

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

ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

(наименование института полностью)

«Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование кафедры полностью)

22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки, специальности)

«Сварка и пайка новых металлических и неметаллических неорганических
материалов»

(направленность, (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Технология и оборудование для сварки разнородных сталей

Студент	<u>А.Ю. Барсуков</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Научный руководитель	<u>К.В. Моторин</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультант	<u>В.Г. Виткалов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., профессор А.И. Ковтунов
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) _____ (личная подпись)
« _____ » _____ 2018 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., проф. Ельцов В.В.
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) _____ (личная подпись)
« _____ » _____ 2018 г.

Тольятти 2018

Содержание

Введение	3
1 Анализ известных способов сварки трубопроводов из разнородных сталей	6
1.1 Виды теплоустойчивых сталей	6
1.2 Сравнительные характеристики перспективных сталей	10
1.3 Особенности сварки теплоустойчивых сталей	19
1.4 Особенности процесса сварки аустенитных сталей	24
1.5 Особенности процесса сварки разнородных сталей	26
1.6 Анализ способов сварки трубопроводов из разнородных сталей	32
1.8 Задачи работы	43
2 Проведение экспериментов	45
3 Карта технологического процесса сварки	63
Список использованных источников	71

Введение

Улучшение работающих и разработка новых агрегатов, постоянное улучшение экономичности используемых агрегатов, появление новых видов технологических процессов изготовления продукции определяют необходимость работы современного оборудования в агрессивных средах, при высоких температурах и в других специфических условиях. Необходимо при этом сваривать стали, с разными физико-техническими свойствами, и обеспечить высокое качество сварного соединения. Несмотря на трудности, возникающие при сварке разнородных сталей, данные стали находят все большее применение. В современных агрегатах применяются поверхности нагрева из разнородных сталей (теплоустойчивой с аустенитной). Применение разнородных сталей обусловлено тем, что внутри агрегата температура поверхностей нагрева труб достигает 700-750°C, а с наружи она значительно ниже. В этом случае конструкцию изготавливают из аустенитного металла, а выходные коллекторы изготавливаются из теплоустойчивых сталей, несмотря на то, что сварка разнородных сталей представляет определенные сложности. Мартенситные стали очень широко применяются для изготовления технологических трубопроводов и корпусных узлов нефтехимического и химического оборудования, работающего в условиях воздействия высоких температур и агрессивных сред.

На ПАО «КуйбышевАзот» работают два вида агрегатов по производству аммиака в которых применяют коллектора из разнородных сталей. Коллектора внутри печи реформинга изготовлены из аустенитных сталей (M11 – 12X18H10T), а снаружи коллектора изготовлены из низколегированных теплоустойчивых хромомолибденованадиевых сталей перлитного класса (M02 – 12X1MФ) и легированных сталей мартенситного класса с содержанием хрома до 10% (M05).

На чешском агрегате по производству аммиака «М-70» в печи реформинга используют разнородные стали 08X18H12Б и 12X1MФ.

На немецком агрегате фирмы «Linde» используют разнородные стали Р91 и 12Х18Н10Т. Улучшенные механические свойства стали Р91 (аналог 10Х9М1Ф) позволяют уменьшить толщину рабочей стенки трубопровода, это приводит к снижению температурного градиента в стенках труб что приводит к понижению тепловой усталости. Например, при замене стали Р22 (аналог стали 12ХМ) на сталь Р91 позволяет уменьшать толщину стенки трубопровода на 50% и вес агрегата на 60%.

При ремонтах и монтаже применяют ручную дуговую сварку покрытыми электродами. Сварка разнородных сталей на агрегатах аммиака осуществляется с применением специальной переходной вставки. Соединение данным методом получило название «Келкаллой». На сточенный конус вставки из менее легированной стали производят наплавку высоколегированного металла. Затем в монтажных условиях выполняют соединения однородных сталей [1].

При сварке сталей Р91 и 12Х18Н10Т необходимо применять несколько катушек Р91-Р22-Р11-12Х18Н10Т. Данное условие необходимо для получения плавного изменения химического состава от одного свариваемого металла к другому. При резком изменении химического состава в соединениях разнородных металлов в стали Р91 возникают трещины в зоне термического влияния и основного металла. Резкие изменения химического состава создают высокие напряжения в районе шва, образующие условия для образования трещин. Трещины могут появиться на относительно ранней стадии эксплуатации 20,0 – 30,0 тыс. часов при относительно низких температурах ниже 600°С при этом они зарождаются и растут внутри основного металла, а затем раскрываются на поверхности.

При применении катушек возникают трудности при остановках агрегата на аварийные и плановые ремонты, в связи с ограниченным временем, выделенным на проведение ремонта. Следует учитывать, что каждый сварной шов является источником дополнительных сварочных напряжений и возможными пропусками.

В настоящее время ведется разработка технологии сварки для сварки сталей 12Х18Н10Т и Р91 без переходных вставок.

Трубопроводы из разнородных сталей свариваются с применением переходных электродов, это не всегда дает хорошее качество и при многократных переменных нагрузках приводит к появлению трещин и аварийным остановкам агрегатов.

Поэтому целью работы является обеспечить качественную сварку трубопровода из разнородных сталей.

1 Анализ известных способов сварки трубопроводов из теплоустойчивых сталей

При сварке различных типов стали применяют разные режимы сварки, используют определенные сварочные материалы и способы сварки. Параметры процесса сварки зависят от состава стали, содержания легирующих элементов, свариваемости металла и т.п.

Строгое соблюдение технологии сварки требуют теплоустойчивые стали, при их сварке требуются предварительный и сопутствующий подогрев и последующая термообработка. При сварке теплоустойчивых сталей учитывают способность этих сталей, длительно работать без потери прочностных характеристик при повышенных температурах, вплоть до 600°C.

1.1 Виды теплоустойчивых сталей

Теплоустойчивые стали подразделяются на несколько групп, это зависит от наличия в стали хрома, ванадия, молибдена и других легирующих элементов. Основными группами являются:

низколегированные хромомолибденовые – их рабочая температура может достигать 550°C.

хромомолибденованадиевые стали – допускается температура до 600°C.

Теплоустойчивые стали применяются для изготовления агрегатов, работающих при повышенных температурах до 650°C и рабочим давлением 20-30 кгс/см². Рабочие параметры в аммиачных агрегатах составляют 580°C при рабочем давлении 25,5 кгс/см², в новых агрегатах рабочие параметры достигают 650°C и 31,5 кгс/см² (таблица 1.1).

Комплектующие таких агрегатов работают длительное время (до 100 000-150 000 часов), следовательно, при изготовлении необходимо

обеспечить длительную прочность и сопротивление ползучести при высоких температурах и давлении на весь период работы.

При рабочей температуре ниже 300-350°C явления ползучести не наблюдаются, поэтому экономически целесообразнее вместо теплоустойчивых сталей при данных параметрах использовать конструкционные стали. Такие стали выдерживают высокие давления при повышенной температуре до трехсот градусов. При сварке теплоустойчивых сталей необходимо строго соблюдать технологию сварки и термообработки для сохранения прочности и сопротивления ползучести основного материала.

Эти свойства зависят от содержания в основном металле хрома, вольфрама, ванадия и молибдена.

В процентном соотношении их доля составляет:

хром – от 0,5 процента и не более 2 процентов;

молибден – его доля не должна превышать диапазона 0,2-1 процента;

ванадия должно быть меньше всего – не более 0,1-0,3 процента.

Содержание легирующих элементов кроме хрома не превышает 1 %. Содержание углерода находится в пределах 0,08-0,2 %. При содержании углерода более 0,2%, процессы перераспределения легирующих элементов хрома, ванадия и молибдена между твердым раствором и карбидами ускоряются. Ниобий и ванадий снижают скорость диффузионных процессов перераспределения. Предварительная термообработка основного металла обеспечивает высокие механические свойства. Теплоустойчивые стали подвергают закалке и высокотемпературному отпуску, а также нормализации. Большинство исследователей считают, что в хромомолибденованадиевых сталях содержание ванадия должно определяться содержанием углерода (с тем, чтобы он весь был связан в карбиды); оптимальным является отношение $V/C=3-M$. Это исключает участие Mo в карбидообразовании и обеспечивает присутствие его в твердом растворе [1]. При высоком содержании ванадия происходит снижение

атомных связей. Присутствие хрома до 5% увеличивает стойкость к окислению.

Основные марки теплоустойчивых сталей: перлитного класса 12ХМ, 12Х1МФ; мартенситного класса 15Х5, 15Х5М [1].

Низколегированные теплоустойчивые стали характеризуются высокой прочностью и сопротивлению ползучести. Прочность при высоких температурах, кроме обычных характеристик (временное сопротивление, предел текучести и др.), оценивается особыми критериями механической прочности в нагретом состоянии. В большинстве случаев жаропрочность определяется величиной предела ползучести и длительной прочностью [1].

Низколегированные теплоустойчивые стали обладают некоторыми особенностями, которые влияют на условия проведения их термической обработки - это низкая теплопроводность и снижение сопротивления деформации и разрушению по границам зерен при температуре - 650°C. Быстрое прохождение температуры 650°C при охлаждении и нагреве приводит к улучшению свойств на границах зерен.

Низколегированные теплоустойчивые стали обладают повышенной прочностью при высоких температурах эксплуатации. Вольфрам и в особенности молибден повышают жаропрочность. Хром повышает жаростойкость и окалиностойкость образуя защитную пленку на основном металле.

В основном низколегированные теплоустойчивые стали используют в термически обработанном состоянии: после закалки с отпуском и нормализации с высоким отпуском. Мелкозернистое строение металла обеспечивается термообработкой. Цель термообработки — получают стабильную структуру, неменяющуюся при эксплуатации при повышенных температурах и давлении.

При сварке структура стали ухудшается. При нагреве выше температуры 900°C в ЗТВ наблюдается рост зерна, при нагреве ниже температуры 700°C карбиды укрупняются и снижается прочность стали.

Таблица 1.1 - Рекомендации по применению стали

Марки стали		Применение	Рабочая температура °С	Срок службы		Температура окалинообразования, °С
Новое обозначение	Старое обозначение					
12МХ	-	Трубы пароперегревателей, трубопроводов и коллекторных установок	510	Весьма длительной		570
12Х1МФ	12ХМФ	То же	570-585	То же		600
15Х5М	Х5М	Для корпусов и внутренних элементов аппаратуры и нефтеперерабатывающих заводов	600	Весьма длительной		650

Примечание. Длительный срок службы - от 1000 до 10000 ч. Весьма длительный срок службы - более 10000 ч [1].

Основное применение находят стали такие как хромомолибденованадиевые стали, например, сталь 12Х1МФ. Сталь 12Х1МФ применяется в отожженном состоянии, а также после нормализации и высокого отпуска (рисунок 1.2). Данные стали после закалки или нормализации обязательно подвергаются высокому отпуску (например, сталь 12Х1МФ при 730-750°С, 2 ч), после термообработки в структуре стали образуются специальные карбиды.

При отпуске остаточный аустенит распадается, происходит рекристаллизация феррита и укрупнение карбидов. Карбиды цементитного типа образуются при температуре до 600°С, карбиды ванадия в высокодисперсном состоянии образуются при температуре 600-700°С. При повышении температуры отпуска карбиды цементитного типа растворяются. Карбиды распределяются равномерно при проведении нормализации (рисунок 1.1).



а — закалка в воду; б — закалка в масло; в — охлаждение с печью

Рисунок 1.1 - Структура стали 12Х1МФ — после различных режимов термической обработки, ×800

1.2 Сравнительные характеристики перспективных сталей.

При изготовлении агрегатов за рубежом для корпусов реакторов с повышенной температурой и давлением применялись простые по составу стали, которые широко используются в теплоэнергетике. Данные стали

имеют сравнительно низкую прочность, но имеют хорошую технологичность и хорошую свариваемость.

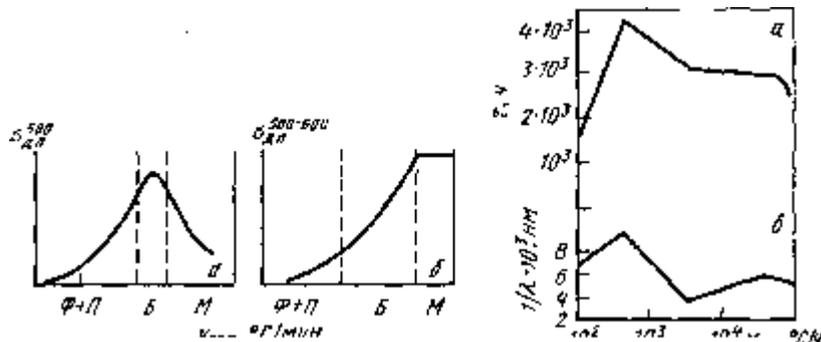


Рисунок 1.2 - Влияние скорости охлаждения

В середине прошлого столетия для корпусов агрегатов в Европе использовались стали легированные небольшим содержанием марганца и кремния с содержанием углерода 0,30-0,35%. Стали начали дополнительно легировать молибденом для увеличения предела прочности и ударной вязкости основного металла. Данные стали применяют при производстве корпусов агрегатов из-за их высоких механических свойств и низкой стоимости. При дополнительном легировании хромом и никелем получили сталь с более высокими характеристиками. Эта сталь получила обозначение SA533 и применяется для изготовления корпусов реакторов, работающих под высоким давлением. В Европе распространение получила сталь 22NiMoCr37. Листы, изготовленные из данной, стали с различным уровнем прочности поставляются после нормализации и высокого отпуска.

Такие марки зарубежных сталей последнее время широко используются в России в химической промышленности в трубопроводах, работающих при высоких температурах.

Особое место занимает сталь P91, высокохромистые мартенситные стали рассматриваются как чудо стали для применения при высоких температурах.

За счет использования стали P91 вместо 12X1MФ при создании агрегатов с повышенным коэффициентом полезного действия до 45% экономический эффект составляет около 15%.

По сравнению с обычными перлитными сталями марок 12X1MФ и 15X1M1Ф сталь P91 имеет улучшенные механические характеристики, что приводит к увеличению срока службы при этом снижается металлоемкость конструкций примерно на 30%, работающих при рабочих температурах 540-565°C за счет уменьшения толщины стенок трубных элементов. Температура применения сталей 12X1MФ и 15X1M1Ф равна 575°C.

Рабочая температура сталей типа P91 увеличена до температуры 590°C. 9% хромомолибденовые стали (9Cr-1Mo) применяются в США с 1980 года при изготовлении котлов, работающих на органическом топливе. В настоящее время сталь (известная как P91 применяется для труб большого диаметра и T91 – для труб малого диаметра) была применена в энергетических парогазовых установках с целью снижения термической усталости и разрушений, связанных с ползучестью металла в трубопроводах.

Таблица 1.2 - Химический состав реакторных сталей в процентах

Марка	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Др. эл.	P	S	Cu
Зарубежные стали									
SA212B	до 0,31	0,85-1,20	-	-	-	0,15-0,30Si	до 0,035	до 0,040	-
SA533	до 0,27	1,15-1,55	-	0,45-0,60	0,40-0,70	-	до 0,035	до 0,040	до 0,10
SA508	до 0,25	1,20-1,50	до 0,25	0,55-0,70	0,40-1,00	-	до 0,015	до 0,015	0,10-0,15
P91	до 0,25	1,15-1,55	8,0-9,5	0,8-1,1	до 0,4	-	до 0,015	до 0,015	-

На агрегатах были выявлены проблемы, при изготовлении, монтаже и ремонте оборудования из P91/T91. Имели место разрушения швов и

околошовной зоны разнородных металлов после 1000 часов эксплуатации, а также разрушения, вызванные нарушением геометрии сварных швов и несоблюдением технологии термообработки после 5000 часов эксплуатации. Сталь P91 разработали в начале 80-х годов в США. Испытания показали, что данная сталь обладает низким тепловым расширением, улучшенным сопротивлением окислению и высокой тепловой проводимостью по сравнению с обычными теплоустойчивыми сталями, такими как 12X1МФ. Повышенные технологические свойства необходимы для уменьшения толщин стенок при изготовлении агрегатов, это необходимо для снижения термического напряжения. Введение легирующих элементов таких, как ванадия и ниобия в обычную теплоустойчивую сталь увеличивает сопротивление ползучести. Это и стало причиной для использования данной стали. Стали P91/T91 были сертифицированы и приняты в производство. При этом данные стали имеют небольшие отличия. Сталь P91 применяется для трубопроводов большого диаметра, а сталь T91 для трубопроводов маленького диаметра. Сталь P91 применяется при рабочей температуре до 595°C, а сталь T91 применяется при рабочей температуре до 565°C. Это связано с особенностями работы агрегатов.

