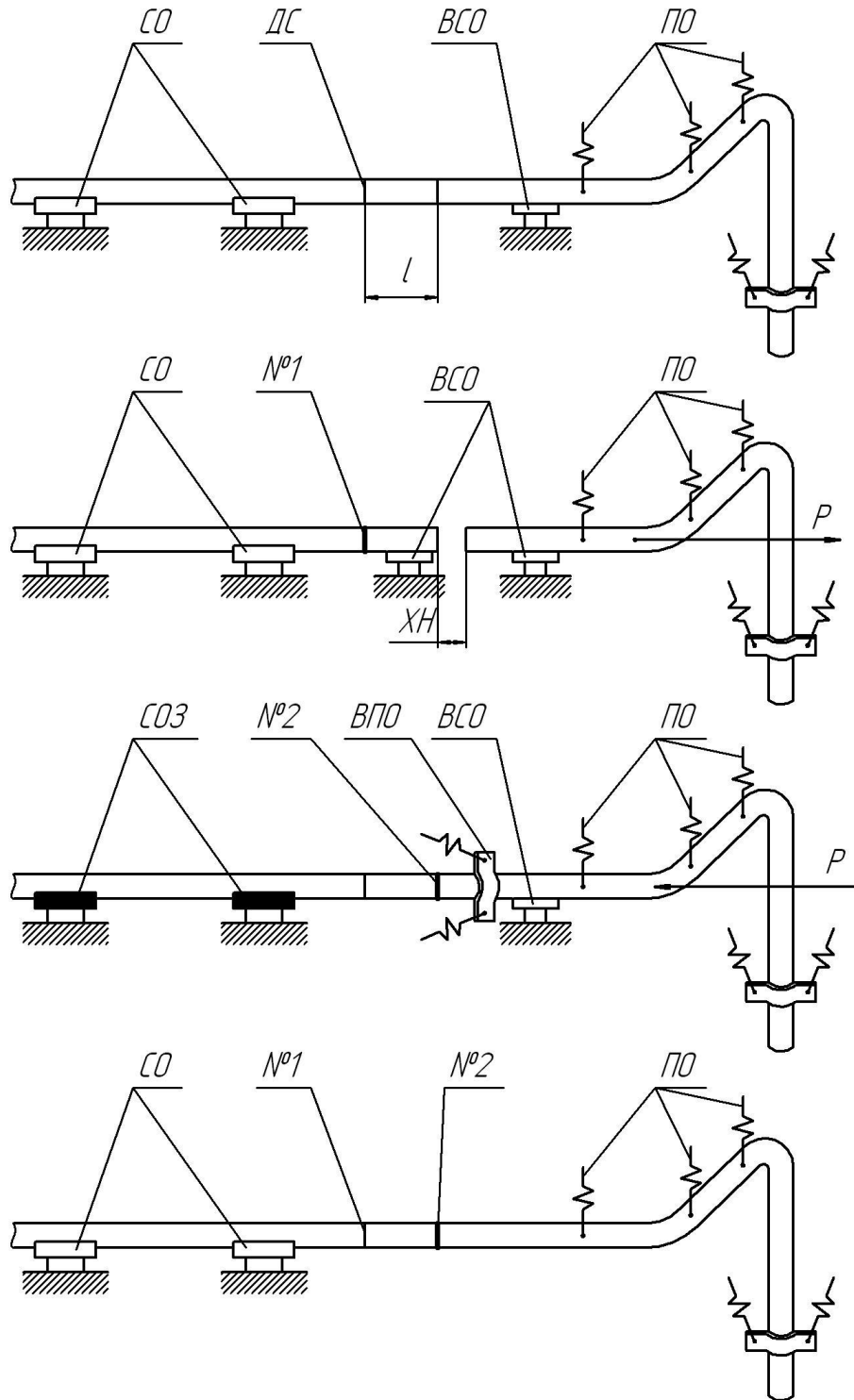
2.2.1 Общие сведения о технологии ремонтной сварки трубопровода

Длительная работа технологического трубопровода сопровождается возникновением трещин на внутренней поверхности сварных соединений. Повреждённые участки следует обнаруживать полностью переваривать.

При переварке поврежденного сварного соединения выполняют следующие операции (рис. 2.3):

- 1) размещают временную скользящую опору (ВСО);
- 2) вырезают патрубок I с дефектным стыком (ДС);
- 3) размещают вторую временную скользящую опору (ВСО);
- 4) устанавливают патрубок-вставку;
- 5) подвижный участок трубопровода смещают с силой P до получения зазора холодного натяга (ХН);
- 6) выполняют сварку стыка №1;
- 7) временно заземляют скользящие опоры (СОЗ);
- 8) удаляют временную скользящую опору в районе стыка №1;
- 9) устанавливают временную пружинную опору (ВПО);
- 10) смещают подвижную часть трубопровода в сторону стыка №2;
- 11) производят сварку стыка №2;
- 12) удаляют временное заземление скользящих опор (СО);
- 13) снимают временную пружинную опору;
- 14) удаляют временную скользящую опору;

15) трубопровод приведён в исходное состояние.



а) вырезают патрубок l , содержащий дефектный стык (ДС); б) размещают новый патрубок-вставку; выполняют стык №1; в) собирают и сваривают стык №2; г) приводят участок трубопровода в исходное рабочее состояние

Рисунок 2.3 – Операции при переварке дефектного участка технологического трубопровода

2.2.2 Требования к сварочным материалам

Для выполнения прихваток и сварки применяются электроды ОК-76.35 диаметром 2,6 и 3,2 мм. Перед использованием электродов следует произвести проверку наличия сертификата на электроды, сохранности упаковки и самих электродов, наличие на каждой пачке электродов соответствующих этикеток и полноту указанных в них данных. Непосредственно перед сваркой следует произвести прокалку электродов и проверить их сварочно-технологические свойства. Прокалку электродов следует производить при температуре 330...370 °С и выдержке 2...2,5 часа.

2.2.3 Подготовка кромок труб

Разделку кромок труб выполняют механическим способом (рис. 2.4). Для этого применяется машина безогневой резки «Волжанка-3». Прилегающие к кромкам поверхности следует зачистить до металлического блеска абразивным инструментом со стороны шва на расстоянии не менее 20 мм и не менее 10 мм с противоположной стороны.

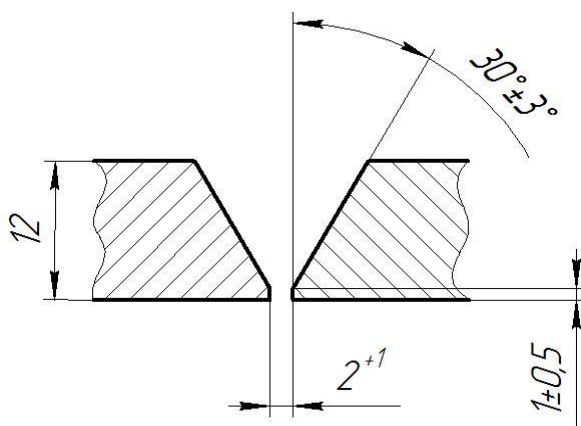


Рисунок 2.4 – Подготовка кромок свариваемых труб

2.2.4 Сборка под сварку

Прямолинейность труб в месте стыка проверяется контролированием просвета между концом металлической линейки (длина 400 мм) и поверхностью трубы. Поскольку рассматриваемый трубопровод относится к

категории I, то просвет должен быть не более 1,5 мм на расстоянии 200 мм от стыка (рис. 2.5).

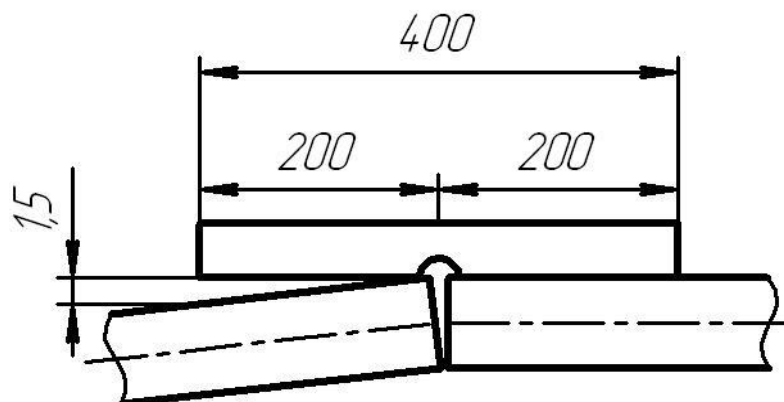


Рисунок 2.5 – Контроль прямолинейности собираемых элементов

2.2.4 Требования к предварительному подогреву

Предварительный подогрев стыка производят до температуры 350...400 °С. Подогрев стыка труб ведут с применением многопламенных горелок равномерно по всему стыку. Нагрев производят нейтральным пламенем.

Контроль температуры подогрева производят с помощью цифровых контактных термометров ТК-5 в двух диаметрально противоположных точках по периметру стыка, при этом на вертикальных стыках замер производится в нижней и верхней точках стыка.

2.2.5 Требования к сборке и прихватке

Сборку осуществляют на прихватках. Требования к прихватке: швы следует располагать равномерно по периметру стыка, число прихваток – 3...4 штуки, длина одной прихватки – 24...30 мм, высота прихватки – 5 мм. Прихватки следует выполнять с полным проплавлением и переваривать их при наложении первого слоя шва. Нельзя выполнять прихватки на потолочном участке стыка.

При сборке и прихвате применяются инвертор Lincoln V350; линейка измерительная; электроды ОК 76.35 Ø3,2 мм; многопламенные горелки; машинка угловая шлифовальная; контактные термометры ТК-5. Ток сварки – 90...120 А, напряжение дуги – 24...28 В.

2.2.6 Сварка

Сварку стыков следует начинать сразу же после прихватки. Промежуток времени между прихваткой и сваркой не должен превышать 4 часа. Сварку следует производить без перерыва, если произошёл вынужденный останов, необходимо обеспечить медленное и равномерное охлаждение стыка под слоем изоляции (керамическое волокно плотностью 128 кг/м³), а перед возобновлением сварки стык следует подогреть .

Сварку выполняют короткой дугой, длина которой не должна превышать одного диаметра электрода. В процессе сварки необходимо как можно реже обрывать дугу. Перед гашением дуги сварщик должен заполнить кратер путем постепенного отвода электрода и вывода дуги назад на 15...20 мм на только что наложенный шов. Последующее зажигание дуги производится на кромке трубы или на металле шва на расстоянии 20...25 мм от кратера. Для избежания зашлаковки металла шва около кромок труб следует наплавлять как можно более плоский валик.

В процессе сварки должны быть обеспечены полный провар корня шва и заделка кратера. По окончании наплавки каждого валика необходимо полностью удалить шлак после его охлаждения (потемнения). При обнаружении на поверхности шва дефектов (трещин, скоплений пор и т.п.) дефектное место следует удалить механическим способом до «здорового» металла и при необходимости заварить вновь.

При сварке используются электроды ОК 76.35 Ø2,6 мм. Ток сварки – 70...90 А, напряжение дуги – 22...26 В. Высота валика сварного шва должна быть 2...4 мм, ширина валика – 4...10 мм.

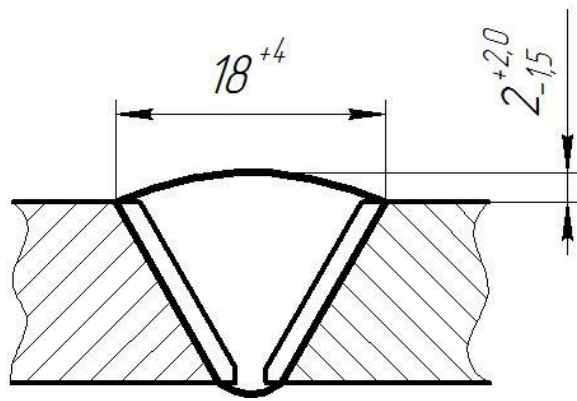


Рисунок 2.6 – Конструктивные элементы сварного шва

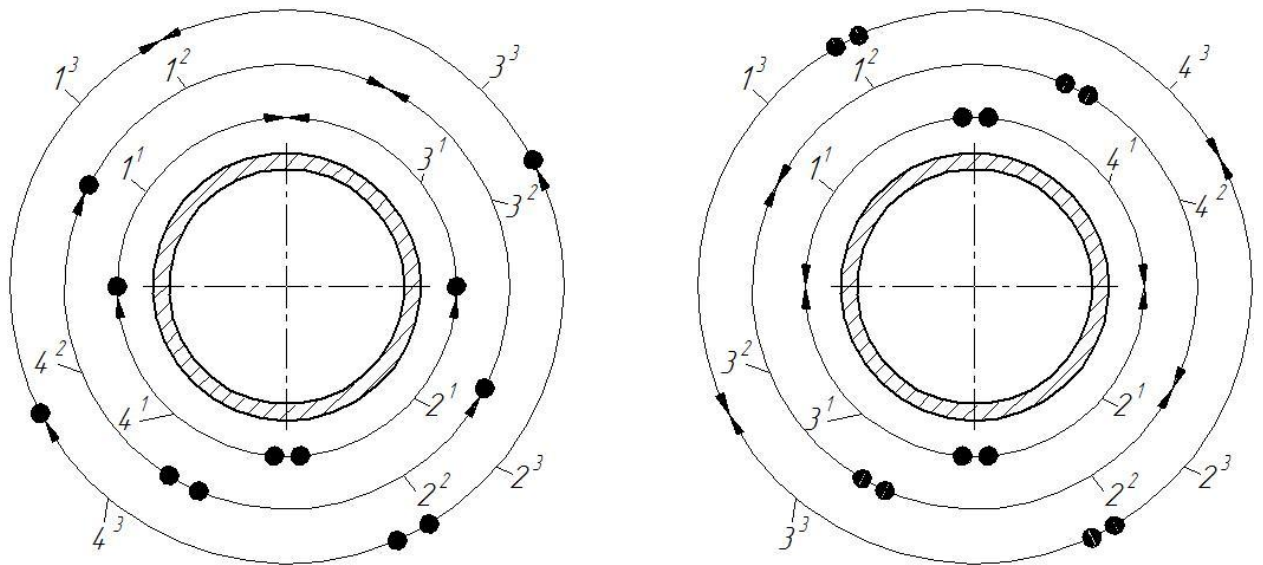


Рисунок 2.7 – Порядок сварки слоёв при вертикальном (а) и горизонтальном (б) положении стыка

Сварку основного слоя шва выполняют, оставляя незаполненную до краёв разделку (рис. 2.8), при этом остаточная глубина по всему периметру стыка должна быть $1,0 \dots 1,5$ мм. Эта незаполненная глубина используется для наложения облицовочного слоя.

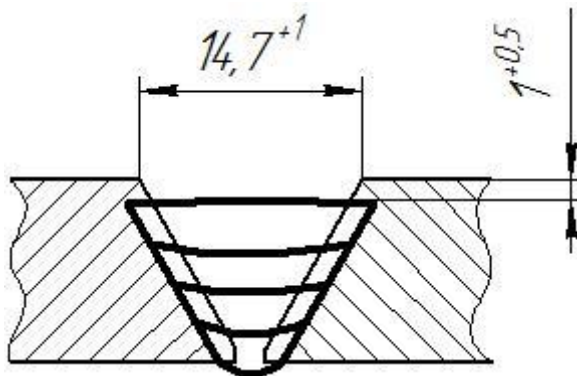


Рисунок 2.8 – Заполнение разделки (до заполнения облицовочного слоя)

Сварку облицовочного слоя следует выполнять в два этапа (рис. 2.9). На первом этапе обваривают кромки разделки, обеспечивая перекрытие кромок разделки. На втором этапе производят окончательную сварку облицовочного слоя шва.

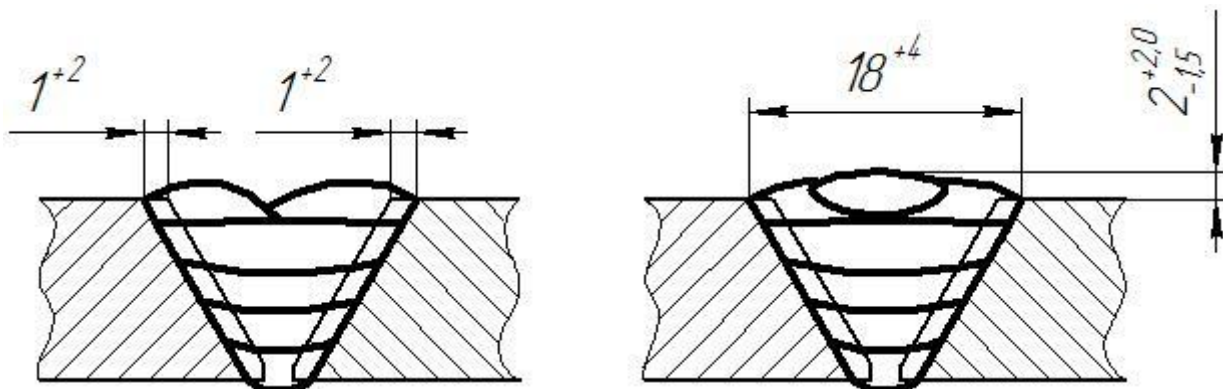


Рисунок 2.9 – Последовательность выполнения облицовочного шва

2.2.7 Термическая обработка

Производят нагрев сваренных стыков труб до температуры $740...760\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выдержку в течение не менее 2,5 часов. Скорость нагрева не должна превышать $400\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ч}$.

При положительной температуре окружающего воздуха после термообработки выполненного стыка труб следует произвести охлаждение до температуры $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ под слоем теплоизоляции, далее – охлаждать на спокойном воздухе. При отрицательной температуре воздуха охлаждение после термообработки следует производить под слоем теплоизоляции до полного остывания сварного соединения. При этом в обоих случаях скорость охлаждения не должна превышать $150\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ч}$.

2.2.8 Контроль качества

По окончании сварки сварные швы и околошовные зоны (по обе стороны сварного шва) на ширине не менее 20 мм следует зачистить до металлического блеска с применением абразивного инструмента. Далее производят контроль качества сварки.

Таблица 2.4 – Возникающие дефекты при ручной дуговой сварке трубопроводов и причины их появления

Дефекты	Причины образования дефектов
1	2
Непровары	1) неправильно выбрана форма разделки торцев труб; 2) малая величина погонной энергии при сварке; 3) нарушения при проведении подготовки поверхностей труб под сварку; 4) чрезмерная величина притупления кромок при подготовке торцев труб; 5) чрезмерно малая величина зазоров при сборке; 6) в процессе сварки сварочный электрод был смещён относительно стыка; 7) низкое качество промежуточной зачистки швов после выполнения очередного прохода
Подрезы	1) при выборе параметров режима была выбрана слишком большая сила сварочного тока; 2) при выборе параметров режима была выбрана слишком большая скорость сварки; 3) при осуществлении сварки была использована чрезмерная длинна дуги; 4) при осуществлении сварки не был обеспечен достаточный наклон сварочного электрода (неправильное ведение сварочного электрода)
Прожоги	1) при сварке была превышена допускаемая величина погонной энергии; 2) при сборке был установлен слишком большой зазор; 3) при подготовке торцев труб не была выполнена достаточная величина притупления кромок; 4) при сборке труб под сварку произошло чрезмерное смещение кромок; 5) при сварке произошло коробление деталей
Наплывы	1) при выборе параметров режима была выбрана слишком большая сила сварочного тока; 2) при выборе параметров режима была выбрана слишком большая скорость сварки; 3) при осуществлении сварки была использована чрезмерная длинна дуги; 4) смещение электрода при сварке; 5) при осуществлении сварки не был обеспечен достаточный наклон сварочного электрода (неправильное ведение сварочного электрода)
Свищ	1) низкое качество основного металла; 2) нарушение газовой защиты.
Трещины	1) после сварки произошло превышение времени между сваркой и термообработкой; 2) после сварки не была обеспечена минимальная скорость охлаждения стыка; 3) в процессе сварки была нарушена газовая защита; 4) низкое качество основного металла.

Продолжение таблицы 2.4

1	2
Поры	1) при сварке были применены отсыревшие электроды; 2) нарушение подготовки свариваемых кромок; 3) при сварке использовался электрод большего диаметра; 4) при осуществлении сварки была использована чрезмерная длина дуги; 5) при выборе параметров режима была выбрана слишком большая скорость сварки; 6) в процессе сварки была нарушена газовая защита; 7) низкое качество основного металла.
Включения	1) нарушения при проведении подготовки поверхностей труб под сварку; 2) низкое качество основного металла; 3) нарушение технологии сварки; 4) в процессе сварки была нарушена газовая защита.

Визуальный контроль производится невооруженным глазом или с помощью лупы 4-7-кратного увеличения для участков, требующих уточнения характеристик обнаруженных дефектов, с применением, при необходимости, переносного источника света.

По внешнему виду швы должны удовлетворять следующим требованиям:

- по форме и размерам швы должны соответствовать С17 по ГОСТ 16037 (рис. 2.6);
- швы должны иметь гладкую или равномерную чешуйчатую поверхность;
- металл шва должен иметь плавное сопряжение с основным металлом;
- швы не должны иметь недопустимых дефектов.

В сварных соединениях не допускаются следующие наружные дефекты: трещины всех видов и направлений, свищи и пористость наружной поверхности шва, подрезы, наплывы, прожоги и незаплавленные кратеры, грубая чешуйчатость поверхности шва, наружные поры и цепочки пор, подрезы основного металла.

2.3 Исследование технологических возможностей сварки порошковой проволокой

Особенности горения дуги, плавления и переноса металла при сварке в защитных газах проволоками сплошного сечения и порошковыми проволоками достаточно подробно освещены в работах [8, 20, 21]. В них отмечено, что стабильность процесса сварки и характер переноса электродного металла существенно зависят от химического состава проволоки, режима сварки, полярности тока и применяемого защитного газа [8, 20]. В последнее десятилетие получила распространение сварка в защитных газах проволокой с металлическим сердечником [21] с малой (до 2 %) массовой долей неметаллических составляющих. Однако особенности процесса дуговой сварки проволоками этого типа исследованы недостаточно.

Для оценки влияния малых добавок неметаллических минеральных компонентов в сердечнике на технологические свойства исследован процесс сварки в углекислом газе и смеси 80 % Ar + 20 % CO₂ порошковыми проволоками с металлическим сердечником различного состава. В качестве базовой взята порошковая проволока указанного типа диаметром 1,2 мм, в сердечнике которой отсутствуют минеральные составляющие. Исследовали влияние добавок в сердечнике проволоки таких минеральных компонентов, как оксид титана, фториды щелочных и щелочноземельных металлов. Массовая доля минеральной составляющей проволоки сердечника равнялась 0,6 % для четырех исследованных составов: рутил (TiO₂), смесь рутила и флюорита (TiO₂:CaF₂ – 3:1), смесь рутила и гексафтор-силиката натрия (соотношение компонентов TiO₂:Na₂SiF₆ – 3:1) и смесь рутила, гексафтор-силиката натрия и фторида цезия (TiO₂ + Na₂SiF₆ + CsF – 6:2:1).

Сварку выполняли на постоянном токе (обратная полярность) с использованием механизма подачи проволоки с максимальными отклонениями скорости +1,5 % и источника питания сварочной дуги ВС-500 с жесткой внешней характеристикой. Состав защитного газа (углекислый газ

и смесь 80 % Ar + 20 % CO₂) по содержанию примесей удовлетворял требованиям существующих стандартов. При выполнении опытных сварок напряжение на дуге составляло $U_d = 24... 26$ В, сварочный ток – $I_{св} = 260...290$ А, расход защитного газа – 18 л/мин.

Основные параметры процесса дуговой сварки измеряли с использованием системы регистрации и анализа электрических сигналов – анализатора «Ганновер АН-ХП» [22, 23]. В процессе измерений определяли плотность распределения вероятности напряжения на дуге и сварочного тока, а также частоту коротких замыканий и средневзвешенное время горения дуги. Частота съема данных составляла $5 \cdot 10^5$ с⁻¹, а продолжительность непрерывной регистрации параметров при опытных сварках во всех случаях – 2 с. Результаты измерений обрабатывали с помощью методов математической статистики [24].

Для анализа результатов брали вычисленные средние значения напряжения на дуге и сварочного тока вместе с их стандартными отклонениями и коэффициентами вариации. По этим данным строили кривые плотности вероятности и получали временные характеристики (в частности, длительность коротких замыканий, средневзвешенное время горения дуги). Результаты статистической обработки параметров дуговой сварки (сварочного тока $I_{св}$, напряжения на дуге U_d и длительности коротких замыканий $\tau_{кз}$) порошковыми проволоками с металлическим сердечником, полученные с помощью анализатора «Ганновер АН-ХП», приведены в таблице 2.4.

Сопоставление данных, полученных при сварке в углекислом газе и смеси 80 % Ar + 20 % CO₂, показало, что характер плавления и переноса электродного металла существенно изменяется независимо от состава минеральной добавки в сердечнике порошковой проволоки. Из таблицы 2.4 видно, что замена углекислого газа на его смесь с аргоном приводит к уменьшению средней длительности коротких замыканий – от 0,4... 11,0 мс до практически полного их исчезновения. Имеет место также изменение

характера переноса электродного металла от мелкокапельного к струйному. При этом резко снижается разбрызгивание металла, а амплитуды флюктуации сварочного тока и напряжения уменьшаются. Стандартные отклонения напряжения уменьшаются с 1,1... 2,4 (при сварке в углекислом газе) до 0,5... 0,7 В (при использовании смеси аргона с углекислым газом), а сварочного тока снижаются в 2...3 раза. Получить струйный перенос электродного металла при экспериментальной сварке в чистом углекислом газе проволоками исследуемого типа практически не удалось.