Сталь P91 обладает рядом преимуществ по сравнению с обычными сталями:

- обладает высокими прочностными характеристиками при высоких температурах;
- имеет более низкий коэффициент теплового расширения, чем у низколегированных теплоустойчивых сталей;
- имеет повышенный коэффициент полезного действия при повышенной рабочей температуре;
- уменьшает появление термических усталостных микротрещин.

При этом сталь P91 имеет следующие недостатки:

- высокая себестоимость из-за необходимости обязательной термообработки для снятия напряжений;

- маленький опыт применения;
- сталь менее стойка к скачкам рабочего давления из-за меньшей толщины стенок труб.

Так же все сварные соединения, в независимости от толщины подвергаются более точной термообработки.

Сталь P91 применяется на агрегатах для решения следующих проблем:

- снижение термической усталости трубопроводов на коллекторах большого диаметра;
- повышение стойкости к ползучести металла (рис. 1).

Высокие технологические свойства стали P91 уменьшают тепловую усталость трубопроводов, что позволяет уменьшить их толщину и вес всего агрегата при неизменных рабочих характеристиках. При замене стали 12X1МФ на P91 толщина стенки коллектора уменьшается на 54%, а соответственно его вес снижается на 65%.

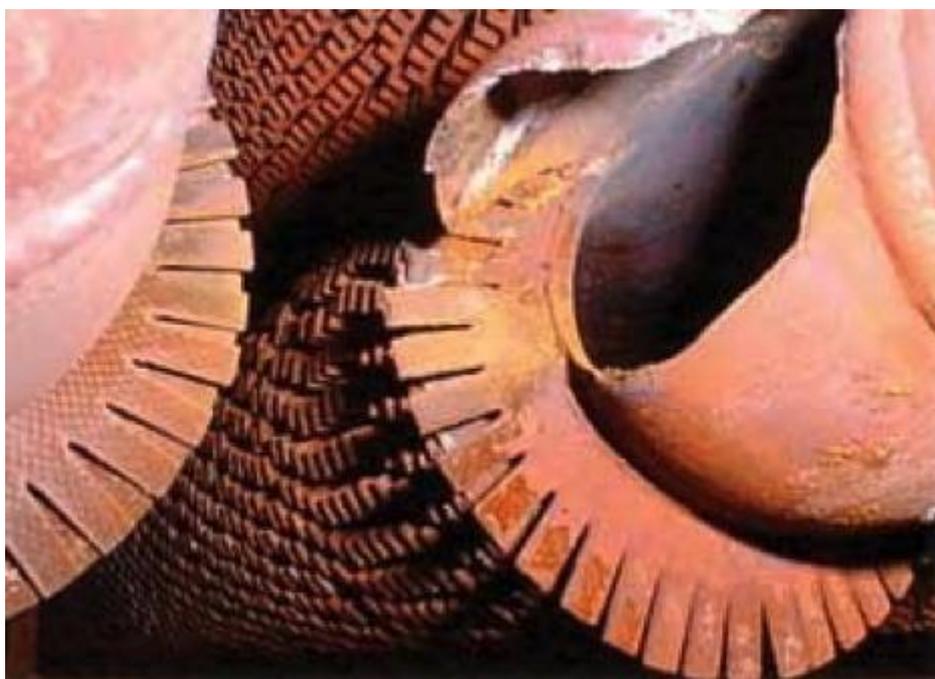


Рисунок 1.3 - Разрушение коллектора из-за ползучести металла после воздействия высоких температур

Механические свойства стали P91 зависят от микроструктуры стали и неизменности данной микроструктуры при всем сроке работы агрегата. Микроструктура стали P91 зависит от таких добавок как азот, ниобий и

ванадий. При этом необходимо контролировать точную термообработку для полного перехода аустенита в мартенсит. При правильно проведенной термообработке металл обладает высоким сопротивлением ползучести и высоким пределом прочности.

При этом ванадий и ниобий стабилизируют микроструктуру стали, осаждаясь в виде карбидов и нитридов углерода, повышая сопротивляемость ползучести. Любое нарушение технологического процесса при изготовлении и ремонте ведет к ухудшению микроструктуры стали и как следствие к снижению механических свойств стали, что ведет к преждевременному разрушению оборудования.

При работе со сталью P91 не рекомендуется производить нагрев «резаком» т.к. использование местного нагрева ведет к неоднородному нагреву поверхности, что сложно контролировать и это приводит к ухудшению микроструктуры, стали (рис.1.4).



Рисунок 1.4 - Монтажные сварочные работы

Также к снижению механических свойств стали приводит неправильно проведенная термообработка. При слишком низкой температуре проведения термообработки в стали будет остаточный мартенсит. Слишком высокая температура и длительная выдержка при проведении термообработки ведет к снижению прочностных свойств стали. Ремонт стали P91 без предварительного подогрева и последующей термообработки проводить

запрещено, это приводит к появлению трещин из-за высоких остаточных напряжений.

В сварочных материалах содержатся легирующие элементы, влияющие на термообработку трубопроводов после сварки. Например, марганец и никель уменьшают температуру фазовых превращений. При термообработке возможно образование остаточного мартенсита в сварном шве, а, следовательно, есть возможность появления трещин. Стандартами ASME допускается содержание никеля в сварном шве до одного процента, по некоторым данным допускается содержание никеля в сварном шве 0,4%. По последним исследованиям предложены новые ограничения общего содержания никеля и марганца в стали P91. При термообработке необходимо соблюдать следующие условия:

- термообработку проводят при температуре 730-775°C;
- если суммарное содержание никеля и марганца менее одного процента, то термообработку проводят при температуре 785°C;
- при толщине трубопровода до 125 мм выдержка при проведении термообработки составляет 1 час на 25 мм, но не менее 120 минут;
- для толщины более 125 мм время термообработки 300 минут плюс 15 минут на каждые 25 мм свыше 125 мм.

Одна из серьезных проблем стали P91 является выдержка при проведении термообработки. При температуре, при которой мартенсит начинает переходить назад в аустенит (AC1) и ниже температуры, при которой фаза перехода завершена (AC3). Если выдержка не достаточна, то в стали P91 мартенсит и карбиды не полностью распадаются. Таким образом, структура может быть частично мартенситной и аустенитной, что приводит к снижению сопротивления ползучести. При выдержке в межкритическом интервале температур и ведущей к снижению прочностных характеристик появляются микротрещины в швах. Данные микротрещины образуются в мелкозернистой зоне термического влияния. Острые углы или резкое изменение геометрии являются концентраторами напряжений и центрами

зарождения микротрещин. Трещины создают большую проблему т.к. они могут появляться на ранних стадиях работы от двадцати до тридцати тысяч часов при более низких температурах, чем максимально рассчитано проектом 600°C и они зарождаются и растут внутри основного металла прежде, чем появляется на поверхности. Данные трещины появились на агрегатах из стали P91 в Англии, где эти стали работают дольше, чем в остальных странах.

Перегрев при термообработке вызывает укрупнение нитридов и карбидов, следовательно, уменьшает сопротивление ползучести металла. Перегрев снижает риск при изготовлении, из-за малого времени термообработки. Но, следует учитывать, что многократная термообработка, применяемая при производстве толстостенных изделий, приводит к снижению жаростойкости (рис. 1.5).

Так же, уменьшается сопротивление ползучести, повышается вероятность образования коррозионного растрескивания под напряжением. Для снижения опасности перегрева существуют температурные ограничения:

- 1040 - 1080°C – при проведении нормализации.
- 730 - 799°C - при проведении отпуска.
- для изделий, которые нагревались до температуры выше 799°C проводят повторную термообработку или вырезают перегретые участки, термообрабатывают их, а затем монтируют на место.

Одной из основных задач исследований является улучшение качества изготовления. Для определения состояния материала и его сопротивления ползучести, а также правильности выполнения процесса термообработки необходимо проводить неразрушающий контроль. Примерную оценку механических свойств металла при рабочей температуре оценивают по замерам твердости металла при комнатной температуре. Для этого используются переносные приборы для замера твердости.

Для более точной оценки состояния металла на действующих агрегатах при высоких температурах возникает необходимость в разработке

специальных приборов. Пока таких приборов нет, но есть рекомендации по допустимой твердости, если материал подвергался термообработке твердость не должна превышать допустимых пределов. Для стали Р91 твердость не должна превышать твердости 270НВ после термообработки. Если твердость выше данного предела необходимо провести повторную термообработку, но не более трех раз. Тогда механические характеристики при высоких температурах будут соответствовать требованиям.



Рисунок 1.5 - Разрушение трубопровода из-за потери жаростойкости при воздействии высоких температур и давления

Существуют виды неразрушающего контроля, позволяющие измерять деформацию, вызванную ползучестью металла, были проведены необходимые исследования. Существует технология, применяемая на работающих агрегатах при рабочих давлении и температуре. Лаборатории на предприятиях измеряют изменение напряжений, и определяют скорость ползучести, при обработке данных можно определить остаточный ресурс агрегата.

Ползучестью металла называются процессы вызывающие необратимые деформации основного металла при воздействии на него высоких давлений и температуры. Измеряются как напряжения. Выполняют оптический

отпечаток на поверхности работающего оборудования и проводят оценку деформаций в продольном и поперечном направлениях. При прохождении определенного времени проводят повторные исследования. Сравнивая первый и последующие замеры, определяют сопротивление ползучести материала.

Высокие механические характеристики стали P91 обеспечиваются легирующим составом и правильно проведенной термообработкой. Сталь подвергают нормализации при температуре 1050 - 1080°C, и отпуску при температуре 750 - 780°C. Получается сталь имеющая мартенситную мелкозернистую структура. При дальнейшей обработке металла необходимо строго соблюдать технологию изготовления, чтобы сохранить микроструктуру.

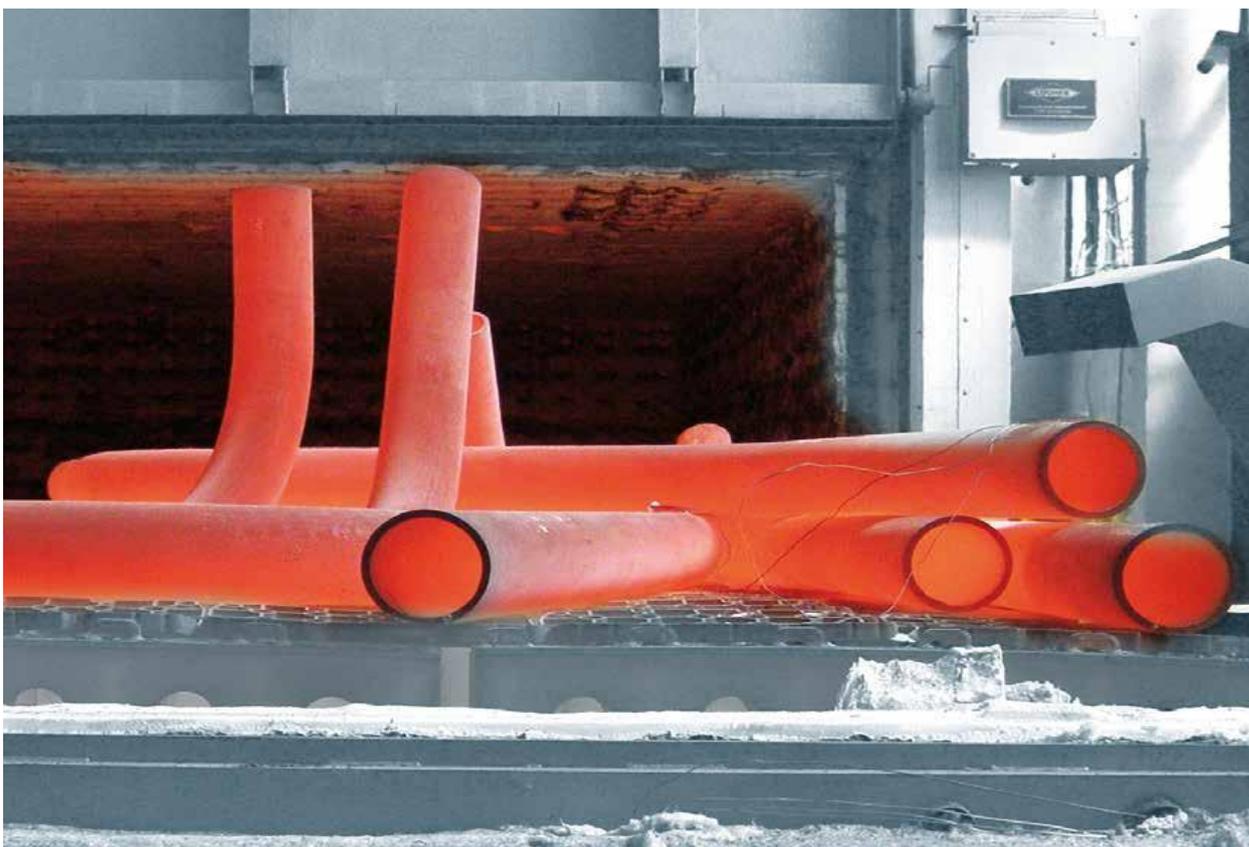


Рисунок 1.6 - Проведение термообработки труб коллектора

1.3 Особенности сварки теплоустойчивых сталей

Сварку низколегированных теплоустойчивых сталей необходимо вести без перерыва. При перерывах в работе, сварной шов медленно охлаждают

под слоем теплоизоляции. При возобновлении работ необходимо обеспечить предварительный подогрев.

При сварке необходимо строго соблюдать технологический процесс сварки и термообработки. Соблюдать общие рекомендации по сборке, сварке и термообработке:

Зачистить сварочные кромки и прилегающие поверхности от загрязнений до металлического блеска;

строгое соблюдение тепловых режимов;

надежная защита сварного шва от внешнего воздействия;

соблюдать режимы предварительного и сопутствующего подогрева стали и последующей термообработки;

использовать электроды, предназначенные для работы с теплоустойчивыми сталями.

При сварке могут образовываться трещины в зоне термовлияния, особенно при толщине стали более 8мм и повышенном содержании углерода и хрома. Теплоустойчивые стали необходимо предварительно подогревать до температуры 150 - 200°С. После сварки и термообработки медленное охлаждение под слоем теплоизоляции.

Однако это не относится к технологической свариваемости. Данный процесс ухудшается из-за охрупчивания металла и появления неустойчивых структур в сварном соединении. Появление металла с хрупкой структурой может в процессе работы привести к разрушению сварного шва при развитии холодных микротрещин. Холодные трещины могут образовываться сразу после сварки и после некоторого времени после охлаждения.

Появление хрупких структур зависит от легирования металла. Например, хромомолибденованадиевые стали более склонны к образованию хрупких структур, по сравнению с хромомолибденовыми.

Одной из причин образования холодных трещин при работе изделия является образовавшийся подвижный водород.

Для того чтобы уменьшить процесс появления хрупких структур, а, следовательно, улучшить свариваемость теплоустойчивых сталей, перед сваркой трубопроводов из этой стали обеспечивают подогрев местный, предварительный или общий. При обеспечении подогрева снижается скорость охлаждения после сварки, уменьшается количество остаточного мартенсита, а как следствие значительно уменьшается напряжение (рисунок 1.7).