Данные таблицы 2.4 свидетельствуют о том, что введение в сердечник порошковой проволоки оксида титана (рутила) влияет на стабильность процесса сварки незначительно, а небольшая добавка минеральных составляющих, содержащих соединения фтора, оказывает значительное влияние на стабильность процесса сварки. Однако даже при малом (приблизительно до 0,3 мас. %) содержании фтористых соединений в сердечнике порошковой проволоки стабильность процесса сварки зависит от природы этих соединений. Об этом свидетельствуют изменения общего количества коротких замыканий и амплитуды флюктуации сварочного тока и напряжения на дуге. Так, при сварке в смеси аргона и углекислого газа при введении в сердечник флюорита наблюдается струйный перенос электродного металла, в то время как добавка гексафторсиликата натрия вызывает появление единичных коротких замыканий (см. таблицу 2.4).

Интенсивное выделение газа из сердечника порошковой проволоки при термической деструкции гексафторсиликата натрия обуславливает неравномерность переноса электродного металла. Введение в сердечник проволоки смеси рутила с флюоритом в исследованных массовых долях приводит к некоторой стабилизации процесса сварки и переходу от капельного к струйному переносу электродного металла при сварке в углекислом газе. Наличие флюорита оказывает благоприятное действие на плавление оксида титана и устраняет неравномерность плавления проволоки.

Таблица 2.4 – Статистические характеристики процесса сварки порошковыми проволоками с металлическим сердечником в защитных газах на различных режимах

Минеральная составляющая сердечника	Защитная среда	U_d , В	$I_{св}$, А	$\tau_{сум}$, мс	$\tau_{ср}$, мкс	K_U , %	K_I , %	K_τ
Нет	CO ₂	24,8	268	0,8	400	0,07	0,15	1,24
		24,7	273	0,4	100	0,08	0,16	0,58
	80 % Ar + 20 % CO ₂	24,9	262	0	0	0,03	0,06	∞
TiO ₂	CO ₂	24,9	285	2,0	177	0,09	0,16	1,04
		25,4	271	0,6	183	0,08	0,16	0,31
	80 % Ar + 20 % CO ₂	24,8	275	0	0	0,03	0,16	∞
TiO ₂ + Na ₂ SiF ₆	CO ₂	25,0	277	11,0	423	0,10	0,15	1,73
	80 % Ar + 20 % CO ₂	25,4	296	0	0	0,03	0,06	∞
TiO ₂ + CaF ₂	CO ₂	24,4	293	0	0	0,06	0,09	∞
		24,8	278	0	0	0,06	0,11	∞
	80 % Ar + 20 % CO ₂	24,2	231	0	0	0,02	0,09	∞
TiO ₂ + CaF ₂ + CsF	CO ₂	25,1	301	2,1	210	0,06	0,11	1,29
		24,9	269	0	0	0,07	0,08	∞
	80 % Ar + 20 % CO ₂	24,6	278	0	0	0,02	0,05	∞

U_d – значение напряжения на дуге; $I_{св}$ – значение сварочного тока; $\tau_{ср}$ – среднее значение длительности коротких замыканий; $\tau_{сум}$ – суммарная продолжительность коротких замыканий; K_U , K_I , K_τ - коэффициенты вариации напряжения на дуге, сварочного тока и длительности коротких замыканий

Введение небольшого количества ионизирующего компонента (фторида цезия) способствует стабилизации процесса сварки. Использование смеси аргона с углекислым газом независимо от состава минеральных составляющих сердечника порошковой проволоки оказывает стабилизирующее влияние на процесс ее плавления и обуславливает переход от мелкокапельного переноса электродного металла к струйному.

1. Исследования процесса сварки опытной порошковой проволокой с металлическим сердечником с использованием в качестве защитной среды углекислого газа и его смеси с аргоном показали, что при массовой доле минеральных составляющих в проволоке менее 2 % процесс сварки в смеси 80 % Ar + 20 % CO₂ отличается стабильностью плавления и наличием

перехода от мелкокапельного переноса электродного металла к струйному без коротких замыканий.

2. При дуговой сварке процесс плавления проволок, содержащих в качестве минеральной составляющей сердечника термические нестабильные фториды, характеризуется меньшей стабильностью и увеличением разбрызгивания металла. Компоненты оксидного типа (рутил) в композиции с нелетучими фторидами (в исследованном интервале их содержания в сердечнике проволоки) стабилизируют процесс сварки в углекислом газе.

3. Результаты исследований стабильности горения дуги при сварке порошковыми проволоками с металлическим сердечником позволили определить состав минеральной составляющей сердечника, обеспечивающий высокие показатели стабильности процесса сварки и снижение потерь электродного металла при сварке в защитных газах.

2.4 Сварка технологических трубопроводов из жаропрочных сталей механизированной сваркой проволокой сплошного сечения

2.4.1 Выбор сварочных материалов

При выполнении сварных соединений в конструкциях из теплоустойчивых сталей с применением механизированной сварки в качестве защитного газа может быть использован как углекислый газ, так и смесь углекислого газа с аргоном (до 25 % аргона). В настоящей выпускной квалификационной работе в качестве защитного газа применим углекислый газ высшего сорта по ГОСТ 8050.

При выполнении ответственных металлических конструкций для механизированной дуговой сварки в защитных газах регламентированы к применению проволоки сплошного сечения и порошковые проволоки, которые должны соответствовать требованиям [2–6].

В качестве сварочной проволоки применим проволоку Св-08ХГСМА по ГОСТ 2246. Это легированная сварочная проволока, в состав которой

входит: углерод 0,06...0,1 %, кремний 0,45...0,7 %, марганец 1,15...1,45 %, никель до 0,3 %, хром 0,85...1,15 %, молибден 0,4...0,6 % (табл. 2.5).

Таблица 2.5 – Состав электродной проволоки Св-08ХГСМА

углерод	кремний	марганец	никель	хром	молибден
С	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
0,06...0,1	0,45...0,7	1,15...1,45	до 0,3	0,85...1,15	0,4...0,6

2.4.2 Конструкция сварного соединения и параметры режима сварки

Выполнение разделки кромок стыкуемых труб перед сваркой проводим механическим способом. При выполнении разделки принимаемый тип соединения - Тр-2 (рис. 2.10). Следует произвести зачистку до металлического блеска прилегающих к кромкам поверхностей труб с применением абразивного инструмента. Предложено уменьшить угол разделки кромок с 30° до 15°. Это позволит уменьшить расход электродной проволоки и увеличить производительность сварки. Обеспечение качественного формирования корня шва будет происходить за счёт импульсного управления горением сварочной дуги. Высота валика 4...6 мм, ширина валика 4...10 мм. Примерное расположение слоёв и валиков для вертикального и горизонтального стыков приведены на рис. 2.12 и рис. 2.13.

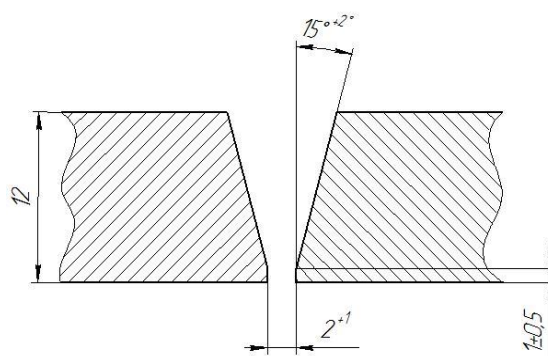


Рисунок 2.10 – Подготовка под сварку труб диаметром 325 мм толщиной стенки 12 мм

Задание параметров режима сварки вертикального стыка при различных положениях свариваемого участка (рис. 2.13) производят по табл. 2.6.

Задание параметров режима сварки горизонтального стыка для различных валиков производят по табл. 2.7.

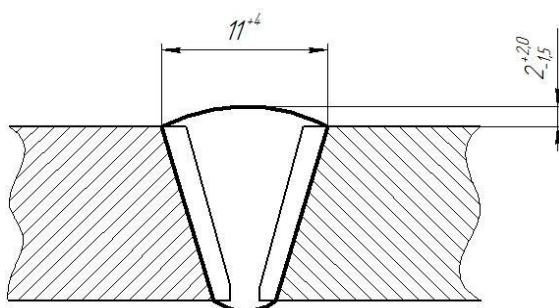


Рисунок 2.11 – Размеры сварного шва при соединении труб диаметром 325 мм толщиной стенки 12 мм

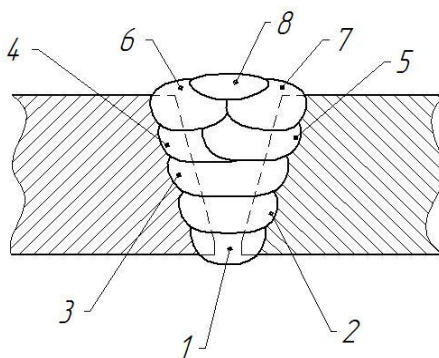


Рисунок 2.12 – Сварное соединение и порядок наложения валиков в вертикальном стыке

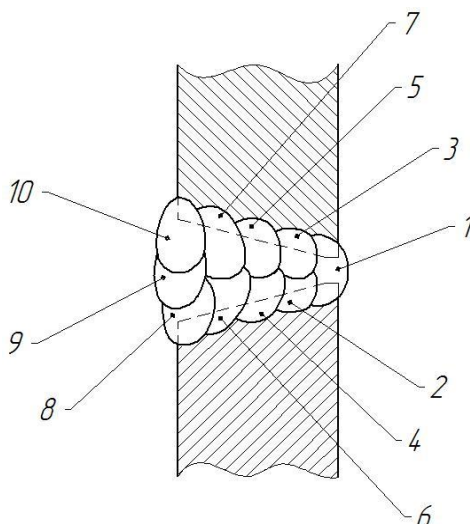


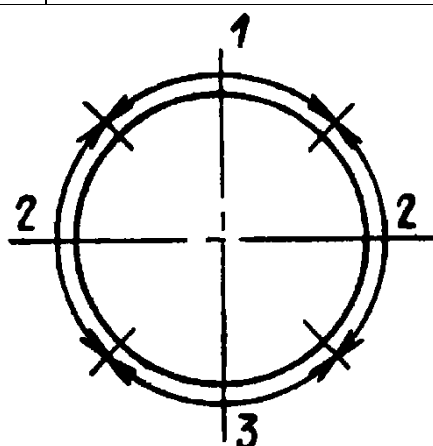
Рисунок 2.13 – Сварное соединение и наложение валиков в горизонтальном стыке

Таблица 2.6 – Параметры режима сварки вертикальных неповоротных стыков

№ валика	Напряжение дуги, В	Ток, А
1	19-20	120-140
2, нижнее	20-22	140-180
2, вертикальное	19-20	120-140
все потолочные	19-20	120-140
остальные	20-22	140-180

Таблица 2.7 – Параметры режима сварки горизонтальных неповоротных стыков

№ валика	Напряжение дуги, В	Ток, А
1, 2	22-23	140-160
остальные	24-25	180-200



1 – нижнее, 2 – вертикальное, 3 – потолочное положения сварки

Рисунок 2.14 – Схема расположения участков шва при сварке в углекислом газе вертикального неповоротного стыка

Расход углекислого газа должен составлять 900...1200 л/ч. Диаметр электродной проволоки должен быть 1,2 мм.

Выбор скорости V_{np} подачи электродной проволоки осуществляем исходя из принятой силы сварочного тока $I_{св}$ и заданного диаметра сварочной проволоки d_{np} с использованием формулы:

$$V_{i\delta} = \frac{4a_{\delta} \cdot I_{\text{н\ddot{a}}}}{\pi \cdot d_{\text{y}}^2 \cdot \rho}, \quad (2.1)$$

где α_p – коэффициент расплавления проволоки, г/А·ч;

ρ - плотность металла электродной проволоки, г/см³.