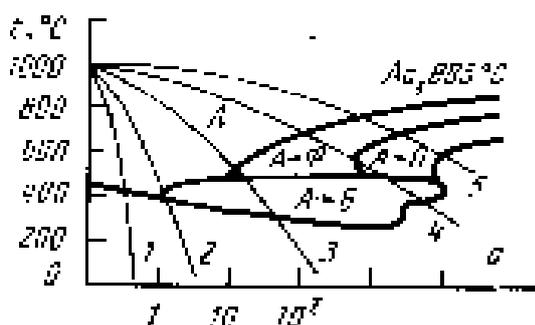


Рисунок 1.7 – Изменение структурных составляющих от скорости охлаждения

При обеспечении предварительного подогрева водород исчезает из сварного шва, это повышает деформационную способность изделия. Предварительный подогрев теплоустойчивых сталей необходимо проводить при определенных температурах. Уменьшение температуры приводит к тому, что хрупкие структуры не исчезают, а при превышении температуры снижаются длительная прочность и ударная вязкость сварного шва. В настоящее время применяется технология сварки и сварочные материалы которые обеспечивают высокие механические свойства сварного шва и стойкость к образованию горячих трещин [3]. Однако холодные трещины и разупрочнение металла происходит в сварных швах. Для исключения данных дефектов необходимо обеспечить предварительный и сопутствующий подогрев и последующую термообработку. При этом снижается разница температур в зоне сварки и околошовной зоне, что уменьшает напряжения в сварном шве. При снижении скорости охлаждения сварного шва после

сварки аустенит переходит в мартенсит при высокой температуре, когда металл пластичен. Напряжения, будут снижаться, уменьшится вероятность появления хрупких структур. Обеспечивая подогрев, необходимо учитывать, что повышение температуры ведет к образованию грубой ферритно-перлитной структуры, снижающей механическую прочность и ударную вязкость изделия. Снизить вероятность образования хрупких структур можно обеспечив медленное охлаждение под слоем теплоизоляции сварного шва и прилегающих поверхностей. В течении этого времени остаточный аустенит переходит в мартенсит, а также из металла сварного шва удаляется растворенный водород. Однородность металла сварного шва и основного металла необходимо обеспечить для уменьшения диффузии легирующих элементов и углерода при работе агрегата при воздействии давления и высоких температур, так как диффузия легирующих элементов приводит к уменьшению длительности работы агрегатов. При термообработке получается однородная во всем сварном изделии микроструктура, если легирующий состав металла сварного шва не отличается от легирующего состава основного металла. Такое соединение обладает высокой прочностью при воздействии высокого давления и температуры. Для получения однородной структуры необходимо правильно проводить термообработку. Для теплоустойчивых сталей проводят закалку и высокий отпуск. В условиях монтажа проводят только высокий отпуск при температуре около 780°C. Обеспечивают предварительный подогрев, а также проведение термообработки сварных швов при монтаже с помощью термостов применяя установки с индукционным током повышенной частоты. Проводят выдержку при максимальной температуре нагрева, время при отпуске обеспечивают из расчета 4—5 мин/мм толщины стенки; последующее охлаждение сварного шва и прилегающих поверхностей должно быть медленным (под слоем теплоизоляции) до температуры 300°C, далее на воздухе.

Известна сварка теплоустойчивых сталей без термообработки [4]. Для этого используют электроды с повышенным содержанием никеля при этом отпадает необходимость последующей термообработки. Наибольшее распространение аустенитный вариант сварки находит при монтаже и ремонте действующего нефтехимического и химического оборудования. В настоящее время сварные соединения с аустенитной структурой металла шва стали применяться во всех конструкциях из закаливающихся сталей, которые нельзя подвергнуть предварительному подогреву и последующей термообработке. Аустенитными электродами свариваются технологические трубопроводы нефтеперерабатывающих и химических установок, изготавливаемые из закаливающейся хромомолибденовой, стали 15X5M. Применение аустенитных электродов вызвано тем, что термообработка этой стали, необходимая при сварке ее неаустенитными электродами, должна выполняться при жестких условиях. Как известно, отпуск стали 15X5M в области температур ниже критической (ниже 700°C) требует для распада, образовавшегося в ней мартенсита длительной (до 4-6ч) выдержки. При нагреве этой стали выше критической температуры охлаждение должно быть медленным, чтобы не превысить критическую (вызывающую закалку) скорость, которая у стали 15X5M очень мала. Большинство же соединений трубопроводов выполняется при их монтаже. В таких условиях термообработка по режиму, требуемому для отпуска закаленной стали 15X5M, встречает значительные трудности.

В настоящее время возникла потребность в установках, внутри которых рабочая температура достигает 850-950°C и давлениях 3-4 Мпа, а снаружи рабочая температура 550-600°C. В связи с этим их следует изготавливать внутренние устройства из аустенитных сталей большой толщины, а наружные устройства из теплоустойчивых сталей, сварку которых необходимо производить с предварительным подогревом и последующей термической обработкой.

При сварке перлитных или мартенситных сталей аустенитными электродами в зоне сплавления образуются мартенситные прослойки с высокой твердостью, которые при определенных условиях ведут к разрушению сварного соединения. Влияние мартенситной прослойки на работоспособность конструкции зависит от ее ширины, которая, в свою очередь, определяется запасом аустенитности металла шва и степенью проплавления основного металла. С увеличением содержания никеля в аустенитном металле ширина образуемой в зоне сплавления мартенситной прослойки уменьшается.

При сварке аустенитными электродами необходим предварительный подогрев до температуры 150-200°C т.к. для сварных соединений при этой температуре остаточный мартенсит исчезает.

1.4 Особенности процесса сварки аустенитных сталей

При сварке аустенитных сталей одним из распространенных дефектов межкристаллитных разрушений являются горячие трещины. Горячие трещины подразделяются на кристаллизационные и подсолидусные в зависимости от условий образования. Возникновение кристаллизационных трещин вызвано процессом первичной кристаллизации сварочной ванны. При кристаллизации металл шва находится в двухфазном твердожидком состоянии. Началом его (верхней границей) является срастание дендритов в жесткий каркас, концом (нижней границей) – полное затвердевание металла, т.е. температура реального солидуса. Твердожидкое состояние металла обладает повышенной хрупкостью, поэтому эффективный интервал кристаллизации называют также температурным интервалом хрупкости. Кристаллизация сварного шва идет в условиях воздействия растягивающих напряжений, они возникают из-за неравномерного нагрева и охлаждения сварной конструкции и жесткой фиксации свариваемых заготовок. Возникновение растягивающих напряжений вызывает пластическую деформацию сварного шва, причем величина ее нарастания повышается при

уменьшении температуры. Если величина деформации превысит пластичность металла, в температурном интервале хрупкости, произойдет разделение кристаллитов и возникновение трещин. Если же пластическая деформация, не превзойдет величины пластичности самого металла, то горячие трещины не возникают. Для повышения стойкости сварного шва к образованию кристаллизационных трещин, т.е. его технологической прочности необходимо контролировать величину температурного интервала хрупкости. Ширина температурного интервала хрупкости зависит от химического состава материала, с помощью введения дополнительных легирующих элементов его можно увеличивать или уменьшать. К появлению горячих трещин приводит наличие фосфора, серы, кремния и никеля. Сера и фосфор приводят к образованию легкоплавких эвтектик с никелем и железом и никелем, увеличивающих температурный интервал хрупкости. Кристаллизуясь сульфидная, эвтектика располагается в виде прослоек по границам кристаллов, это повышает опасность возникновения горячих трещин. Также сера и фосфор образуют тонкие пленки в твердой фазе, снижая прочность по границам зерен. Из-за выпадения на границах кристаллитов пленок силицидов и других легкоплавких неметаллических соединений, кремний провоцирует появление трещин в сварных швах. Титан и ниобий повышают стойкость против образования горячих трещин. Они снижают отрицательное влияние на свойства жидких прослоек между кристаллитами образуя устойчивые первичные карбиды. При температурах ниже температуры затвердевания в условиях нарастающих напряжений образуются подсолидусные трещины в однофазных аустенитных швах. Межкристаллитное разрушение происходит по схеме разрушения при высокотемпературной ползучести. Для исключения появления горячих трещин при сварке необходимо контролировать форму сварочной ванны и регулировать термомодеформационные условия сварки. Регулирование термомодеформационных условий сварки и, следовательно, скорости кристаллизации и остывания сварочной ванны позволяет снизить скорость

нарастания растягивающих напряжений в период, когда металл шва обладает пониженной пластичностью. Из опытных экспериментов следует, что для предотвращения образования горячих трещин сварку ведут при малых значениях погонной энергии и полном охлаждении металла в промежутках между наложением отдельных валиков сварного шва. При многопроходной сварке соединений большой толщины необходимо применять предварительный и сопутствующий подогрев, особенно при отрицательной температуре окружающего воздуха, также положительные результаты дает проковка каждого слоя пневмомолотком.

1.5 Особенности процесса сварки разнородных сталей

При сварке разнородных сталей из-за особенностей разнородных материалов необходимо выбирать режим сварки, с минимальным проплавлением и перемешиванием основного металла с наплавленным. В металле шва наблюдается химическая и структурная это зависит от степени проплавления основного металла.

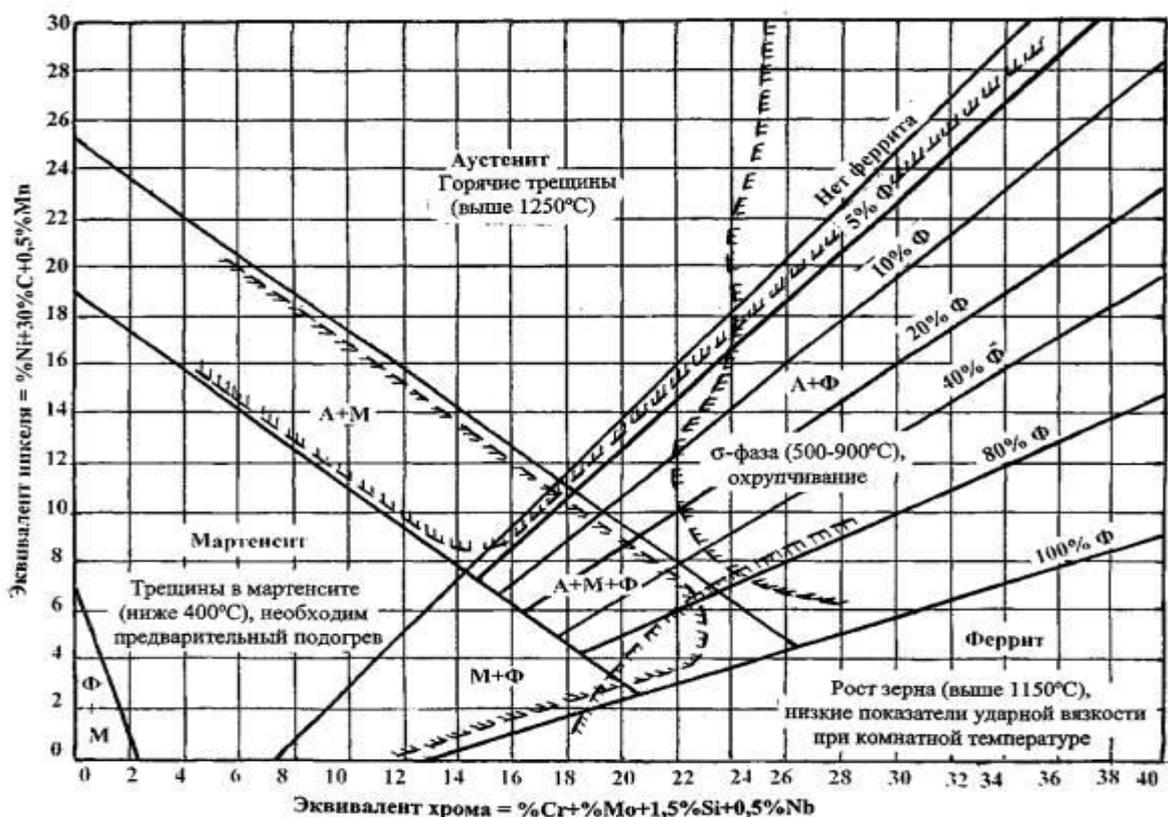


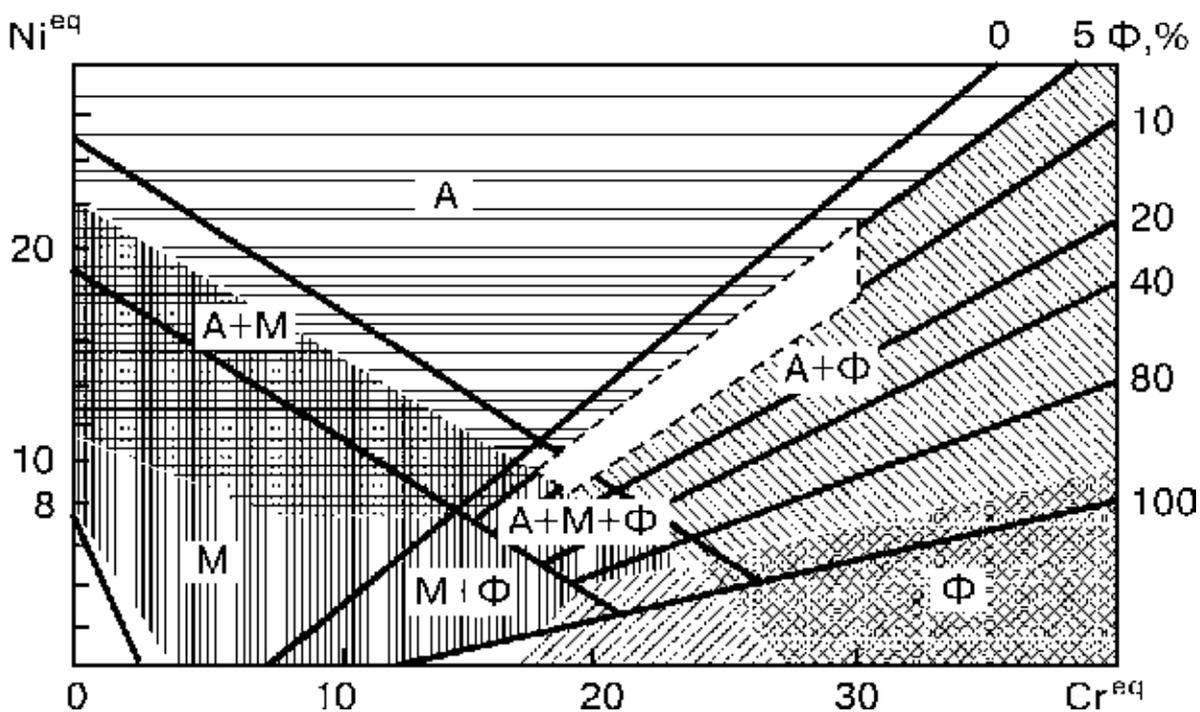
Рисунок 1.8 - Диаграмма Шеффлера

При сварке каждый слой шва является практически однородным из-за конвективного перемешивания сварочной ванны. При многослойной сварке разнородных сталей доля участия основного металла меняется от слоя к слою и, следовательно, изменяются химический состав, структура и свойства металла шва по его сечению. Степень проплавления основного металла зависит от ряда факторов и в основном от формы разделки кромок, режима сварки и теплофизических свойств свариваемых сталей. Чем больше угол разделки кромок, тем меньше доля участия основного металла в составе шва, а при наплавке валиков на плоскость она минимальна. Наиболее резко отличаются по химическому составу корневые участки многослойного шва, в которых доля участия основного металла составляет 30-35%, а при сварке на повышенных режимах может возрасти до 40-50% [2].