Значение α_p рассчитывается по формуле:

$$a_{\delta} = 3,0 + 0,08 \frac{I_{\text{н\ddot{a}}}}{d_{\text{y}}}. \quad (2.2)$$

$$a_{\delta} = 3,0 + 0,08 \frac{120...140}{1,2} = 11...12; V_{i\delta} = \frac{4 \cdot (11...12) \cdot (120...140)}{3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 7,8} = 150...195.$$

$$a_{\delta} = 3,0 + 0,08 \frac{140...180}{1,2} = 12...15; V_{i\delta} = \frac{4 \cdot (12...15) \cdot (140...180)}{3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 7,8} = 195...305$$

$$a_{\delta} = 3,0 + 0,08 \frac{140...160}{1,2} = 12...14; V_{i\delta} = \frac{4 \cdot (12...14) \cdot (140...160)}{3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 7,8} = 195...250$$

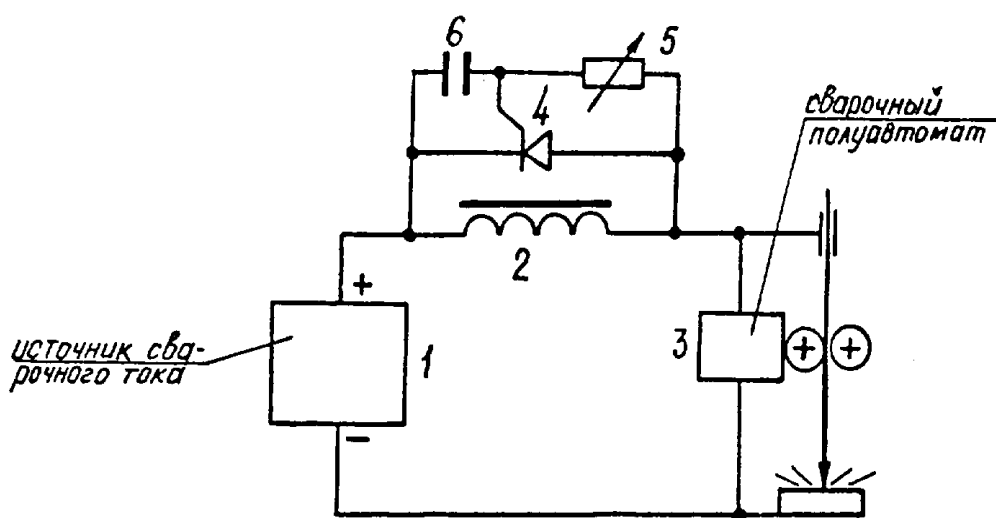
$$a_{\delta} = 3,0 + 0,08 \frac{180...200}{1,2} = 15...16; V_{i\delta} = \frac{4 \cdot (15...16) \cdot (180...200)}{3,14 \cdot 1,2^2 \cdot 7,8} = 305...370$$

2.4.3 Оборудование для сварки и термической обработки

Сварку следует вести на токе обратной полярности, используя переносной шланговый полуавтомат ПДГ-508. В качестве источника сварочного тока применяется выпрямитель ВДУ-506. Сварку ведут периодическими короткими замыканиями дугового промежутка. Для формирования импульсов предлагается устройство (рис. 2.15), которое содержит источник 1 сварочного тока, сварочный дроссель 2, сварочный полуавтомат 3, тиристор 4, блок управления, состоящий из регулируемого резистора 5 и накопительного конденсатора 6 [35].

Устройство работает следующим образом. В начале сварки, при первоначальном возбуждении дуги, и в процессе сварки, при переходе капли расплавленного металла с конца электрода в сварочную ванну, происходит закорачивание дугового промежутка, ток в сварочной цепи резко возрастает

и достигает своего максимального значения. В сварочном дросселе 2 в этот момент накапливается электромагнитная энергия, которая после окончания короткого замыкания в результате взрыва перемычки выделяется на концах обмотки дросселя в виде напряжения ЭДС самоиндукции, причем величина ее может в несколько раз превышать напряжение источника сварочного тока (рис. 2.16 а) при длительности импульса 1...2 мс. Это напряжение оказывается приложенным по цепи питания к электрической схеме сварочного полуавтомата 3 и может вывести из строя ее элементы.



1 – источник сварочного тока; 2 – сварочный дроссель; 3 – сварочный полуавтомат; 4 – тиристор; 5 – регулируемый резистор; 6 – накопительный конденсатор

Рисунок 2.15 – Схема устройства для механизированной сварки

Однако при достижении напряжением ЭДС самоиндукции порога отпирания тиристора $4U_{отп}$, последний открывается и закорачивает избыток напряжения на себя, предотвращая тем самым повышение напряжения в сварочной цепи и защищая электрическую схему сварочного полуавтомата от перенапряжений (рис. 2.16 б).

Регулируемым резистором 5 устанавливается порог отпирания тиристора. При этом, чтобы избежать нежелательного подмагничивания

сварочного дросселя током, обусловленным напряжением пульсаций питающей сети, порог отпирания тиристора выбирается выше напряжения пульсаций, которое выделяется на концах обмотки сварочного дросселя.

Устройство позволяет полностью исключить перенапряжение в сварочной цепи.

Термическую обработку сварного соединения проводим с использованием токов промышленной частоты. Производят нагрев сваренных стыков труб до температуры 740...760 °С и выдержку в течение не менее 2,5 часов. Скорость нагрева не должна превышать 400 °С/ч.

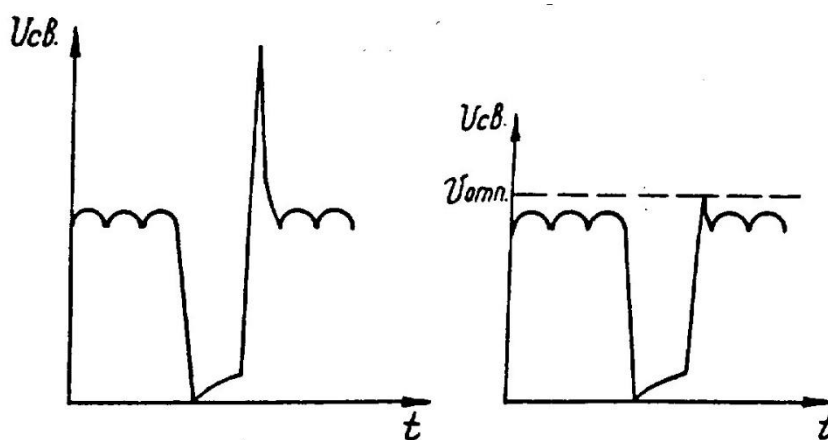


Рисунок 2.16 – Формы напряжения в сварочной цепи при сварке короткими замыканиями типичная (а) и при использовании устройства (б)

При положительной температуре окружающего воздуха после термообработки выполненного стыка труб следует произвести охлаждение до температуры +300 °С под слоем теплоизоляции, далее – охлаждать на спокойном воздухе. При отрицательной температуре воздуха охлаждение после термообработки следует производить под слоем теплоизоляции до полного остывания сварного соединения. При этом в обоих случаях скорость охлаждения не должна превышать 150 °С/ч.

В качестве индукционного нагревателя применим гибкие естественно охлаждаемые индукторы. Производят намотку индуктора на трубу, которая

выполняется в виде секций в количестве одной или двух, которые последовательно соединены между собой (рис. 2.17).

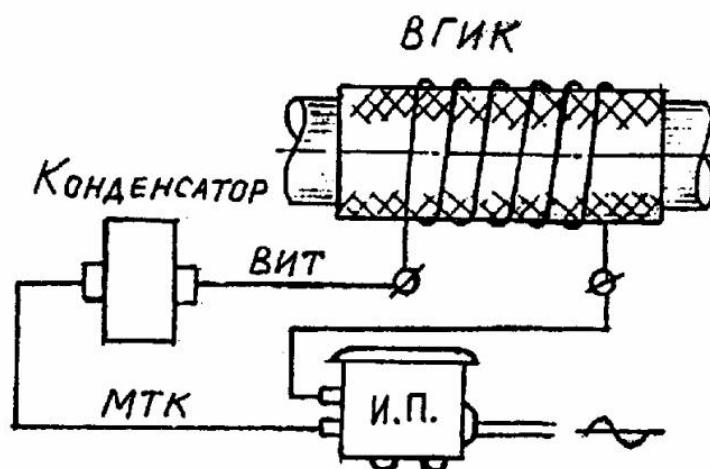


Рисунок 2.17 – Подключение элементов индукционного нагрева труб

При нагреве в качестве источника питания будет использован сварочный трансформатор ТДМ-501.

Для контроля температуры сварного соединения при термообработке будет использована хромель-алюмелевый термоэлектрический преобразователь, снабжённый автоматическим регистрирующим потенциометром. Регистрация температуры должна производиться во время нагрева, выдержки и охлаждения стыка до достижения температуры 300 °С.

3 Повышение эффективности строительства и ремонта технологических трубопроводов

3.1 Анализ обнаруживаемости дефектов при использовании различных способов контроля качества

Уменьшение отказов трубопроводов за счёт борьбы с дефектами в сварном шве в настоящее время происходит за счёт многократного увеличения объемов контроля качества. Такой подход не может считаться оптимальным, потому что имеет не интенсивный, а экстенсивный характер.

Рис. 3.1 представляет собой диаграмму, на которой показаны различные виды дефектов, которые обнаруживаются в очагах отказов трубопроводов. Различные методы контроля позволяют получить бездефектное соединение, вероятность получения которого показана на диаграмме (рис. 3.2).

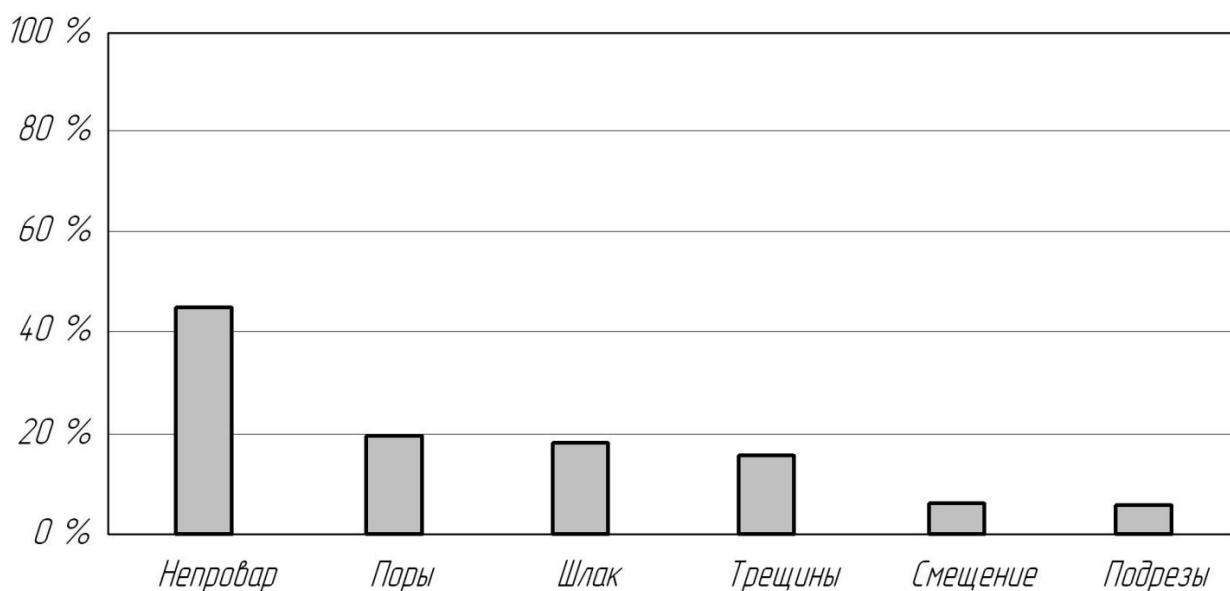


Рисунок 3.1 – Распределение дефектов в очагах отказов

Статистические данные позволяют заключить, что уменьшение до приемлемого уровня количества отказов до возможно без увеличения объема контроля. Интенсивный путь заключается в применении дифференциального подхода для выбора методик контроля качества. Во-первых, это повышает

качество выполнения монтажно-строительных работ при строительстве трубопроводов. Во-вторых, снижается трудоемкость и затраты на осуществление контроля качества.

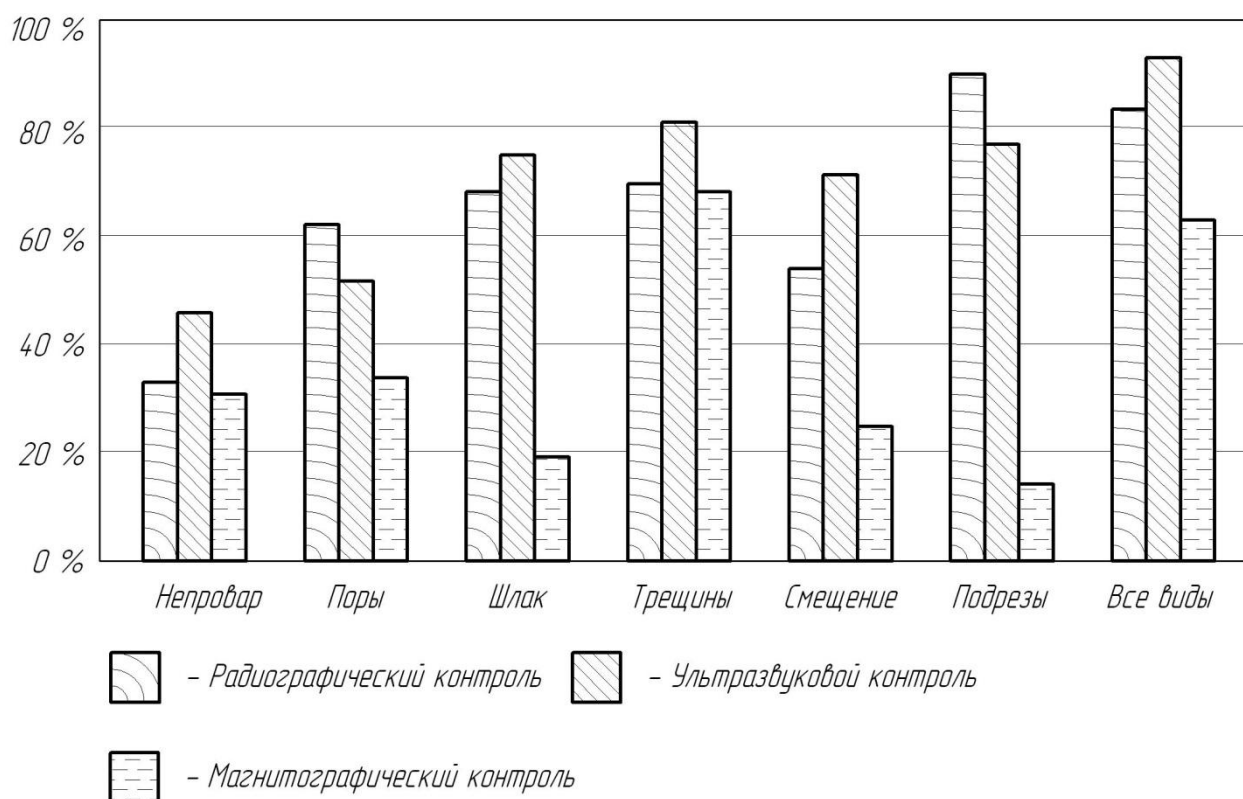


Рисунок 3.2 – Вероятность отсутствия дефектов с учетом применения различных методов контроля

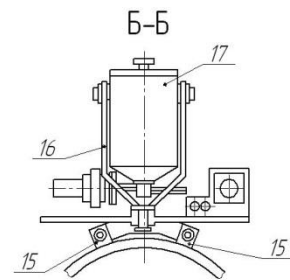
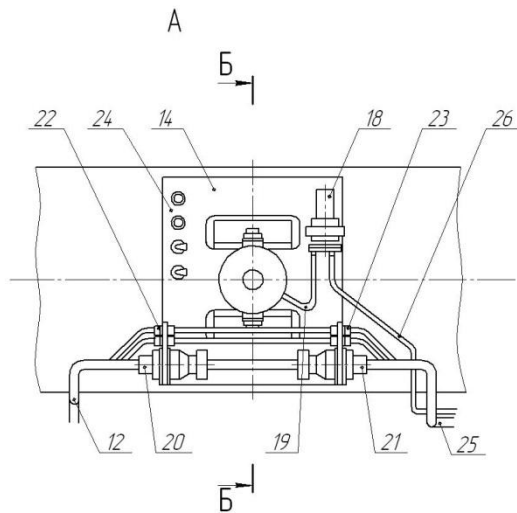
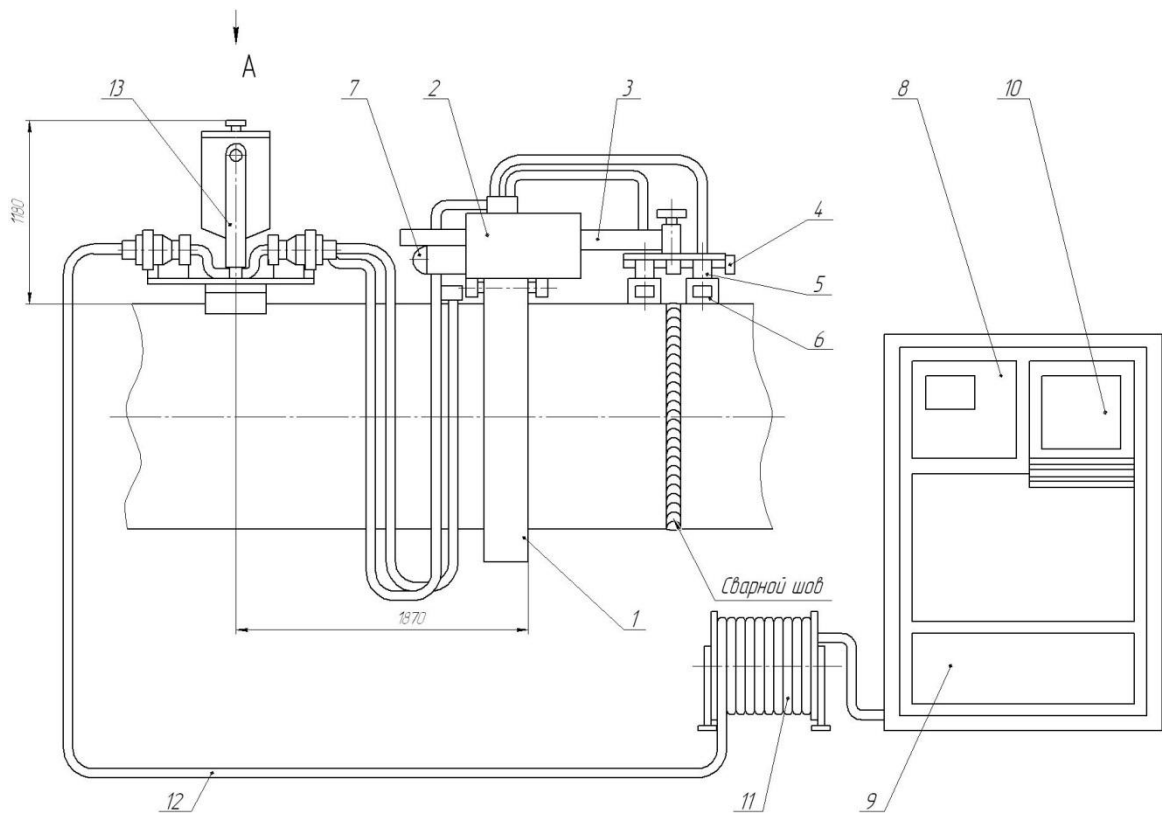
3.2 Аппаратное обеспечение повышения эффективности методик контроля качества

Для проведения автоматизированного контроля качества предложен аппаратный комплекс (рис. 3.3). В состав данного комплекса входит: съемная направляющая (1), каретка (2) с приводом для продольного движения, рама (3) с приводом для поперечного движения, механизм (4) перемещения искательных головок (6), держатель (5), датчик перемещения (7), дефектоскоп (8), блок питания (9), система анализа информации (10), кабель (12), катушка (11), подвеска (13), несущая емкость с контактной жидкостью, промежуточный кабель (25) и трубку для подачи жидкости (26).

Работа комплекса происходит следующим образом. Выполняют установку дефектоскопа 8, блока питания 9 и системы 10 анализа информации около контролируемого стыка на некотором от него расстоянии.

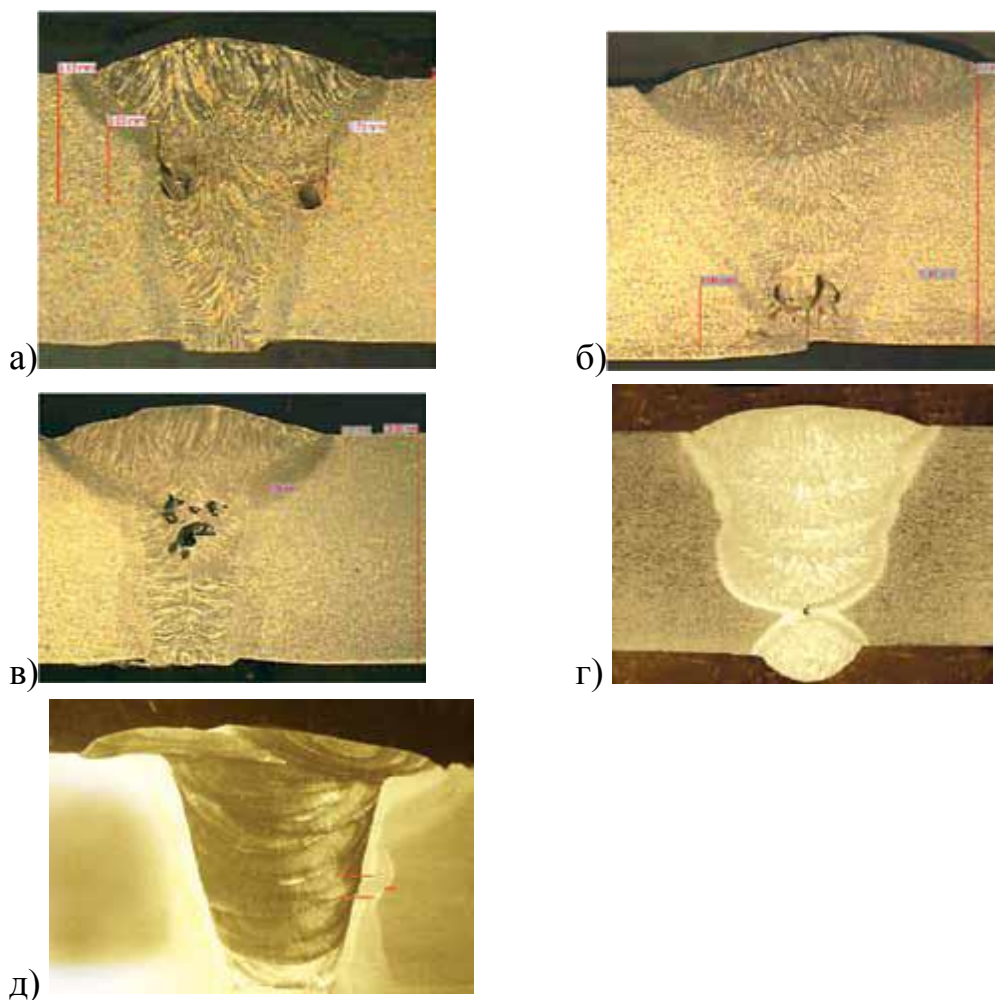
Далее выполняют закрепление на трубопроводе направляющей 1, на которую устанавливают каретку и все входящие в систему контроля элементы. Далее устанавливают подвеску 13, которую закрепляют с использованием прижимов. Размещают емкость с контактной жидкостью таким образом, чтобы она заняла вертикальное положение. В процессе установки подвески следует обеспечить длину петли, образуемой промежуточным жгутом 25 и гибкой трубкой 26, которая должна быть несколько больше, чем длина окружности стыка. С использованием ручного управления производят установку каретки 2 и рамки 3 в фиксированное исходное положение. Включение комплекса в работу осуществляется с дистанционного блока питания и управления 9.

После включения процесса контроля происходит включение насоса, и осуществляется подача контактной жидкости в искательные головки 6. После того, как был установлен стабильный акустический контакт, производится включение приводов каретки 2 и рамы 3. Начинается перемещение по заданной траектории искательных головок согласно заложенной программе, выполняется прозвучивание всего сечения сварного шва. Обработка и регистрация сигналов от дефектов и от датчиков координат осуществляется системой 10. При движении каретки происходит уменьшение длины петли жгута 25, который в конце хода полностью выбирается, охватывая изделие. После окончания процесса контроля стыка происходит отключение приводов и насоса. Далее каретку, подвеску и направляющую снимают и переводят к следующему стыку.