Сварка разнородных сталей имеет свои специфические особенности, обусловленные необходимостью получения сварных соединений, способных работать в особых условиях. При несоблюдении технологии сварки в околошовной зоне сварного шва образуются трещины, так называемые отколы, располагающиеся около границы сплавления. В основном данные дефекты возникают при сварке закаливаемых сталей, таких как высоколегированные мартенситные из-за остаточных сварочных напряжений. Особенность сварки разнородных сталей состоит в том, что могут появиться горячие трещины в металле шва, под которыми принято понимать трещины, образующиеся при температурах, находящихся в области солидуса металла шва. Когда в качестве специальной стали используется аустенитная, сварка производится с применением материалов, обеспечивающих высоколегированный металл шва, который весьма склонен к образованию горячих трещин.

Основная специфическая трудность сварки разнородных сталей, обусловлена тем, что в зоне их сплавления происходит значительное изменение структуры сплавляемых металлов. При эксплуатации при

повышенных температурах в околошовной зоне происходят сложные процессы обмена атомами различных элементов.



A – аустенит; M – мартенсит; Ф – феррит (– образование мартенситных трещин при температуре ниже 399 °С; – образование горячих трещин при температуре выше 1249 °С; – хрупкость после термообработки при 499...899 °С; – высокотемпературная хрупкость)

Рисунок 1.9 Диаграмма Шеффлера.

Наиболее диффузионно-подвижным элементом в металле является углерод, который вследствие малого размера атомов способен образовывать с железом твердые растворы внедрения. Перераспределение углерода, из менее легированного металла в более легированный, образует в зоне сплавления характерную структуру неоднородности, которая представляет собой обезуглероженную прослойку со стороны наименее легированного металла и науглероженную прослойку со стороны более легированного. При таком изменении структурного состояния в зоне сплавления происходит резкое скачкообразное изменение свойств на участке очень малой протяженности. В результате образуются прослойки разупрочненного и охрупченного металла. При снижении прочности и повышении хрупкости сварного соединения до критических значений происходит преждевременное

разрушение конструкции. При эксплуатации разнородных сварных соединений имеют случаи разрушение сварных швов по зоне сплавления, при этом в отдельности, свариваемые стали имеют высокую прочность и вязкость. Такое изменение структуры металла в зоне сплавления разнородных сталей условно названо образованием структурной неоднородности. Образование структурной неоднородности происходит в результате реактивной диффузии углерода, т.е. процесса, обусловленного не разностью концентраций углерода в основном металле и металле шва, а разницей его термодинамической активности. Углерод может диффундировать из основного металла в шов или из шва в основной металл, где в зависимости от соотношения в них карбидообразующих элементов, которые по мере возрастания сродства к углероду располагаются в строгой последовательности и составляют ряд: Fe, Mn, Cr, Mo, W, V, Nb, Ti. Чем выше в одном из свариваемых металлов карбидообразующих элементов и выше их сродство к углероду, тем больше степень развития структурной неоднородности в зоне сплавления.



Рисунок 1.10 Кинетика микроструктурных изменений разнородных металлов в сварном шве в зоне, расположенной вблизи границы сплавления (основной металл – углеродистая низколегированная сталь)

Одной из трудностей сварки разнородных сталей, особенно аустенитных с мартенситными, с точки зрения прочности работающего изделия, являются неизбежные остаточные сварочные напряжения, которые имеют значительные величины и неблагоприятное распределение. Основными причинами возникновения остаточных напряжений в сварных

соединениях являются неравномерность нагрева и жесткость соединяемых деталей, которые препятствуют свободному развитию в них тепловых деформаций. Для исключения напряжений широко используется термообработка (отпуск) сварных соединений. Последующее охлаждение, вследствие близости коэффициентов линейного расширения сталей, не вызывает появления дополнительных остаточных напряжений. Другая картина наблюдается при отпуске соединений из сталей разных структурных классов. На стадии нагрева и высокотемпературной выдержки также происходит снятие остаточных напряжений. Однако при последующем охлаждении в соединениях возникают новые внутренние напряжения, обусловленные различными значениями коэффициентов линейного расширения сплавляемых металлов. В сварных соединениях аустенитной стали с перлитной сталью, охлаждение после отпуска вызывает, в аустенитном металле появление остаточных напряжений растяжения, а в перлитном – напряжений сжатия. Таким образом, после отпуска в зоне сплавления разнородных металлов имеет место резкий скачок напряжений с переменной знака. Исходя из выше сказанного последующая термическая обработка, с помощью которой обычно устраняются сварочные напряжения в однородных соединениях, в соединениях разнородных сталей не снижает остаточных напряжений, а только ухудшает их распределение и поэтому не может быть признана целесообразной. Для качественной сварки необходимо применить технологию сварки, исключая образование околошовных трещин при использовании закаливающих сталей; обеспечивает получение металла шва без горячих трещин; не вызывает чрезмерного разбавления высоколегированного металла менее легированным; исключает образование структурной неоднородности в зоне сплавления, как в процессе получения сварного соединения, так и при последующим его нагреве и эксплуатации в условиях высоких температур.

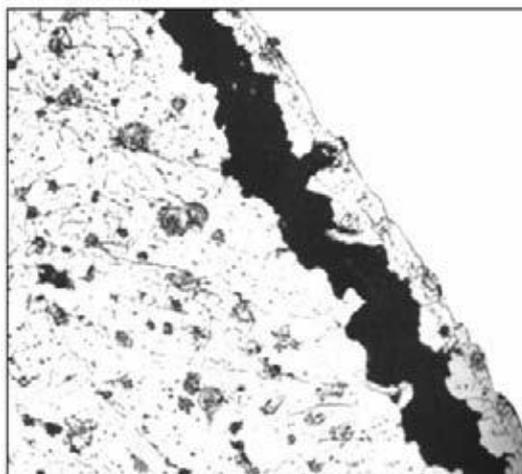


Рисунок 1.11 Типичный вид трещины, образовавшейся вдоль сварного соединения между аустенитной нержавеющей сталью (наплавленный металл – *справа*) и ферритной сталью (основной металл – *слева*)

При наплавке отдельных валиков на сварочные кромки микротрещины не возникают, хотя при сварке стыковых швов они гарантированно образуются. Из-за возникновения объемных напряжений и неравномерным нагревом в металле возникают напряжения первого рода. Напряженные состояния бывают линейными, плоскостными и объёмными. При сварке толстостенных изделий склонность к образованию трещин увеличивается, а температура мартенситных превращений снижается. При сварке с предварительным подогревом металл околошовной зоны охлаждается медленно. В этом случае мартенситные превращения сопровождаются самоотпуском. Медленное охлаждение, обеспечиваемое предварительным и сопутствующим подогревом сварного соединения, содействует мартенситному превращению и уменьшает сварочные напряжения. Все эти требования удовлетворяются используемыми в настоящее время способами сварки закаливающих сталей – сваркой перлитными электродами с подогревом и сваркой аустенитными электродами без подогрева. Однако оба способа не обеспечивают полного решения проблемы сварки закаливающих сталей, особенно в современном сварочном производстве: в перлитном шве часто образуются трещины, а в аустенитном – нельзя получить высокий предел текучести.

Одним из способов устранения вредного влияния образующегося в зоне сплавления переходного слоя является уменьшение его ширины до минимума. Поэтому выбирать нужный способ сварки следует с учетом технологических процессов и факторов, которые определяют формирование в зоне сплавления разнородных сталей переходного слоя, и прежде всего ширину мартенситной прослойки. Известны некоторые способы сужения переходного слоя и мартенситной прослойки, образующихся в зоне сплавления аустенитного металла с перлитным. Это прежде всего использование технологии сварки, обеспечивающей в аустенитном металле, сплавленном с перлитным, высокое содержание никеля или применение методов сварки, способствующих уменьшению глубины проплавления основного металла.

Ширина переходного слоя, образуемого в зоне сплавления разнородных сталей, изменяется с изменением режима сварки: увеличивается с повышением силы тока и напряжения и уменьшается с повышением скорости сварки. Наиболее сильное влияние оказывают скорость сварки и напряжение дуги. Для уменьшения ширины образующегося в зоне сплавления разнородных сталей переходного слоя, особенно мартенситной прослойки, что необходимо для обеспечения требуемой работоспособности сварного соединения, сварку разнородных сталей следует производить при режиме с пониженными значениями сварочного тока и напряжения дуги и увеличенной скоростью сварки. При этом аустенитный металл, сплавленный с мартенситным, должен иметь повышенное содержание никеля, для чего рекомендуется применять сварочные материалы из высоконикелевых сплавов.

1.6 Анализ способов сварки трубопроводов из разнородных сталей

Известна сварка под флюсом низколегированных теплоустойчивых сталей осуществляется проволокой с повышенным содержанием легирующих элементов. Автоматическую дуговую сварку под флюсом экономически целесообразно применять при толщине трубопроводов более

20 мм [6]. Для защиты сварного шва от воздействия окружающей среды используют флюсы: ФУ-11, ФУ-16, ФУ-22. Этим достигается

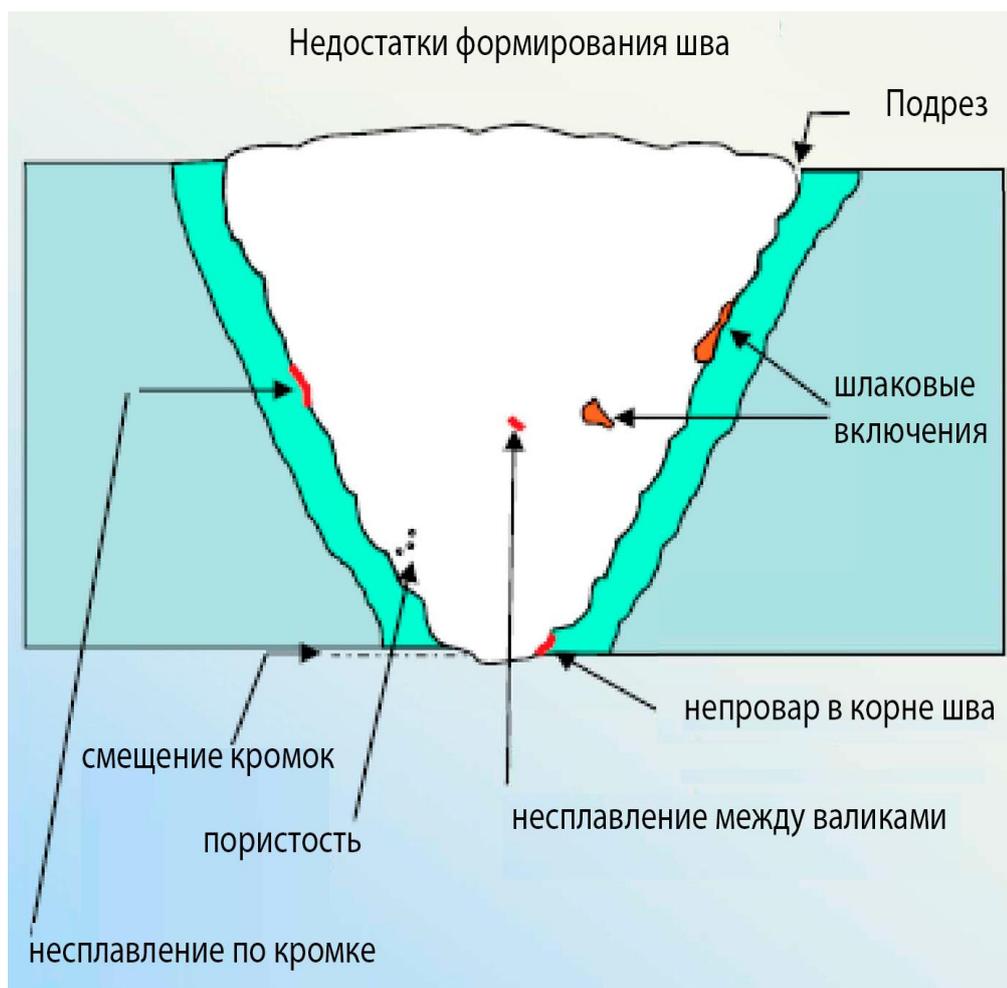


Рисунок 1.12 Дефекты сварного шва

стабильность содержания марганца и кремния в многослойных швах и низкое содержание в них оксидных включений - продуктов процесса восстановления марганца. Автоматическую сварку ведут со скоростью 40-50 м/ч на постоянном токе обратной полярности силой тока 350-400 А при напряжении дуги 30-32 В. Высокая скорость сварки снижает погонную энергию, что уменьшает разупрочнение хромомолибденованадиевых сталей в околошовной зоне. При применении присадки диаметром 4 и 5 мм, увеличивают силу тока до 500-550 А и 600-630 А соответственно при напряжении дуги 28-32 В.

Сварку ведут без перерывов в работе. В случае вынужденного перерыва в процессе сварки, при заполнении сварного шва менее 30% длины стыка, шов удаляют кислородной резкой и сварку производят по новой. При протяженности выполненного шва более 30%, удаляют частично шов с усадочной раковинной, и процесс сварки продолжается [6].

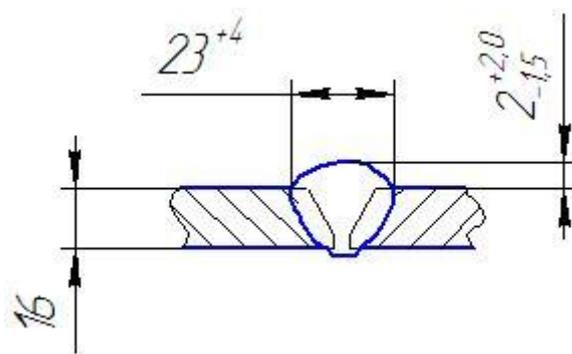


Рисунок 1.13 - Размеры сварного шва при толщине трубопровода 16мм

Сварка под флюсом обладает высокой производительностью, высоким качеством, но ее применение при сварке на монтаже трубопроводов не целесообразно из-за дорогостоящего оборудования и сложности применения на монтаже во время ремонта.

Аргондуговую сварку стыков трубопроводов из низколегированных теплоустойчивых сталей допускается выполнять с подогревом 60-100°C. Сварочная проволока подается впереди сварочной дуги под углом 20-30° к поверхности основного металла. Угол между осью неплавящегося электрода и основного металла должен составлять 75-80°, а горелка наклонена в противоположную сторону направлению сварки. Ширина сварочной ванны не должна быть выше внутреннего диаметра сопла горелки. Конец неплавящегося электрода, выступающего из сопла не должна превышать 5 мм.

Ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в среде инертного защитного газа (рис. 1.14).

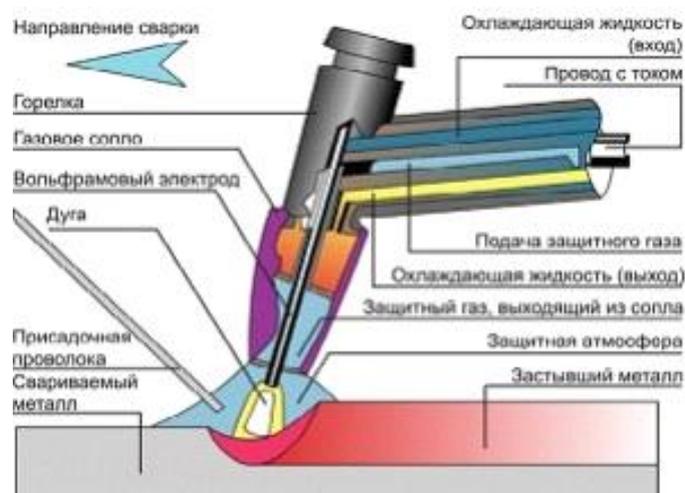


Рисунок 1.14 - Сварка неплавящимся электродом в среде защитного газа с применением полуавтомата

В качестве материала для неплавящихся электродов в основном используется вольфрам.

Сварка ведется с ручной подачей сварочной проволоки. Для защиты от воздействия атмосферного воздуха на сварной шов поступает из горелки защитный газ.

Неплавящиеся электроды изготавливают из вольфрама с добавками. Вольфрамовые электроды должны отвечать требованиям ГОСТ 23949-80. Они должны содержать тугоплавкие добавки оксида лантана (ЭВЛ), диоксида тория (ЭВТ). Данные элементы облегчают зажигание и поддерживают горение дуги, а также повышают прочностные свойства электрода. Электроды ЭВЛ и ЭВТ обеспечивают высокую токовую нагрузку. Газы, содержащие кислород для защиты сварочной ванны, не применяются т.к. происходит окисление вольфрамовых электродов и их разрушение.

Широкое распространение в качестве защитного газа получил аргон. Он тяжелее воздуха в 1,4 раза, является инертным газом, не вступает в реакцию с основным металлом, обеспечивая высокую защиту сварочной ванны от окисления. При сварке в среде аргона обеспечивают хорошо сформированные швы металлов и их сплавов. В качестве защитного газа, также применяется гелий, обеспечивающий лучшую защиту сварочной

ванны и увеличивающий глубину проплавления. Недостатком является высокая стоимость. Сварка в среде инертных газов является основным методом, если необходима чистота внутри трубопровода. В качестве защитного газа могут применяться азот или смеси газов с аргоном. От защитного газа зависят металлургические и технологические характеристики способа сварки.

Аргонодуговую сварку ведут на переменном или постоянном токе в зависимости от основного металла. При сварке на постоянном токе прямой полярности обеспечиваются лучшие условия для термоэлектронной эмиссии с электрода. Переменный ток применяют для сварки алюминия. При сварке на переменном токе оксидная пленка на поверхности алюминия разрушается и происходит катодная очистка. На переменном токе варят магний, алюминия, и их сплавы. Таким образом, при сварке вольфрамовым электродом на переменном токе обеспечиваются устойчивость электрода и происходит разрушение поверхностных оксидов на металле.

При использовании переменного тока сила сварочного тока больше при прямой и меньше при обратной полярности (рис. 1.15).

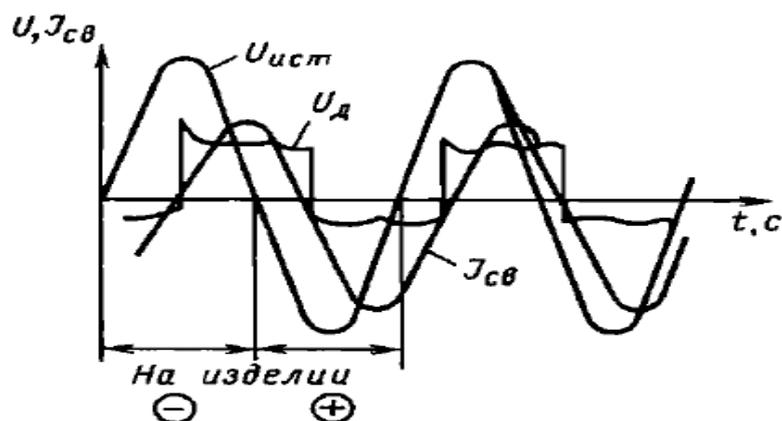


Рисунок 1.15 Осциллограмма изменения параметров режима при сварке на переменном токе: $U_{ист}$ – напряжение источника; U_d – напряжение дуги;

$J_{св}$ – сварочный ток

Преимущества аргонодуговой сварки [14]:

- высокое качество сварных соединений;

- чистота внутри трубопровода;
- возможность наблюдения за образованием шва;

К недостаткам способа относят:

- малая производительность труда
- громоздкость дополнительного оборудования (баллоны)

Аргонодуговую сварку применяют при сварке тонкого металла или к сварному соединению предъявляются повышенные требования качества.

При контакте вольфрама и основного металла зажигается сварочная дуга, далее поднимают электрод на 1-2мм. Контактный способ возбуждения дуги является не желательным для аргонодуговой сварки, так как при контакте из электрода могут в сварной шов попасть вольфрамовые включения, это снижает прочность соединения.

При бесконтактном способе, зажигание дуги происходит с помощью высокочастотного генератора. Дуга зажигается после нажатия на кнопку на сварочной горелке на расстоянии 1,5-2мм между изделием и электродом.

Основными преимуществами аргонодуговой сварки является высокое качество швов при сварке т.к. сварщик видит формирование сварного шва, ему не мешает шлак.

Одной из причин является необходимость, использования высококачественных материалов, требующих высокого качества при изготовлении при этом достигается чистота внутренней поверхности трубопроводов, что повышает чистоту производимого продукта. При сварке достигается высокая газовая защита сварочной ванны, контроль температуры и тепловложения.

Ручная аргонодуговая сварка формирует узкую зону термического влияния, снижает напряжение в зоне сварки, уменьшает возможность появления деформации в сварном шве и микротрещин.

Схема ручной аргонодуговой сварки представлена на рис.1.16.

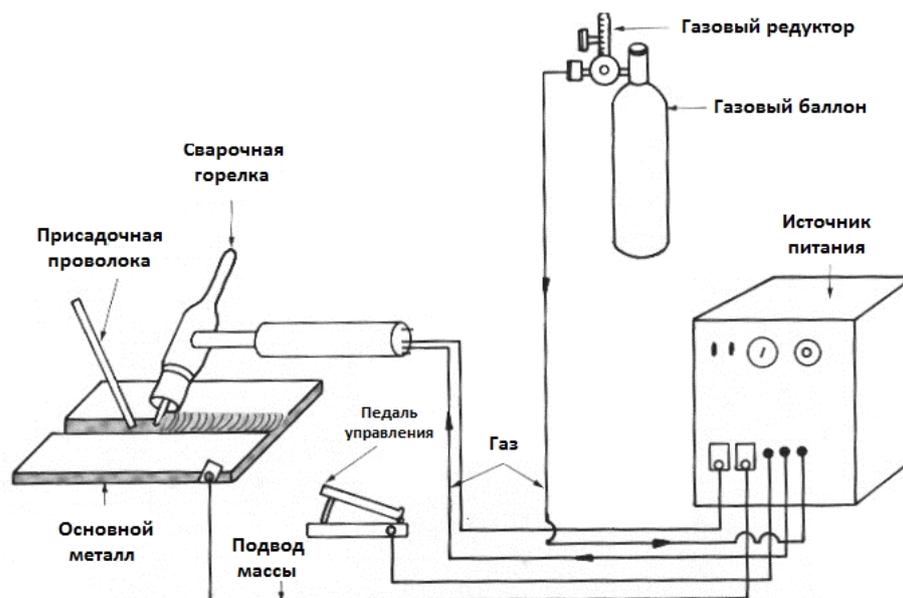


Рисунок 1.16 - Схема установки для аргодуговой TIG сварки

Газовая сварка труб из перлитных подкаливающихся сталей (12МХ, 15Х5М и т. д.) допускается только для труб маленького диаметра (до 45 мм) при толщине стенки не более 5 мм, например, при ремонте и монтаже контрольно-измерительной аппаратуры.

При газовой сварке сталей мощность пламени составляет на 1 мм толщины металла 100 дм³ ацетилена; сварку производят нормальным "восстановительным" пламенем. Для предотвращения выгорания легирующих элементов и уменьшения возможности образования микротрещин в начале кромки детали "пролуживают" тонким слоем расплавленного металла, а затем сразу заполняют разделку кромок присадочным материалом. Такой вид сварки используют для деталей толщиной свыше 12мм. Однако пролуживание кромок деталей на большую величину ведет к возникновению микротрещин на участках на вершине шва, из-за быстрого охлаждения металла. Для снижения выгорания легирующих элементов из металла сварного шва, и присадочной проволоки сварочная ванна находится в жидком состоянии как можно более короткое время. Присадочная проволока должна находиться всё время, при сварке, в

сварочной ванне; пользоваться капельным приёмом сварки нежелательно для уменьшения выгорания легирующих элементов. Газовую сварку необходимо вести с предварительным и сопутствующим подогревом сварного стыка. Стык нагревают той же горелкой, которой выполняют сварку шва. Сразу после сварки производят термообработку сварного шва с помощью термопоста.

При аргонодуговой и газовой сварке сварщик видит наплавляемый металл шва, шлак не мешает, что обеспечивает высокое качество сварного шва. Недостатком является низкая производительность труда, особенно при больших диаметрах и толщинах.

Теплоустойчивые стали сваривают дуговой сваркой плавящимся электродом в углекислом газе [6]. Сварку в углекислом газе применяют для однопроходных швов и для заварки дефектов чтобы не образовалась оксидная пленка. Для проволоки диаметром 1,2 мм сила сварочного тока 120-180 А при напряжении дуги 20-22 В, а диаметром 2 мм 280-340 А при 26-28 В. Дуговая сварка плавящимся металлическим электродом (проволокой) в среде инертного/активного газа с автоматической подачей присадочной проволоки (Рис. 1.17).

Защитные газы подразделяются на активные (взаимодействуют с металлом в сварочной ванне) и инертные газы.

Сварочный шов образуется при расплавлении присадочной проволоки и основного металла.

Полуавтоматическая сварка имеет свои особенности [6,7]:

- высокая концентрация дуги;
- высокая производительность (увеличение производительности сварки в 4-5раз по сравнению с ручной аргонодуговой сваркой);
- автоматизация и механизация процесса.

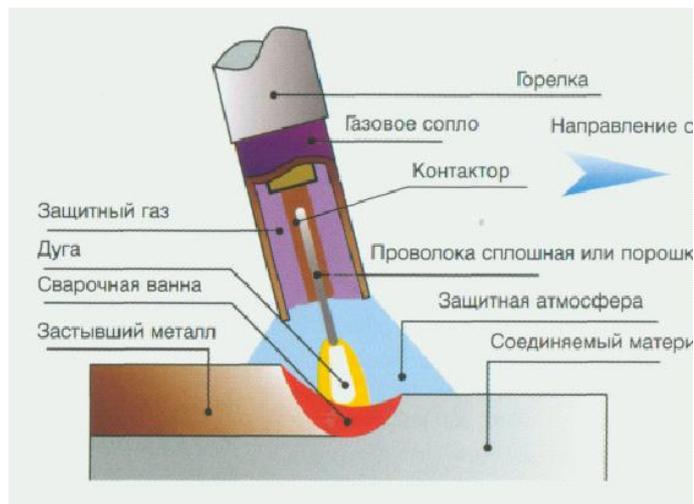


Рисунок 1.17 - Полуавтоматическая сварка в среде защитного газа

Одним из недостатков полуавтоматической дуговой сварки в среде защитных газов является организация защиты места сварки от сквозняков и ветра, приводящих к образованию пор, а также громоздкость оборудования.

Для сварки в среде защитных газов плавящимся электродом применяется полуавтомат.

Сварочный полуавтомат представляет собой сварочную установку для механизированной сварки плавящимся электродом (проволокой) в защитном газе.

При механизированной сварке в качестве защитного газа применяют аргон, углекислый газ или их смеси. При однопостовой сварке газ подаётся из баллона при многопостовой сварке из централизованных систем газоснабжения.

Механизированной сваркой варятся любые стали, а также алюминиевые сплавы.

Сварочный полуавтомат состоит из блока подачи сварочной проволоки, сварочного источника питания, специальной сварочной горелки, системы управления, и набора кабелей, и шлангов. В качестве источника питания в сварочном полуавтомате используют обычный сварочный выпрямитель с жесткой ВАХ [6].

Сварочная проволока поставляется в катушках на пластиковых катушках, массой от 5 до 18 кг. При сварке используют проволоку диаметрами от 0,8 до 2,0мм.

В современных сварочных аппаратах усложняется конструктивная часть оборудования и упрощается регулировка самого сварочного процесса, снижается риск человеческого фактора. При применении оборудования с цифровым управлением процесс сварки легко механизировать и автоматизировать, а также контролировать соблюдение режимов и технологии сварки. В современных сварочных аппаратах существует функция памяти, которая позволяет выставлять уже заданные и опробованные режимы на стандартные виды сталей их толщины и т.п.

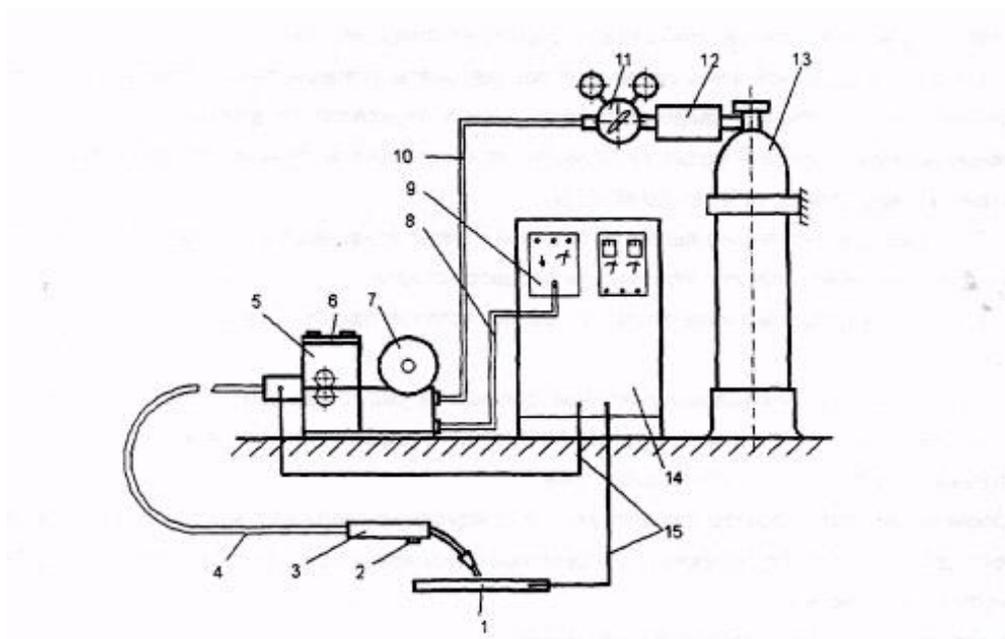


Рисунок 1.18 - Установка для дуговой механизированной сварки в CO₂-газе:

1 - изделие; 2 - кнопка "Пуск"- "Стоп"; 3 - горелка; 4 - шланг; 5 - механизм подачи электродной проволоки; 6 - пульт управления; 7 - катушка; 8 - кабель цепей управления; 9 - блок управления полуавтоматом; 10 - шланг для подачи защитного газа; 11 - газовый редуктор; 12 - подогреватель CO₂; 13 - баллон с CO₂; 14 - сварочный выпрямитель, 15- заземление.

При сварке при проведении ремонтов изделий из низколегированных теплоустойчивых сталей распространение получила ручная дуговая сварка

покрытыми электродами. Работа изделий при повышенных температурах способствует протеканию диффузионных процессов. Для уменьшения интенсивности протекания этих процессов в основном металле и сварном шве необходимо чтобы составы металла шва и основного максимально соответствовали друг другу. При сварке хромомолибденовых сталей используют электроды типа Э-ХМ. Стали с пониженным содержанием легирующих элементов рекомендуется сваривать с предварительным подогревом до 200°C, при высоком содержании легирующих элементов подогрев повышают до 250 - 300°C. Также при сварке данных сталей необходим сопутствующий подогрев до температуры 250 - 350°C, а также последующая термическая обработка сварного соединения.

При сварке регулируют режим сварки, добиваясь замедленной скорости охлаждения в зависимости от марки стали. При этом исключается появление закалочных структур и уменьшается перегрев зоны термического влияния, приводящего к росту зерна и ухудшению механических свойств.

Электроды имеют основное покрытие. Изделия сразу после сварки для снижения сварочных напряжений подвергают термической обработки. Водород является причиной появления трещин в сварном шве. Для исключения водорода в сварном соединении повышают температуру прокалки электродов; применяют электроды с основным покрытием, которое связывает водород в химическое соединение HF; подогрев кромок перед сваркой; после сварки проводить термообработку сварного соединения. Тремообработка проводится при температуре 650—750 °C, выдержке и медленном охлаждении и является высоким отпуском. Сварка в среде аргона дает хорошие результаты при борьбе с наличием водорода, но имеет низкую производительность.