- Техническая характеристика
- диаметр свариваемых труб 800, 1420 мм
 - толщина стенки трубы 10, 27,7 мм
 - скорость перемещения головки 10 мм/с
 - точность позиционирования головки 1 мм
 - масса установки 30 кг
 - масса источника питания и аппаратуры управления 200 кг

Рисунок 3.4 – Аппаратный комплекс для автоматизированного ультразвукового контроля кольцевых сварных соединений



а) несплавления, б) дефекты корня, в) скопления пор, г) непровар,
д) несплавление по кромке

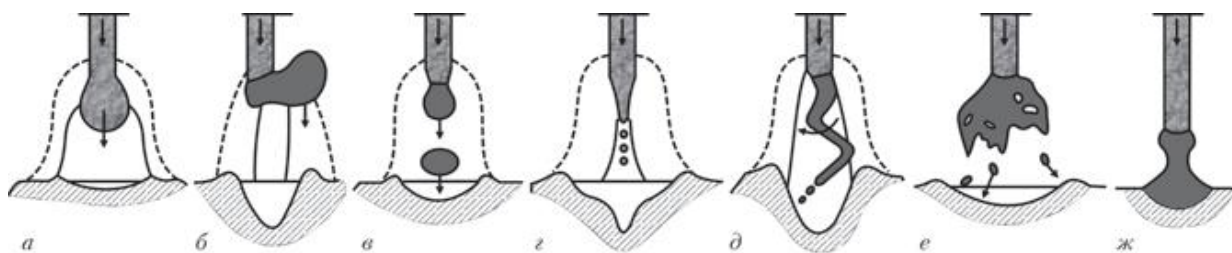
Рисунок 3.5 – Дефекты сварных швов, выявляемых в процессе
автоматизированного ультразвукового контроля

3.3 Выбор защитного газа

Диоксид углерода долгое время преимущественно использовали в странах Восточной Европы и развивающихся странах благодаря его относительно низкой стоимости и доступности. Однако такие существенные недостатки сварки в CO_2 серийными кремнемарганцевыми проволоками, как повышенный уровень разбрызгивания и набрызгивания электродного металла, не широкое и глубокое проплавление основного металла с высоким валиком, зачастую плохие физико-механические свойства металла шва и особенно его ударная вязкость при отрицательных температурах стали причиной того, что в последнее время и в этих странах наблюдаются

устойчивые тенденции к вытеснению CO_2 смесями газов на основе аргона в тех отраслях, где уделяется повышенное внимание к показателям качества металла шва и сварных соединений. Среди промышленно развитых стран только в Японии сохраняются устойчиво высокие объемы применения сварки в CO_2 (около 70 % общего объема сварочных работ, выполняемых механизированной сваркой в защитных газах) [37]. Поскольку это страна с весьма ограниченными энергетическими ресурсами, то, по-видимому, повышенная энергоемкость производства аргона по сравнению с CO_2 является основной причиной того, что работы по уменьшению недостатков процесса сварки в CO_2 в Японии ведутся в направлении совершенствования источников питания или использования новых сварочных проволок как сплошного сечения, так и порошковых [37].

Смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$. Применение смесей этих газов происходит по причине поиска защитной среды, сочетающей в себе преимущества аргона, углекислого газа и аргоно-кислородной смеси. Выявляется существенная зависимость от состава смеси формы дуги и характера переноса электродного металла при использовании в качестве защитного газа смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$. При одних и те же параметрах режима сварки в смесях с различным содержанием CO_2 переноса электродного металла может иметь характер как капельный без коротких замыканий (рис. 3.6 а), так с короткими замыканиями дугового промежутка (рис. 3.6 ж), мелкокапельный (рис. 3.6 в) и струйный (рис. 3.6 г). При содержании углекислого газа более 20 % при значении тока выше критического значения происходит изменение формы проплавления основного металла и исчезновение пальцеобразного провара (рис. 3.6 г). При условии содержания в защитной смеси CO_2 в пределах 35...40 %, сварка становится похожей на сварку в чистом углекислом газе, однако при этом снижается разбрызгивание электродного металла.



а) капельный; б) крупнокапельный; в) мелкокапельный; г) струйный; д) струйно-вращательный; е) со взрывом капли; ж) с короткими замыканиями

Рисунок 3.6 – Влияние типа переноса электродного металла на форму проплавления по классификации МИС [38]

Смеси аргона, кислорода и углекислого газа. Развитие сварки плавлением как одного из важнейших технологических процессов в промышленности и строительстве тесно связано с разработкой способов защиты расплавленного металла от воздуха. Новые перспективы применения способа сварки сталей в активных защитных газах открыло использование смесей аргона с окислительными газами CO_2 и O_2 . Наибольшее распространение получили смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$, $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ и $\text{Ar} + \text{O}_2$. В зависимости от класса свариваемых сталей в составе смесей газов на основе аргона может присутствовать 0,5...8 % O_2 и 3...25 % CO_2 [36].

Применение при сварке плавящимся электродом окислительных газовых смесей на основе аргона позволило устранить или уменьшить влияние многих недостатков, которые свойственны процессу сварки в чистом углекислом газе. В частности, удалось значительно снизить разбрызгивание и набрызгивание электродного металла, повысить качество формирования швов, уменьшить расход электродной проволоки [39], улучшить механические свойства швов и повысить их стойкость против зарождения и распространения хрупких разрушений [40].

Известна защитная газовая смесь, состоящая из 80% $\text{Ar} + 15\% \text{CO}_2 + 5\% \text{O}_2$, обеспечивающая высокое качество металла сварных швов и значительное уменьшение разбрызгивания при сварке со струйным переносом электродного металла.

При отсутствии струйного переноса процесс сварки в этой смеси практически не отличается от сварки в CO_2 и характеризуется интенсивным разбрызгиванием электродного металла к грубо-чешуйчатым формированием поверхности шва. Это значительно ухудшает внешний вид свариваемого изделия и как следствие сужает область применения защитных газовых смесей.

Снижение критического тока для получения струйного переноса металла достигается тем, что в предлагаемый состав смеси введен озон в количестве 0,00001...0,1%, а остальные компоненты взяты в следующем соотношении, %:

- углекислый газ 5...40;
- кислород 0,01...10;
- аргон – остальное.

Предлагаемая газовая смесь, сохраняя все положительные качества известной смеси, позволяет получить струйный перенос металла при более низком значении сварочного тока и, следовательно, выполнять швы малого сечения без разбрызгивания. Наличие в смеси озона в малых концентрациях способствует улучшению атмосферы в сварочном цехе. Кроме того, озон, придавая газовой смеси специфический приятный запах, позволяет быстро обнаруживать ее утечку.

Смесь готовят путем смешения чистых газов из баллонов (озон получают с помощью лабораторного озонатора) при этом используют сварочную проволоку марки Св-08Г2С диаметром 1,6 и 2,0 мм.

Опытные сварки показали, что применение предлагаемой смеси позволяет получить устойчивый струйный перенос электродного металла для проволоки диаметром 1,6 мм при сварочном токе 300 а, а для проволоки диаметром 2,0 мм при токе 350 А. В тех же условиях сварки в смеси $\text{Ar}+25\% \text{CO}_2+5\% \text{O}_2$ критический ток был 350 А и 400 А соответственно.

Технологические испытания предлагаемой смеси показали, что она обеспечивает хорошее формирование сварных швов на всех опробованных

режимах. При сварке на токах выше критического поверхность швов гладкая, сравнима с поверхностью швов, выполненных под флюсом. Горение дуги в этом случае мягкое, разбрызгивание полностью отсутствует.

3.4 Повышение эффективности механизированной сварки в защитных газах

Совершенствование оборудования для дуговой сварки долгое время производилось в сторону вытеснения традиционных источников питания сварочной дуги инверторными выпрямителями. Однако полного завершения этого процесса не произошло и в ближайшее время не произойдет. Сохранение доли традиционных источников питания наблюдается не только в Российской Федерации, но и в технически развитых западных странах [18]. Это происходит, несмотря на достоинства инверторных сварочных источников питания и перспективность их применения. Объяснение такого явления в своей основе содержит простоту и надежность традиционных сварочных источников питания. Во многих областях промышленности именно традиционные выпрямители еще долгое время будут обеспечивать главные показатели качества сварки, и выбор сварочного оборудования при построении технологических процессов будет падать на них. Современные инверторные источники питания ограничены по току, поэтому исходя из соображений надежности и экономичности в большинстве случаев предпочтительнее применение традиционных схемных решений.

При механизированной дуговой сварке в углекислом газе с периодическими короткими замыканиями дугового промежутка ток короткого замыкания $I_{к.з}$ можно ограничивать дросселем или резистором в цепи постоянного тока при жесткой или пологопадающей вольт-амперной характеристике сварочного источника питания, либо путем использования в сварочном выпрямителе силового трансформатора с развитым рассеянием [41, 42].

При этом форма кривой $I_{к.з}$ зависит от способа его ограничения (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 - Осциллограммы тока и напряжения при ограничении тока короткого замыкания дросселем (а), наклоном внешней характеристики сварочного выпрямителя, трансформатор которого имеет развитое рассеяние (б) и резистором (в)

Способы ограничения $I_{к.з}$ при сварке в углекислом газе в нижнем положении описаны в работе [43]. При сварке в углекислом газе вертикальных и потолочных швов различие в способах ограничения $I_{к.з}$ особенно заметно. Установлено, что чем меньше амплитудное значение $I_{к.з}$, тем меньше разбрызгивание металла. При сварке в нижнем положении минимальная амплитуда $I_{к.з}$ ограничивается только условием устойчивости процесса [44].

При сварке в вертикальном и потолочном положениях значение $I_{к.з}$ выбирают исходя прежде всего из условия переноса металла и формирования шва. Чем выше амплитудное значение $I_{к.з}$ (до определенного предела), тем больший импульс по направлению к изделию получают капля электродного металла и ванна, что способствует удержанию их на вертикальной и потолочной поверхностях. Обнаруживается явное противоречие между требованиями уменьшения разбрызгивания (минимальный $I_{к.з}$) и обеспечения формирования вертикального и потолочного швов (максимальный $I_{к.з}$).

Сварщики часто пренебрегают разбрызгиванием и работают при больших амплитудных значениях $I_{к.з}$. В этом случае, как показала практика, лучших результатов достигают при способе инер-ционного ограничения $I_{к.з}$. В случае безынерционного ограничения тока балластным реостатом размер капель увеличивается, что затрудняет их перенос в ванну и формирование шва.

Капли, как правило, смещаются на боковую поверхность электрода, поскольку при их первоначальном соприкосновении с ванной, когда площадь контакта меньше сечения шейки между электродом и каплей, электродинамическая сила направлена от ванны к электроду и препятствует переносу капли. Основная их масса отталкивается от ванны, однако не теряет связи с электродом и, пополняясь новыми порциями жидкого металла, увеличивается в размерах. Последующие соприкосновения сопровождаются такими же явлениями, пока капля, приведенная толчками электродинамической силы в интенсивное колебательное движение, не

оторвется от электрода и улетит в сторону либо не столкнется с ванной большей частью своей поверхности и поглотится последней, что при сварке вертикальных швов бывает реже.

В нижнем положении образование большой капли не отражается на формировании шва, поскольку гравитационная сила способствует ее продвижению на торец электрода и в большинстве случаев – в ванну. Для уменьшения электродинамической силы, отталкивающей каплю от ванны в первый момент их соприкосновения, необходимо снизить $I_{к.з}$. Однако значение $I_{к.з}$ должно быть достаточным для создания соответствующего импульса, прижимающего после этого каплю к ванне. Указанные требования не удовлетворяются при ограничении $I_{к.з}$ балластным реостатом.

Для поисков оптимальных решений в 1985 г. сотрудники ИЭС им. Е. О. Патона и Томского политехнического института провели эксперименты с использованием тиристорного ключа [45] и предложили способ сварки с короткими замыканиями дугового промежутка, суть которого заключается в управлении током в переходных процессах, вызванных переносом металла (рис. 3.8).

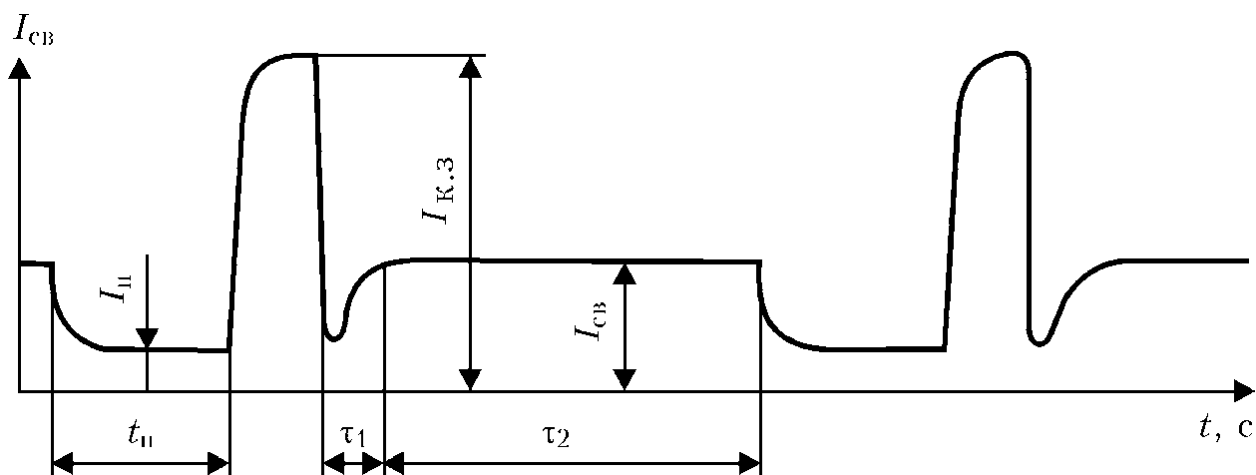


Рисунок 3.8 - Осциллограмма тока при сварке с короткими замыканиями с использованием тиристорного ключа; τ_1 – длительность паузы в протекании сварочного тока к моменту разрыва перемычки; τ_2 – длительность плавления электрода; $t_{п}$ – длительность паузы перед коротким замыканием

При сварке от источника питания постоянного тока, содержащего в сварочной цепи дроссель, перед коротким замыканием дугового промежутка производят кратковременное снижение тока на период $t_{\text{п}}$. В момент начала короткого замыкания дроссель шунтируют резистором, что приводит к резкому росту тока от минимального до пикового значения. Резкое повышение тока короткого замыкания способствует увеличению электродинамической силы, направленной от электрода к сварочной ванне и стремящейся ускорить переход электродного металла в сварочную ванну за счет действия сил пинч-эффекта по линии расплавления электрода. Это вызывает сокращение длительности короткого замыкания от $(4...5) \cdot 10^{-3}$ с (средняя длительность короткого замыкания при наличии в сварочной цепи дросселя) до $(1,5...2,0) \cdot 10^{-3}$ с.