При сварке низколегированных теплоустойчивых сталей необходимо строго соблюдать требования к подготовке, сборке, технологии сварки и термообработки. Сварочные кромки деталей и прилегающие к ним поверхности на расстоянии не менее 20 мм тщательно очищают до

металлического блеска от ржавчины, масла, влаги и других загрязнений. Надрезы, царапины на кромках и углубления, оставшиеся от газовой резки, удаляются полностью механическим способом на глубину 2-3 мм. Подготовка кромок, сборка соединений под сварку должны соответствовать размерам, предусмотренным ГОСТ 5264-80 и ГОСТ 14771-76. Временные швы после сварки изделия удаляются механическим способом. Дефектные места зачищают, заваривают по режимам основной технологии сварки и зашлифовывают заподлицо с основным металлом.

Сварку при возможности необходимо вести на выводных планках, устанавливаемых на концах стыкового соединения. Сварку ведут на постоянном токе обратной полярности. Перед сваркой необходимо обеспечить предварительный подогрев сварного шва. Для контроля температуры используют термпары, термоиндикаторные карандаши или термоэлектрические пирометры. После сварки сразу производить термообработку.

Короткие швы до 300 мм сваривают от начала до конца за проход, средние - до 1000 мм - от середины к концам, длинные - обратноступенчатым способом участками 150-200мм.

Сварку ведут с предварительным и сопутствующим подогревом, если к сварному соединению предъявляются требования прочности, равной или близкой прочности основного металла. Термообработка после сварки обязательна.

Для дуговой сварки теплоустойчивой стали ГОСТ 9467—75 предусматривает девять типов электродов (Э-09М, Э-09МХ, Э-09Х1М, Э-10Х1М1НФБ, Э10Х3М1БФ, Э10Х5МФ).

Ручную дуговую сварку теплоустойчивых сталей ведут электродами из низкоуглеродистой сварочной проволоки с основным покрытием, через которое вводят в сварной шов легирующие элементы [6].

1.8 Задачи работы

Таким образом, для сварки трубопровода из разнородных аустенитных и теплоустойчивых сталей при краткосрочных ремонтах и аварийных остановках целесообразно применять ручную дуговую сварку покрытыми электродами без термообработки.

Поэтому для достижения поставленной цели работы необходимо решить следующие задачи:

1. Проведение исследования возможности сварки аустенитных сталей с теплоустойчивыми;
2. Проведение исследований влияния предварительного подогрева на формирование качественного сварного шва;
3. Разработать технологический процесс сварки трубопровода из аустенитных и теплоустойчивых сталей.

2 Проведение экспериментов

Для этого провели ряд экспериментов со сваркой образцов и проверкой механических свойств сварного соединения.

При выборе способа сварки учитываем, что при аварийных остановках и ремонтах в основном используют ручную дуговую сварку. Главным её преимуществом является мобильность и простота оборудования. При аргонодуговой сварке и механизированной сварке в среде защитного газа необходимо дополнительно иметь баллоны с газом, что создаёт определённые трудности с работой в стесненных условиях. Кроме этого при механизированной сварке используют громоздкое оборудование, которое проблематично использовать на монтаже.

При выборе источника питания было рассмотрено несколько видов сварочных аппаратов. Сварочный выпрямитель – аппарат преобразующий переменное напряжение сети в постоянное напряжение электросварки. Существует несколько схем выпрямителей, самый простой регулирование тока с помощью трансформатора, а для выпрямления используются диоды.

Сварочный инвертор преобразует переменный ток 50Гц в переменный ток с частотой до 100кГц и через высокочастотный выпрямитель выпрямляет переменный ток. Достоинства сварочных инверторов велики и многочисленны. Прежде всего, впечатляет их малый вес (4-10 кг) и небольшие размеры, позволяющие легко перемещать аппарат от одного места сварки к другому. Это достоинство обусловлено меньшим размером трансформатора благодаря большой частоте преобразуемого им напряжения. Функция анти-залипание, облегчает зажигание дуги. Используя сварочный инвертер сварщики невысокой квалификации успешно справляются со сложной работой.

В связи с этим при экспериментах использовали сварочный инвертер.

В экспериментах использовали сварочные материалы российского производства ООО «Электрод» г. Железногорск и производства Германии фирмы Bohler. Данные электроды отличаются хорошим формированием сварного шва, уменьшенным разбрызгиванием, хорошим отделением шлака после сварки. Перед сваркой электроды прокалили по режиму: нагрев до температуры 250-300°C, выдержка 1 час.

Были подготовлены катушки из труб 220 и толщиной стенки 18 мм Ø220×18 из мартенситных сталей марки P91 (аналог 10X9MФ США), 12X1MФ и аустенитной стали 12X18H10T.

Кромки подготовили на токарном станке (рис. 2.1).

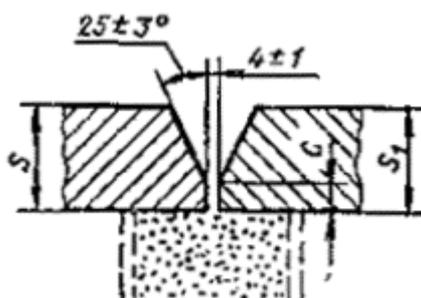


Рисунок 2.1 – Подготовка кромок под сварку

В первом эксперименте сварили катушки из стали 12X1MФ, которые после предварительного подогрева до $T=200-250^{\circ}\text{C}$ сварили с катушками из стали 12X18H10T. Сваренные образцы медленно охлаждались под слоем теплоизоляции до комнатной температуры. Сварку четырех образцов провели четырьмя различными электродами АНЖР-1, ОЗЛ-25Б, ЦТ-28, Bohler fox nibas 70/20 (таблицы 2.1, 2.2, 2.3, 2.4).

После сварки провели механические испытания на разрыв, загиб, ударную вязкость (таблица 2.5).

Таблица 2.1 - Химический состав электродов ОЗЛ-25Б

Ni	C	Mn	Si	Mo	Cr	Nb	W	S	P
основа	0,06	2,25	0,34	1,88	19,8	1,6	0,19	0,007	0,016

Таблица 2.2 - Химический состав электродов ЦТ-28

Ni	C	Mn	Si	Mo	Cr	W	S	P
основа	0,06	2,4	0,18	14,6	13,1	4,1	0,009	0,018

Таблица 2.3 -Химический состав электродов АНЖР-1

Ni	C	Mn	Si	Mo	Cr	Ti	S	P
59,6	0,06	1,92	0,3	9,9,6	23,6	0,07	0,011	0,019

Таблица 2.4 - Химический состав электродов Bohler fox nibas 70/20

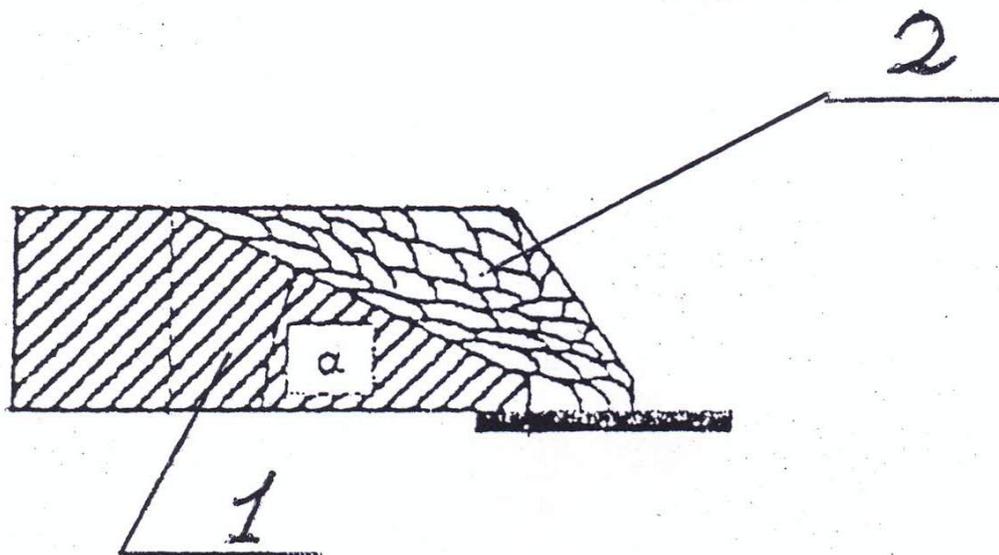
Ni	C	Mn	Si	Mo	Cr	Nb	Co	S	P
основа	0,025	5,0	0,4	1,0	19,0	2,2	0,08	0,006	0,012

Таблица 2.5 - Механические испытания образцов сварных соединений 12Х1МФ и 12Х18Н10Т

№ образца	Электроды	Место разрушения	Временное сопротивление разрыву, Н/мм	Угол изгиба, мм	Ударная вязкость, Дж/см	
619	Bohler fox nibas 70/20	Основной металл 12Х18Н10Т	476	122,5	13,85	
623	ЦТ-28	Основной металл 12Х18Н10Т	467	120	11,6	
624	АНЖР-1	Основной металл 12Х18Н10Т	463	120	13,25	
625	ОЗЛ-25Б	Основной металл 12Х18Н10Т	463,5	122,5	9,9	

Во втором эксперименте на кромки четырех катушек из стали 12Х1МФ произвели наплавку буферного слоя электродами АНЖР-1, ОЗЛ-25Б, ЦТ-28, Bohler fox nibas 70/20, наплавку вели (рис.2.2, 2.3). кольцевыми ниточными

сварными швами с предварительным и сопутствующим подогревом и медленным остыванием под слоем теплоизоляции.



1-основной металл, 2-наплавленный (буферный) слой

Рисунок 2.2 – Схема наплавки.

После наплавки провели термообработку катушек для снятия напряжений в наплавленном слое и зоне термического влияния. Термообработку производили по режиму: нагрев до $t=720^{\circ}\text{C}$, выдержка 60 минут, охлаждение под слоем теплоизоляции. Скорость нагрева и охлаждения со скоростью $100-150^{\circ}\text{C}/\text{час}$. Наплавленный слой получили толщиной 10-12мм (данная толщина буферной зоны необходима для исключения воздействия термического влияния на основной металл при последующей сварке). Затем произвели механическую обработку кромок на токарном станке, с такой же разделкой кромок согласно НТД (рис. 2.1, 2.4).



Рисунок 2.3 - Образец с наплавленными кромками



Рисунок 2.4 – Подготовка кромок под сварку после наплавки

Затем произвели сварку наплавленных кромок труб из закаливающейся стали с трубой из стали 12Х18Н10Т встык по технологии сварки с наименьшим проплавлением основного металла, без предварительного подогрева [1] и без последующей термообработки (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Сварной образец из разнородных сталей

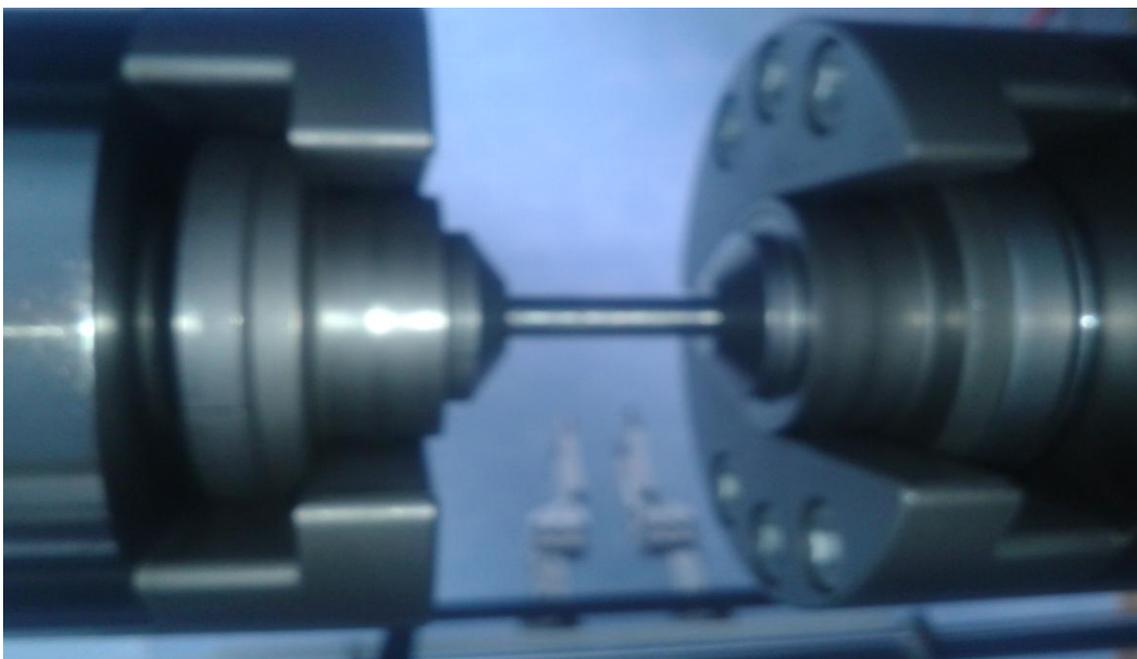


Рисунок 2.6 – Проведение механических испытаний



Рисунок 2.7 - Образцы для механических испытаний

Катушки сварили электродами АНЖР-1, ОЗЛ-25Б, ЦТ-28, Bohler fox nibas 70/20 соответственно и провели механические испытания на разрыв, загиб, ударную вязкость (таблица 2.6).

Таблица 2.6 - Механические испытания образцов сварных соединений 12Х1МФ и 12Х18Н10Т (с наплавкой буферной зоны)

№ образца	Электроды	Место разрушения	Временное сопротивление разрыву, Н/мм	Угол изгиба, мм	Ударная вязкость, Дж/см	Примечание
630	Bohler fox nibas 70/20	Основной металл 12Х18Н10Т	453	122,5	14,75	
632	ЦТ-28	Основной металл	443	120	12,5	
633	АНЖР-1	Основной металл 12Х18Н10Т	435	117,5	14,4	
634	ОЗЛ-25Б	Основной металл	457,5	122,5	10,2	



Рисунок 2.8 – Проведение испытаний для определения угла загиба



Рисунок 2.9 – Образцы для измерения угла загиба

В третьем эксперименте сварили катушки $\varnothing 220 \times 18$ из стали Р91 (аналог 10Х9МФ) которые после предварительного подогрева до $T=200-250^{\circ}\text{C}$ сварили с катушками из стали 12Х18Н10Т. Сварку вели с предварительным и сопутствующим подогревом и медленным остыванием под слоем теплоизоляции. Сваренные образцы медленно охлаждались под

слоем теплоизоляции до комнатной температуры. Сварку четырех образцов провели теми же четырьмя электродами АНЖР-1, ОЗЛ-25Б, ЦТ-28, Bohler fox nibas 70/20 и провели механические испытания на разрыв, загиб, ударную вязкость (таблица 2.7).