Рассмотренный способ дуговой сварки получил развитие в середине 1990-х гг. в разработанном компанией «Lincoln Electric» процессе STT (Surface Tension Transfer) для сварки корневых швов [46].

Процесс STT – преемник обычного процесса механизированной сварки в защитном газе, реализующего перенос металла посредством коротких замыканий дугового промежутка. Однако STT принципиально отличается от него возможностью прямого управления условиями переноса электродного металла в сварочную ванну, что обеспечивается за счет быстродействующей инверторной схемы источника питания, специального электронного микропроцессорного модуля, принудительно задающего необходимый уровень сварочного тока, а также контура обратной связи, динамично отслеживающего изменения напряжения на дуге. В течение всего цикла переноса капли в сварочную ванну значения сварочного тока жестко зависят от фазы формирования капли и последующего ее перехода в ванну. Идентификация фазы переноса осуществляется путем обработки уровня напряжения, постоянно снимаемого с дугового промежутка.

Компанией «Lincoln Electric» специально для этого процесса разработан 225-амперный инверторный источник питания Invertec STT II

[46], реализующий технологию управления формой сварочного тока. Invertec STT II отличается от обычных сварочных источников, поскольку не является источником ни с жесткой, ни с крутопадающей характеристикой. Аппарат имеет обратную связь, отслеживающую основные этапы переноса капли и мгновенно реагирующую на процессы, происходящие между электродом и сварочной ванной, изменяя значение и форму сварочного тока.

Следует отметить, что оборудование для ведения процесса STT относится к довольно дорогостоящему, для которого требуется создание соответствующих условий эксплуатации.

Ускорение переноса капли в ванну путем принудительного выключения тока в цепи на первой и последней фазах короткого замыкания позволяет повысить производительность процесса. Однако практическое применение ключевых элементов в установках для механизированной сварки пока затруднено из-за сложности устройств и высокой стоимости основных элементов схемы. Поэтому более предпочтительными следует считать сравнительно недорогие устройства, например сварочные дроссели, которыми комплектуются серийные выпрямители для механизированной сварки и наплавки.

При сварке в углекислом газе с короткими замыканиями разбрызгивание металла в некоторой степени зависит от напряжения дуги, поскольку размер капли и энергия взрыва перемычки пропорциональны длине дугового промежутка [47]. Поэтому естественное в этом случае стремление вести сварку на режимах с малым напряжением дуги не всегда технологически оправдано. Как показали наблюдения, при ограничении тока короткого замыкания дросселем запасенная в нем на растущем участке переходного процесса электромагнитная энергия после разрыва перемычки обуславливает резкое увеличение дугового промежутка за счет интенсивного плавления электрода, что видно на типичных осциллограммах напряжения дуги.

На рис. 3.9 дана схема предлагаемого высокочастотного импульсного источника питания для дуговой сварки. Высокочастотный импульсный источник питания для дуговой сварки содержит трехфазный трансформатор 1, первичная обмотка которого соединена с сетью, а ко вторичной обмотке подключен выпрямитель 2, на выход которого включен импульсный стабилизатор тока 3 и один конец резистора 4, выход импульсного стабилизатора тока через диод 5 соединен с конденсатором 6, который подсоединен к входу модулятора 7 и второму выводу резистора 4, выход модулятора через диод 8 соединен с выходами 9 и 10 высокочастотного импульсного источника питания, параллельно которому подключен блок дежурной дуги 11.

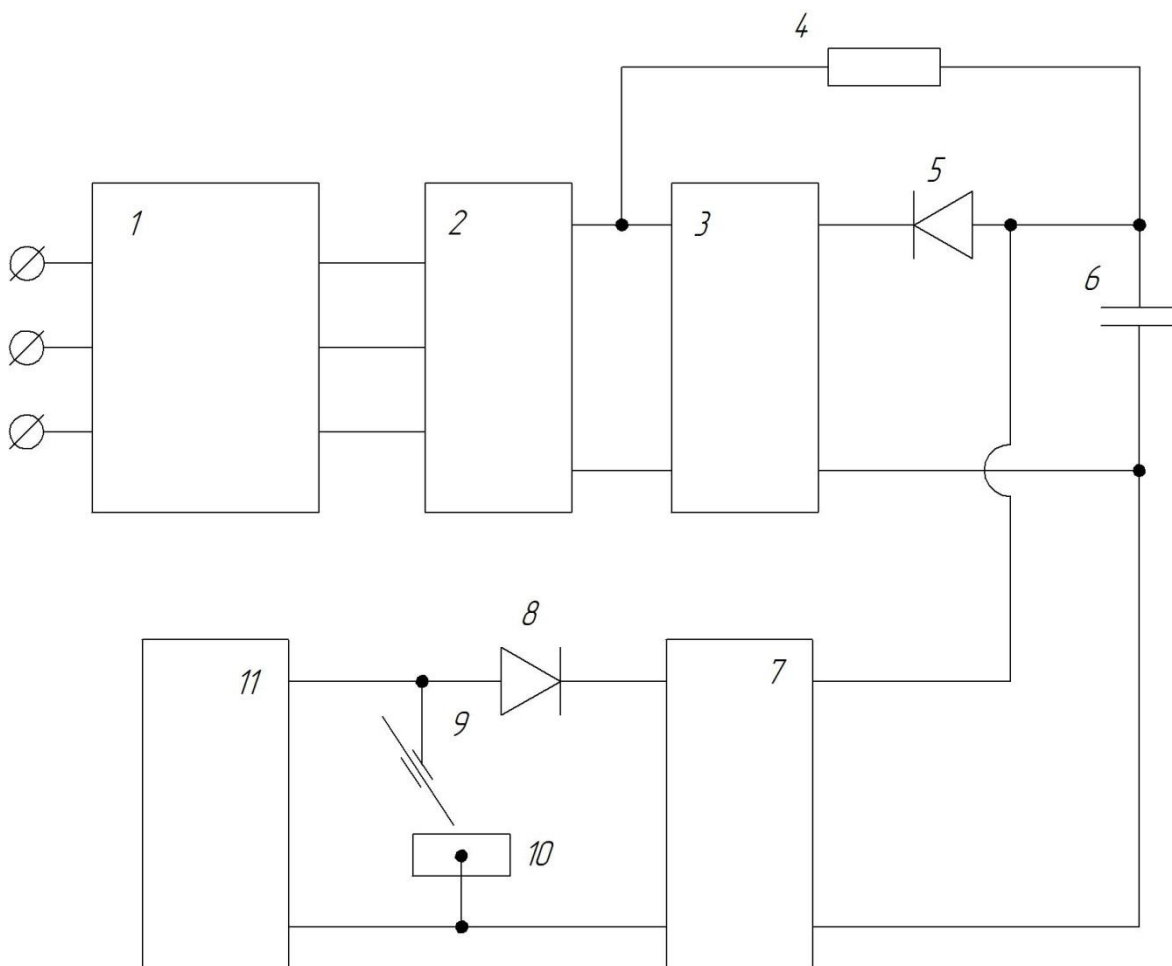
Высокочастотный импульсный источник питания для дуговой сварки работает следующим образом. Первоначально на выходы 9 и 10 с блока дежурной дуги подается небольшой ток, достаточный для возбуждения и поддержания горения электрической дуги. Напряжение от сети трансформируется через вторичную обмотку трансформатора 1 на выпрямитель 2, выпрямленное напряжение подается на импульсный стабилизатор тока 3 и одновременно через резистор 4 заряжает конденсатор 6.

На выходе импульсного стабилизатора тока устанавливается напряжение меньшее, чем на конденсаторе. Конденсатор остается заряженным до момента включения модулятора 7. При включении модулятора конденсатор 6 через диод 8 подключается к дуговому промежутку и начинает разряжаться, формируя высокопроводящий, высокотемпературный столб электрической дуги. Время разряда несколько микросекунд. Затем, по мере сравнения напряжения на выходе импульсного стабилизатора тока и конденсатора, открывается диод 5 и дуговой промежуток начинает питаться от импульсного стабилизатора тока.

Ток течет по подготовленному разрядом конденсатора каналу. На выходе формируется пространственно устойчивая электрическая дуга. Далее

процессы повторяются. Время включения модулятора определяет частоту и скважность импульсов.

Дуга первоначально питается от мгновенного источника напряжения - конденсатора, а затем от источника тока - импульсного стабилизатора тока. Конденсатор обеспечивает пространственную устойчивость дуги, а импульсный стабилизатор тока обеспечивает устойчивость горения и стабильность проплавления. Таким образом, предлагаемое устройство позволяет повысить мощность дуги и увеличить скорость сварки почти в 2 раза. Кроме того, повышается качество сварного соединения за счет повышения проплавленной устойчивости дуги и стабильности проплавления.



1 - трансформатор, 2 - выпрямитель, 3 - импульсный стабилизатор тока, 4 - резистор, 5 - диод, 6 - конденсатор, 7 - модулятор, 8 - диод, 9 - горелка, 10 - изделие, 11 - блок дежурной дуги

Рисунок 3.9 – Устройство импульсной сварки

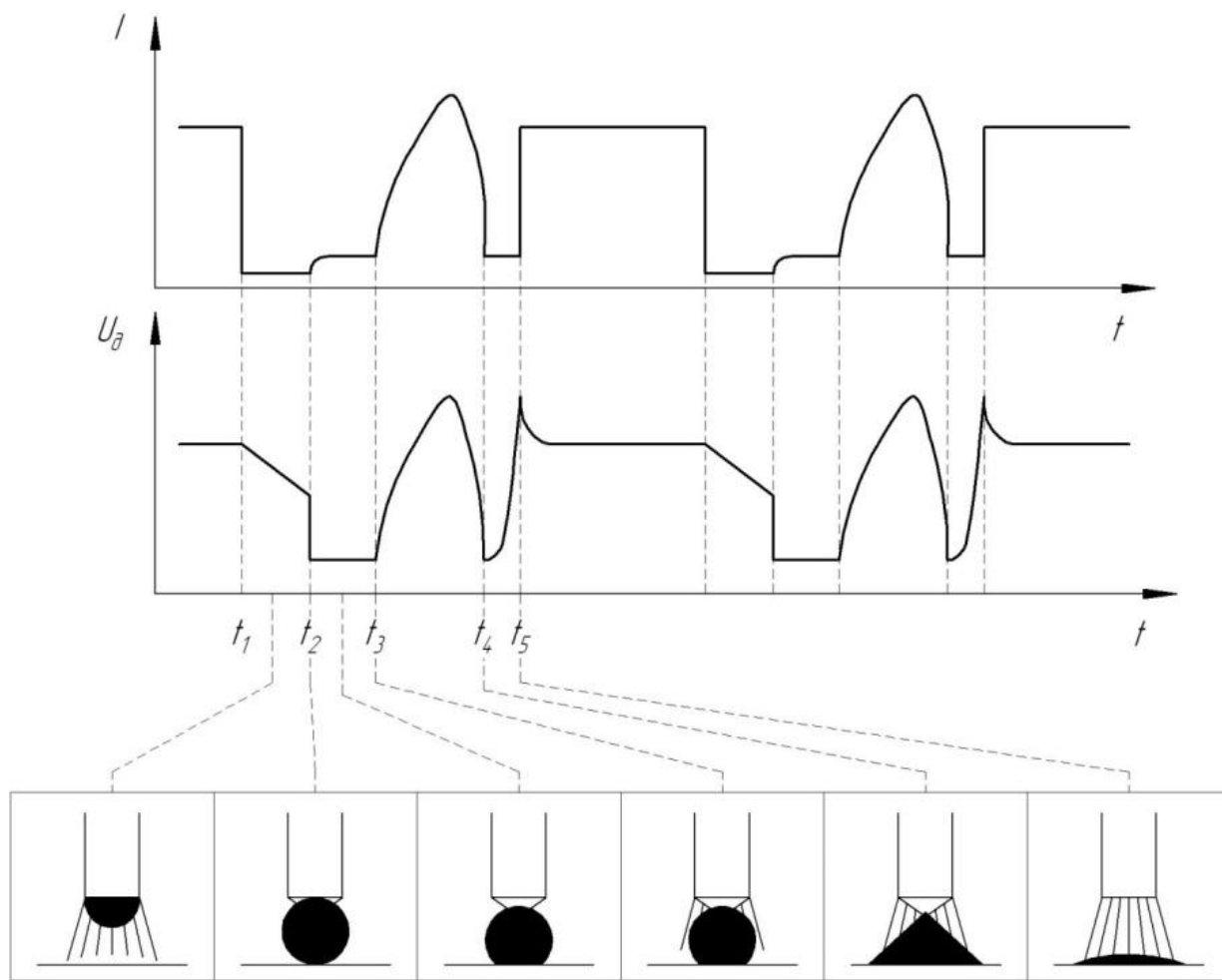


Рисунок 3.10 – Диаграммы тока и напряжения при сварке

Сварка с применением предлагаемого способа позволяет получить мелкокапельный перенос электродного металла при малых его потерях на угар и разбрызгивание; снижение выгорания легирующих элементов и окисления электродного металла вследствие уменьшения времени пребывания расплавленной капли металла в зоне дуги; повышение стабильности процесса сварки и устойчивости горения дуги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании поставлена цель - повышение производительности и качества сварочных работ при строительстве и ремонте технологических трубопроводов на предприятиях нефтехимии.