Таблица 2.7 - Механические испытания образцов сварных соединений Р91 и 12Х18Н10Т

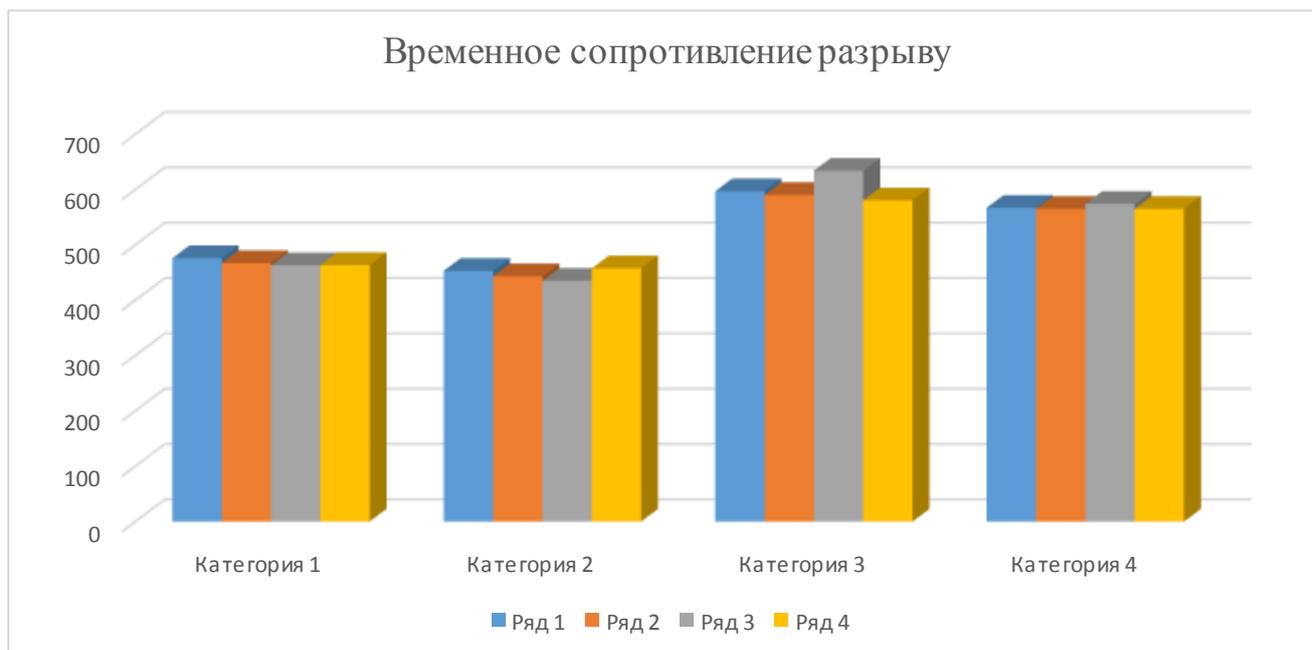
№ образца	Электроды	Место разрушения	Временное сопротивление разрыву, Н/мм	Угол изгиба, мм	Ударная вязкость, Дж/см	
638	Bohler fox nibas 70/20	Основной металл 12Х18Н10Т	597	110	14,13	
640	ЦТ-28	Основной металл 12Х18Н10Т	590	82,5	14,4	
639	АНЖР-1	Основной металл 12Х18Н10Т	634	100	14,9	
641	ОЗЛ-25Б	Основной металл	580,5	65	10,07	

В четвертом эксперименте на кромки катушек из стали Р91 произвели наплавку буферного слоя электродами АНЖР-1, ОЗЛ-25Б, ЦТ-28, Bohler fox nibas 70/20, наплавку вели кольцевыми ниточными сварными швами с предварительным и сопутствующим подогревом и медленным остыванием под слоем теплоизоляции. После наплавки провели термообработку катушек для снятия напряжений в наплавленном слое и зоне термического влияния. Термообработку производили по режиму: нагрев до $t=750^{\circ}\text{C}$, выдержка 120 минут, охлаждение под слоем теплоизоляции. Скорость нагрева и охлаждения со скоростью $100-150^{\circ}\text{C}/\text{час}$. Наплавленный слой получили толщиной 10-12мм (данная толщина буферной зоны необходима для исключения воздействия термического влияния на основной металл при

последующей сварке). Затем произвели механическую обработку кромок на токарном станке, с такой же разделкой кромок согласно НТД (рис. 2.1). Затем произвели сварку наплавленных кромок труб из закаливающейся стали с трубой из аустенитной стали встык по технологии сварки с наименьшим проплавлением основного металла, без предварительного подогрева и без последующей термообработки. Катушки сварили электродами АНЖР-1, ОЗЛ-25Б, ЦТ-28, Bohler fox nibas 70/20 соответственно с металлом наплавки и провели механические испытания на разрыв, загиб, ударную вязкость (таблица 2.8).

Таблица 2.8 - Механические испытания образцов сварных соединений Р91 и 12Х18Н10Т (с наплавкой буферной зоны)

№ образца	Электроды	Место разрушения	Временное сопротивление разрыву, Н/мм	Угол изгиба, мм	Ударная вязкость, Дж/см	
638	Bohler fox nibas 70/20	Основной металл 12Х18Н10Т	567	92,5	14,7	
640	ЦТ-28	Основной металл 12Х18Н10Т	565,5	72,5	15,1	
639	АНЖР-1	Основной металл 12Х18Н10Т	574	88	15,5	
641	ОЗЛ-25Б	Основной металл 12Х18Н10Т	565	54	10,2	



Категория 1 – сталь 12Х1МФ+12Х18Н10Т

Категория 2 - сталь 12Х1МФ+12Х18Н10Т с наплавкой буферной зоны

Категория 3 – сталь Р91+12Х18Н10Т

Категория 4 - сталь Р91+12Х18Н10Т с наплавкой буферной зоны

Ряд 1 – электроды Boehler Fox Nibas 70/20

Ряд 2 – электроды ЦТ-28

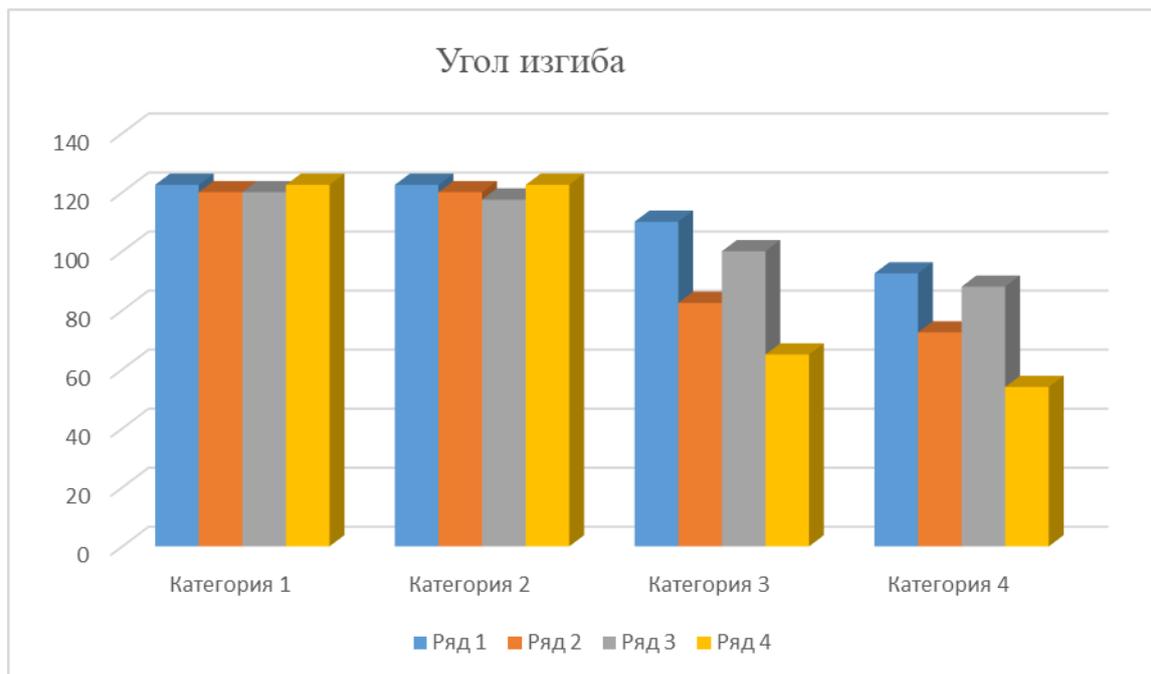
Ряд 3 – электроды АНЖР-1

Ряд 4 – электроды ОЗЛ-25Б

Рисунок 2.10 – Диаграмма 2.1



Рисунок 2.11 - Образцы после испытаний



Категория 1 – сталь 12Х1МФ+12Х18Н10Т

Категория 2 - сталь 12Х1МФ+12Х18Н10Т с наплавкой буферной зоны

Категория 3 – сталь Р91+12Х18Н10Т

Категория 4 - сталь Р91+12Х18Н10Т с наплавкой буферной зоны

Ряд 1 – электроды Boehler Fox Nibas 70/20

Ряд 2 – электроды ЦТ-28

Ряд 3 – электроды АНЖР-1

Ряд 4 – электроды ОЗЛ-25Б

Рисунок 2.12 - Диаграмма 2.2

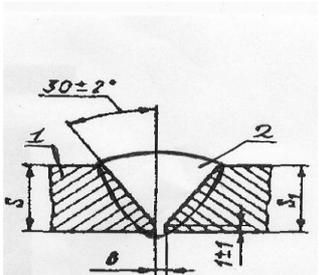
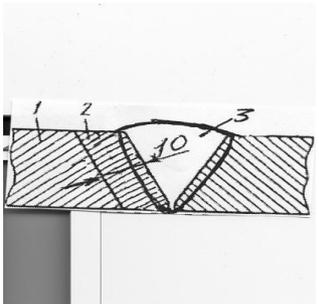
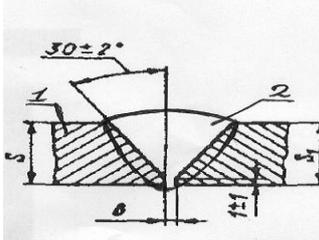
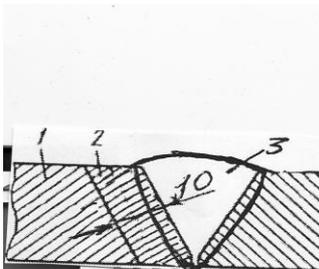
Из проведенных экспериментов видно:

Сталь 12Х1МФ при наплавке буферной зоны и термообработке угол загиба уменьшается от 1,3 до 6% в зависимости от электродов, временное сопротивление разрыву остается неизменным, а ударная вязкость увеличивается от 3 до 8% в зависимости от электродов.

Сталь Р91 при наплавке буферной зоны и термообработке угол загиба уменьшается от 2,7 до 6,5% в зависимости от электродов, временное сопротивление разрыву резко снижается от 12 до 17%, а ударная вязкость

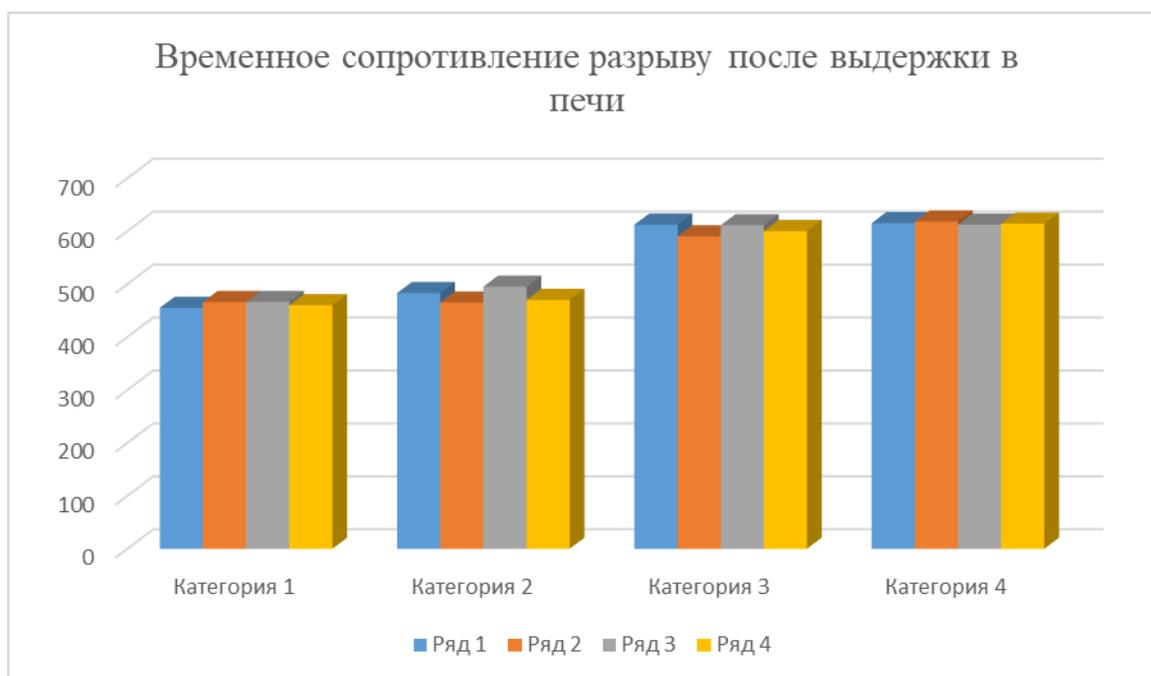
увеличивается от 1,2 до 4,9% в зависимости от электродов. При этом сталь Р91 по сравнению со сталью 12Х1МФ имеет временное сопротивление разрыву на 20% выше.

Таблица 2.9 Способы сварки.

Схема сварки	Способы сварки	Примечание
	<p>Катушки из стали 12Х1МФ, которые после предварительного подогрева до $T=200-250^{\circ}\text{C}$ сварили с катушками из стали 12Х18Н10Т.</p>	<p>1-основной металл 2-сварной шов</p>
	<p>На кромки катушек из стали 12Х1МФ произвели наплавку буферного слоя. Наплавленный слой получили толщиной 10-12мм. Произвели сварку наплавленных кромок труб из закаливающейся стали с трубой из аустенитной стали встык по технологии сварки с наименьшим проплавлением основного металла.</p>	<p>1-основной металл 2-буферный слой 3-сварной шов</p>
	<p>Катушки из стали Р 91, которые после предварительного подогрева до $T=200-250^{\circ}\text{C}$ сварили с катушками из стали 12Х18Н10Т.</p>	<p>1-основной металл 2-сварной шов</p>
	<p>На кромки катушек из стали Р91 произвели наплавку буферного слоя. Наплавленный слой получили толщиной 10-12мм. Произвели сварку наплавленных кромок труб из закаливающейся стали с трубой из аустенитной стали встык по технологии сварки с наименьшим проплавлением основного металла.</p>	<p>1-основной металл 2-буферный слой 3-сварной шов</p>

Для определения прочности при длительном воздействии повышенных температурах был проведен второй этап эксперимента. Сварили катушки идентично первому этапу. Поместили катушки в печь с температурой 600°C. Выдержали образцы в печи при данной температуре 3000 часов. Провели механические испытания на разрыв, загиб, ударную вязкость.