Рассмотрены особенности эксплуатации и обнаружения дефектов в конструкциях нефтегазового сектора. Выполнено описание объекта и вводные данные по необходимому ремонту оборудования. Проведён анализ технологических свойств и свариваемости материалов для изготовления технологических трубопроводов.

При анализе современных электродных материалов и способов электродуговой сварки плавлением рассмотрены: 1) ручная дуговая сварка штучными электродами; 2) механизированная сварка в защитных газах проволоками сплошного сечения; 3) механизированная сварка порошковыми проволоками.

Рассмотрены варианты сварочных технологий с применением ручной дуговой сварки штучными электродами, механизированной сварки самозащитными проволоками и механизированной сварки в защитных газах проволоками сплошного сечения.

Анализ статистических данных позволил произвести оценку выявляемости дефектов при применении различных методик контроля качества сварных соединений. Установлено, что такие дефекты как непровар и поры являются самыми трудновыявляемыми. Анализ статистических данных позволил произвести оценку влияния дефектов на характер и частоту разрушения магистральных трубопроводов. Установлено, что как раз поры и непровары вносят наибольший вклад в отрицательную статистику по авариям на магистральных трубопроводах.

В диссертации работе предложены принципы построения аппаратуры для проведения автоматического ультразвукового контроля качества сварки стыков трубопроводов.

Предложена газовая смесь, состоящая из углекислого газа, аргона, кислорода и озона, использование которой позволяет существенно повысить стабильность горения дуги и уменьшить разбрызгивание электродного металла.

На основании анализа способов повышения эффективности механизированной сварки в защитных газах проволоками сплошного сечения предложен способ управления сварочной дугой. Сварка с применением предлагаемого способа позволяет получить мелкокапельный перенос электродного металла при малых его потерях на угар и разбрызгивание; снижение выгорания легирующих элементов и окисления электродного металла вследствие уменьшения времени пребывания расплавленной капли металла в зоне дуги; повышение стабильности процесса сварки и устойчивости горения дуги.

На основании вышеизложенного можно утверждать, что поставленная цель достигнута.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Олейник, О.И. Разработка технологии механизированной дуговой сварки при ремонте магистрального газопровода под давлением / О.И. Олейник, С.Ю. Максимов, А.П. Пальцевич, Е.И. Гончаренко // Автоматическая сварка. – 2016. – № 3. – С. 49–56.
2. ГОСТ 2246–70. Проволока стальная сварочная. Технические условия. – Введ. 01.01.1973. – ФГУП «Стандартинформ», 2008. – 19 с.
3. AWS A5.18: Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding // American Welding Soc., Miami, 2005.
4. AWS A5.28: Specification for Low-Alloy Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding // Ibid.
5. ГОСТ 26271–84. Проволока порошковая для дуговой сварки углеродистых и низколегированных сталей. Общие технические условия. – Введ. 01.01.1987. – М.: Госстандарт СССР, 1987. – 19 с.
6. AWS A5.36. Specification for carbon and low-alloy steel flux cored electrodes for flux cored arc welding and metal cored electrodes for gas metal arc welding // American Welding Soc., Miami, 2012.
7. Підгаєцький, В.В. Пори, включення і тріщини в зварних швах / В. В. Підгаєцький. – Київ: Техніка, 1970. – 236 с.
8. Походня, И. К. Металлургия дуговой сварки. Взаимодействие металла с газами / И.К. Походня, И.Р. Явдошин, А.П. Пальцевич [и др.] – Киев: Наук. думка, 2004. – 442 с.
9. Новожилов Н.М. Основы металлургии дуговой сварки в газах / Н. М. Новожилов. – М.: Машиностроение, 1979. – 230 с.
10. Походня, И.К. Сварка порошковой проволокой / И. К. Походня, А. М. Суптель, В. Н. Шлепаков. – Киев: Наукова думка, 1972. – 223 с.
11. Справочник по сварке. Всепоозиционные порошковые проволоки для нелегированных и низколегированных сталей – ESAB. – 32 с.

12. Семенов, С.Е. Оценка состояния металла сварных труб длительно эксплуатируемых газопроводов / С.Е. Семенов, А.А. Рыбаков, Л.В. Гончаренко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2003. – № 4. – С. 3–7.

13. Патон, Б.Е. О старении и оценке состояния металла эксплуатируемых магистральных трубопроводов / Б.Е. Патон, С.Е. Семенов, А.А. Рыбаков [и др.] // Автоматическая сварка. – 2000. – № 7. – С. 3–12.

14. Семенов, С.Е. Экспериментальная оценка состояния металла длительно работающих сварных нефтепроводов / С.Е. Семенов, А.А. Рыбаков, В.И. Кирьян [и др.] // Автоматическая сварка. – 2001. – № 5. – С. 18–22.

15. Лейкин, И.М. Производство и свойства низколегированных сталей / И.М. Лейкин, Д.А. Литвиненко, А.В. Рудченко. – М.: Металлургия, 1972. – 255 с.

16. Гиренко, В.С. Деформационное старение трубных сталей / В.С. Гиренко, С.Е. Семенов, Л.В. Гончаренко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2001. – № 3. – С. 32–35.

17. Патон, Б.Е. Требования к вязкости стали для магистральных газопроводов при постановке в них гасителей протяженных разрушений / Б.Е. Патон, В.И. Труфяков, В.И. Кирьян // Автоматическая сварка. – 1982. – № 12. – С. 5–7.

18. Шлепаков, В.Н. Современные электродные материалы и способы электродуговой сварки плавлением / В.Н. Шлепаков // Автоматическая сварка. – 2011. – № 1. – С. 31–35.

19. Шлепаков, В.Н. Влияние состава сердечника порошковой проволоки и защитного газа на стабильность процесса дуговой сварки / В.Н. Шлепаков, А.С. Котельчук, С.М. Науменко, А.В. Билинец // Автоматическая сварка. – 2005. – № 6. – С. 18–22.

20. Дятлов, В.И. Элементы теории переноса электродного металла при электродуговой сварке / В. И. Дятлов // Новые проблемы сварочной техники. – Киев: Техника, 1964. – С. 167-182.

21. Билинец, А.В. Порошковые проволоки с металлическим сердечником для механизированной сварки в среде защитных газов / А. В. Билинец // Междунар. конф. по сварочным материалам стран СНГ «Сварочные материалы. Разработка. Технология. Производство. Качество», г. Днепропетровск, 1–4 июля 2004 г.: Сб. докл. – Днепропетровск, 2004. – С. 135-139.

22. Blakeley, P. J. A new approach to arc weld monitoring / P. J. Blakeley, B. Hass // Welding Rev. Intern. – 1991. – August. – P. 157–160.

23. Rehfeldt D., Schmitz Th., Behrens S. M. Report on the use of quality monitoring systems. – S. 1., [1995]. – 27 p. – (Intern. Inst, of Welding; IW-Doc. XII-1420-95).

24. Шлепаков, В.Н. Идентификация состава порошковых проволок по электрическим сигналам дуговой сварки / В.Н. Шлепаков, А.С. Котельчук, С.А. Супрун // Автоматическая сварка. – 1999. – № 8. – С. 37–42.

25. Троицкий, В.А. Ультразвуковая диагностика эксплуатационных дефектов в конструкциях нефтегазового комплекса / В.А. Троицкий, В.П. Дядин, Е.А. Давыдов // Автоматическая сварка. – 2010. – № 9. – С. 45–50.

26. Гельд, П. В. Водород в металлах и сплавах / П. В. Гельд, Р. А. Рябов. – М.: Металлургия, 1974. – 273 с.

27. Арчаков, Ю. И. Современные проблемы водородной коррозии сталей и надежность эксплуатации оборудования гидрогенизационных процессов / Ю. И. Арчаков // Водородная обработка материалов: Тез. докл. – Донецк, 2001. – С. 482-491.

28. Стасюк, С. З. Об эксплуатации сварных соединений технологических трубопроводов и змеевиков печей нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств / С. З. Стасюк // Материалы и механизмы морского транспорта. Методы исследования и упрочнения. Технология производства: Тез. докл. – Севастополь, 2008. – С. 109-116.

29. Патон, Б.Е. О старении и оценке состояния металла эксплуатируемых магистральных трубопроводов / Б.Е. Патон, С.Е. Семенов, А.А. Рыбаков [и др.] // Автоматическая сварка. – 2000. – № 7. – С. 3–12.
30. Макаров, Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей / Э. Л. Макаров. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.
31. Шоршоров, М. Х. Испытания металлов на свариваемость / М. Х. Шоршоров, Т. А. Чернышева, А. И. Красовский. – М.: Металлургия, 1972. – 240 с.
32. Стасюк, С. З. Работоспособность хромомолибденовых сталей в конструкции печных змеевиков трубчатой печи установки каталитического риформинга и гидроочистки / С. З. Стасюк // Металл и литьё Украины. – 2009. – № 11–12. – С. 29–33.
33. Костин, В.А. Математическое описание углеродного эквивалента как критерия оценки свариваемости сталей / В.А. Костин // Автоматическая сварка. – 2012. – № 8. – С. 12–17.
34. ГОСТ 19281-79. Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия
35. А.с. 1530369 СССР. Устройство для дуговой сварки плавящимся электродом.
36. А. с. 448106 СССР, МКИ В 23 К 35/38. Защитная газовая смесь / Б.Е. Патон, А.В. Кирсанов, В.В. Подгаецкий и др. – Приор. 26.06.72. Опубл. 30.10.74; Бюл. № 40.
37. Косииси Ф. Перспективные сварочные материалы / Ф. Косииси // Журнал японского сварочного общества. – 2007. – 76, № 1. – С. 61–64.
38. Stenbacka, N. Shielding gases for gas metal arc welding / N. Stenbacka, K.-A. Persson // Welding Journal. – 1989. – № 11. – P. 41–47.
39. Свецинский, В.Г. Сварка сталей в защитных газовых смесях на основе аргона в промышленности Украины / В.Г. Свецинский, С.Т. Римский, В.И. Галинич // Автоматическая сварка. – 1994. – № 4. – С. 41–44.

40. Свещинский, В.Г. Оценка вязкости разрушения швов, сваренных в защитных газах и под флюсом / В.Г. Свещинский, С.Т. Римский, В.И. Кирьян // Автоматическая сварка. – 1982. – № 8. – С. 16–19.

41. Заруба, И. И. Особенности применяемых способов ограничения тока короткого замыкания при сварке в углекислом газе / И.И. Заруба, В.В. Андреев // Автоматическая сварка. – 1978. – № 1. – С. 16–19.

42. Заруба, И. И. Влияние метода ограничения тока короткого замыкания на формирование вертикальных и потолочных швов при сварке в углекислом газе / И. И. Заруба, В. П. Баргамен, В. В. Андреев, М. Н. Сидоренко // Автоматическая сварка. – 1973. – № 4. – С. 64–67.

43. Заруба, И. И. Механизм разбрызгивания металла при дуговой сварке / И. И. Заруба // Автоматическая сварка. – 1970. – № 11. – С. 12–16.

44. Заруба, И. И. Условие устойчивости процесса сварки с короткими замыканиями / И. И. Заруба // Автоматическая сварка. – 1971. – № 2. – С. 1–4.

45. А. с. 1310140 СССР, МКИ В 23 К 9/00. Способ дуговой сварки с короткими замыканиями дугового промежутка и устройство для его осуществления / И. И. Заруба, Ю. Н. Сараев, А. Ф. Князьков, А. К. Тимошенко. – Оpubл. 15.05.87; Бюл. № 18.

46. Иоффе, Ю. Е. Новые высокотехнологичные системы полуавтоматической сварки компании «Линкольн Электрик» / Ю. Е. Иоффе, Ф. В. Квасов // Сварочное производство. – 1997. – № 4. – С. 40–43.

47. Заруба, И. И. Электрический взрыв как причина разбрызгивания металла / И. И. Заруба // Автоматическая сварка. – 1970. – № 3. – С. 14–18.