Диаграмма 2.3



Категория 1 – сталь 12Х1МФ+12Х18Н10Т

Категория 2 – сталь 12Х1МФ+12Х18Н10Т с наплавкой буферной зоны

Категория 3 – сталь Р91+12Х18Н10Т

Категория 4 – сталь Р91+12Х18Н10Т с наплавкой буферной зоны

Ряд 1 – электроды Boehler Fox Nibas 70/20

Ряд 2 – электроды ЦТ-28

Ряд 3 – электроды АНЖР-1

Ряд 4 – электроды ОЗЛ-25Б

Рисунок 2.13 - Диаграмма 2.3

Таблица 2.10 - Механические испытания образцов сварных соединений
12X1МФ и 12X18Н10Т

№ образца	Электроды	Место разрушения	Временное сопротивление разрыву, Н/мм	Угол изгиба, мм	Ударная вязкость, Дж/см	
658	Bohler fox nibas 70/20	Основной металл 12X18Н10Т	455	120	12,5	
648	ЦТ-28	Основной металл 12X18Н10Т	466	127	5,6	
651	АНЖР-1	Основной металл 12X18Н10Т	466	132	7,6	
652	ОЗЛ-25Б	Основной металл 12X18Н10Т	460	132	6,0	

Таблица 2.11 - Механические испытания образцов сварных соединений
12X1МФ и 12X18Н10Т (с наплавкой буферной зоны)

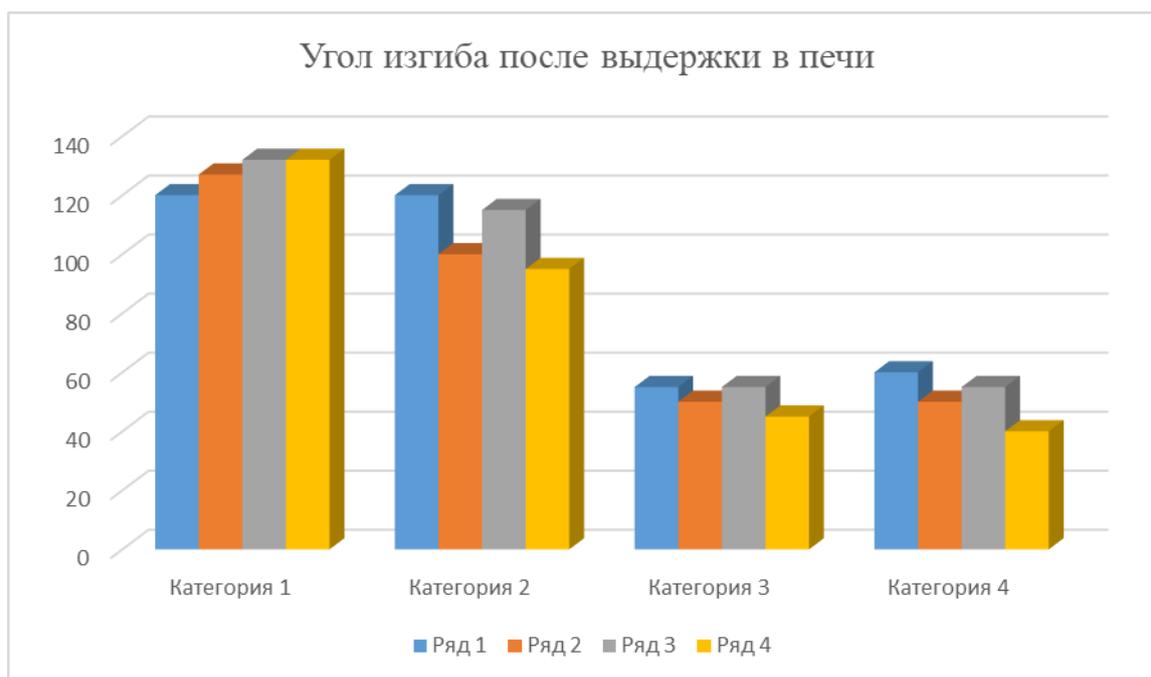
№ образца	Электроды	Место разрушения	Временное сопротивление разрыву, Н/мм	Угол изгиба, мм	Ударная вязкость, Дж/см	Примечание
655	Bohler fox nibas 70/20	Основной металл 12X18Н10Т	483	120	12,5	
649	ЦТ-28	Основной металл 12X18Н10Т	465	100	4,5	
654	АНЖР-1	Основной металл	495	115	8,4	
657	ОЗЛ-25Б	Основной металл	470	95	5,2	

Таблица 2.12 - Механические испытания образцов сварных соединений Р91 и 12Х18Н10Т

№ образца	Электроды	Место разрушения	Временное сопротивление разрыву, Н/мм	Угол изгиба, мм	Ударная вязкость, Дж/см	
665	Bohler fox nibas 70/20	Основной металл 12Х18Н10Т	612	55	10,2	
664	ЦТ-28	Основной металл 12Х18Н10Т	590	50	6,9	
669	АНЖР-1	Основной металл 12Х18Н10Т	611	55	9,4	
667	ОЗЛ-25Б	Основной металл 12Х18Н10Т	600	45	6,7	

Таблица 2.13 - Механические испытания образцов сварных соединений Р91 и 12Х18Н10Т (с наплавкой буферной зоны)

№ образца	Электроды	Место разрушения	Временное сопротивление разрыву, Н/мм	Угол изгиба, мм	Ударная вязкость, Дж/см	
663	Bohler fox nibas 70/20	Основной металл 12Х18Н10Т	615	60	10,7	
662	ЦТ-28	Основной металл	618	50	7,1	
670	АНЖР-1	Основной металл 12Х18Н10Т	612	55	9,5	
668	ОЗЛ-25Б	Основной металл	614	40	8,8	



Категория 1 – сталь 12Х1МФ+12Х18Н10Т

Категория 2 - сталь 12Х1МФ+12Х18Н10Т с наплавкой буферной зоны

Категория 3 – сталь Р91+12Х18Н10Т

Категория 4 - сталь Р91+12Х18Н10Т с наплавкой буферной зоны

Ряд 1 – электроды Voehler Fox Nibas 70/20

Ряд 2 – электроды ЦТ-28

Ряд 3 – электроды АНЖР-1

Ряд 4 – электроды ОЗЛ-25Б

Рисунок 2.14 - Диаграмма 2.4

Из проведенных экспериментов видно, что после длительного воздействия повышенных температур:

Сталь 12Х1МФ при наплавке буферной зоны и термообработке угол загиба уменьшается на 13%, временное сопротивление разрыву повышается на 3%, а ударная вязкость уменьшается на 3,4%.

Сталь Р91 при наплавке буферной зоны и термообработке угол загиба остается неизменным, временное сопротивление разрыву снижается на 2%, а ударная вязкость увеличивается в среднем на 8% в зависимости от

электродов. При этом сталь Р91 по сравнению со сталью 12Х1МФ имеет временное сопротивление разрыву на 28% выше.

Сравнивая результаты экспериментов до и после выдержки при температуре 600°С в течении 3000 часов, можно увидеть что предел прочности, даже увеличивается, но при этом снижается угол загиба у всех сталей.

3 Технологический процесс сварки трубопроводов из разнородных сталей

1. Наименование изделия: технологические трубопроводы из сталей.
2. Способ сварки: ручная дуговая (РД).
3. НТД по сварке: РД 38.13.004-86, Руководство по безопасности «Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов», СНиП 3.05.05-84, ГОСТ 16037-80.
4. Основной материал: Группа материалов: М05 + М11. Р91+12Х18Н10Т
5. Соединение: Вид соединения – стыковое. Вид разделки: V образная. Тип соединения. С17 по ГОСТ 16037-80.
6. Способ подготовки кромок.

Резка заготовок и подготовка кромок под сварку производить механическим способом. После огневых резки труб из закаливаемых теплоустойчивых сталей, подготовленные кромки проконтролировать капиллярной или магнитопорошковой дефектоскопией, или травлением. Обнаруженные трещины вышлифовать шлифмашинкой. Подготовку кромок производить шлифмашинкой или станком.

Все местные уступы и неровности, имеющиеся на кромках собираемых труб и препятствующие их соединению в соответствии с требованиями чертежей или НТД, следует до сборки устранить с помощью абразивного круга, не допуская острых углов и резких переходов.

Отклонение от перпендикулярности обработанного под сварку торца трубы относительно образующей не должно быть более:

1,5мм – для Ду свыше 125 до 500мм;

2,0мм – для Ду свыше 500мм.

7. Способ сборки: на прихватках или в сборочном приспособлении.

Сборка стыков труб под сварку должна производиться с использованием центровочных приспособлений, обеспечивающих требуемую соосность стыкуемых труб и равномерный зазор по всей окружности стыка, а также с помощью прихваток или привариваемых на расстоянии 50-70мм от торца труб временных технологических креплений. Технологические крепления должны быть изготовлены из стали того же класса, что и свариваемые трубы. При сборке стыков из закаливающих теплоустойчивых сталей технологические крепления могут быть изготовлены из углеродистых сталей.

8. Требования к прихватке: прихватки располагать равномерно по окружности стыка.

Количество прихваток и их протяженность зависят от диаметра труб и должны соответствовать:

Таблица 3.1 - Количество прихваток в зависимости от диаметра трубопровода

Диаметр труб, мм	Свыше 50 до 100	Свыше 100 до 426	Свыше 426
Число прихваток по периметру	1-3	3-4	Через 300 - 400
Протяженность одной прихватки, мм	20-30	30-40	40-60

Высота прихваток должна быть равна 5-6мм.

Температура подогрева стыков труб перед прихваткой и сваркой дуговыми способами при положительной температуре окружающего воздуха.

Таблица 3.2 Температура подогрева теплоустойчивых сталей

Марка стали свариваемых деталей	Температура подогрева, °С
12МХ, 15ХМ	200-250
12Х1МФ	200-250

Таблица 3.3 - Режимы сварки

Номер слоя шва	Способ сварки	Диаметр электрода, мм	Род тока, полярность.	Сила тока, А	Напряжение, В	Дополнительные параметры
Прихватки и 1 слой	РД	2,5	Постоянный, обратная	70-90	Не более 28	
		3,0		90-110		
≥2 слои	РД	3,0	Постоянный, обратная	90-110	Не более 28	
		4,0		120-150		
		5,0		150-180		

Режим откорректировать пробной сваркой на образцах.

13. Технологические требования к сварке: Прихватку и сварку корневого шва выполнять дугой не более величины диаметра электрода (2,5-3,0 мм). При сварке трубопровода для качественной сварки стараться выполнять поворотные стыки. Сварку вести в нижнем положении.

При вертикальном положении шва величину сварочного тока уменьшать на 10-20 % по сравнению с нижним. Сварку выполнять многослойным швом. Валики второго и последующих слоев производить с

учетом смещения «замков». Величина перекрытия мест начала и окончания каждого валика составляет 12-18 мм.

Перед сваркой подогреть кромки теплоустойчивой стали до температуры 150-200°C. Сварку вести ниточными швами без перерыва в работе. После сварки обеспечить медленное охлаждение под слоем матов.

После сварки каждого валика шов очищать от шлака и брызг металла и производить контроль поверхности шва на отсутствие внешних дефектов. Высота валиков составляет 6-10 мм, ширина не более 35 мм. Сварку кольцевых швов выполнять обратноступенчатым способом участками длиной 250-300 мм. Законченный сварочный шов должен перекрывать свариваемые кромки стыковых соединений элементов на 1-3 мм. Клеймить сварные швы на расстоянии 20-50 мм от шва с наружной стороны, у продольных швов $L > 400$ мм ставятся 2 клейма: в начале и конце шва на расстоянии 100 мм от кольцевого шва, у кольцевого шва клеймо выбивается через каждые 2 м в местах пересечения с продольным швом.

14. Термообработка сварных швов. Не требуется.

15. Требования по контролю качества сварного соединения:

15.1. Операционный контроль:

Перед сваркой следует контролировать размеры конструктивных элементов.

В процессе сварки контролю подлежат: температура деталей и окружающего воздуха, порядок сварки, режим сварки, толщина и ширина валика шва, технологические параметры процесса сварки.

После сварки контролю подлежат: клеймение шва, размеры выполненного шва, величина увода кромок (угловатость) и качество сварного соединения.

15.2. Приемочный контроль:

Таблица 3.4 - Методы и объёмы приёмочного контроля качества сварных соединений

Метод контроля	Объем контроля	НД по методике контроля	НД по оценке качества
Визуальный и измерительный	100 %	РД 03-606-03	п. 18.114-18.115 РД 38.13.004-86, Руководство по безопасности «Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов» п. 331-332
Радиографический	100 %	ГОСТ 7512-82, ОСТ 36-49-81, п. 4.13 СНИП 3.05.05-84	п. 18.120 и табл. 65 и 66 РД 38.13.004-86, п. 4.12 и Приложение 4 СНИП 3.05.05-84, Руководство по безопасности «Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов» п. 332-334, п. 342 приложения 14 и 16
Стилоскопирование	100 %	РД 26-260-15-2001, раздел 4	РД 26-260-15-2001 раздел 4 (табл. 1 и 2), Руководство по безопасности «Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов» п. 346

Продолжение таблицы 3.4

Растяжение	2 образца	ГОСТ 6996-66	п. 18.127 РД 38.13.004-86, Приложение 3 СНиП 3.05.05-84, Руководство по безопасности «Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов» п. 358
Статический изгиб	2 образца	ГОСТ 6996-66	п. 18.127, табл. 67 РД 38.13.004-86, Приложение 3 СНиП 3.05.05-84, Руководство по безопасности «Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов» п. 358
Твердость	Не менее трёх участков в разных местах по периметру стыка	ГОСТ 6996-66	п. 18.127, табл. 67 РД 38.13.004-86, Руководство по безопасности «Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов» п. 347 приложение 18
Макроструктура	1 образец	ГОСТ 10243-75, п. 18.129 РД 38.13.004-86	п. 18.129 РД 38.13.004-86

Продолжение таблицы 3.4

Микроструктура	1 образец	ГОСТ 5639-82, п. 18.129 РД 38.13.004-86	п. 18.129 РД 38.13.004-86
Ударный изгиб	3 образца	ГОСТ 6996-66	п. 18.127, табл. 67 РД 38.13.004-86; Приложение 3 СНиП 3.05.05-84, Руководство по безопасности «Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов» п. 358
Гидравлические (или пневматические) испытания	100%	Раздел 14 РД 38.13.004-86	Раздел 14 РД 38.13.004-86 п. 373-389 Рекомендаций по устройству и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов

Сравнивая результаты образцов до выдержки при высоких температурах и после выдержки, можно сделать заключение.

Закключение.

1. При сварке стали 12Х1МФ все электроды показали хорошие результаты как при наплавке буферной зоны, так и без наплавки. Временное сопротивление разрыву и угол загиба соответствуют требованиям НТД. Вследствие этого наплавку буферной зоны можно не проводить. Это даст экономию времени и трудовых ресурсов при аварийных ремонтах и внеплановых остановках.

2. Сталь Р91 имеет выше предел прочности чем у стали 12Х1МФ до 30%, ее применение позволит снизить толщина стенки коллектора, а соответственно и его вес.

3. При сварке стали Р91 электроды Bohler fox nibas 70/20, ЦТ-28, АНЖР-1 показали хорошие результаты как при наплавке буферной зоны, так и без наплавки. Временное сопротивление разрыву и угол загиба соответствуют требованиям НТД. Можно рекомендовать их к применению при сварке данной стали.

4. Электроды ОЗЛ-25б имеют хороший предел прочности, но угол загиба меньше, чем регламентируется РД. Для сварки стали Р91 их применять нельзя. При сварке стали 12Х1МФ со сталью 12Х18Н10Т при повышенных температурах (300-350°С) электроды ОЗЛ-25б показали самую высокую стойкость к образованию горячих трещин. Можно рекомендовать данные электроды при сварке оборудования из стали 12Х1МФ при ремонтах, если оборудование невозможно охладить.

5. Ударная вязкость не регламентируется РД, но необходимо отметить, что после выдержки при температуре 600°С, резко снижается, особенно у стали Р91 как при наплавке буферной зоны, так и без нее.

6. Твердость сварного шва, основного металла и околошовной зоны после сварки до и после выдержки при температуре 600°С находится в пределах нормы согласно РД.

7. Разработан технологический процесс сварки трубопроводов из разнородных сталей.

Список использованных источников

1. ГОСТ 20072-74 Сталь теплоустойчивая. Технические условия.
2. СТО 00220368-011-2007 Сварка разнородных соединений сосудов, аппаратов и трубопроводов из углеродистых, низколегированных, теплоустойчивых, высоколегированных сталей и сплавов на железоникелевой и никелевой основах. Стандарт предприятия.
3. Готальский Ю.Н. Сварка разнородных сталей [Текст]: / Ю.Н. Готальский – Киев: Техника. -1981. -183с.
4. Чаев А.М. Сварка разнородных сталей [Текст]: А.М.Чаев/ Сварка сталей разных структурных сталей. – 1989. -№6. -С.10-16.
5. Фолиянц А.Е. РД 38.13.004-86 Эксплуатация и ремонт технологических трубопроводов под давлением до 10,0 Мпа. [Текст]:/ А.Е. Фолиянц – М.: Химия, 1988. - 288с.
6. Рябов В.Р. Сварка разнородных металлов и сплавов [Текст]: / В.Р. Рябов. – М.: Машиностроение. – 1984. – 239с.
7. Закс И.А. Сварка разнородных сталей [Текст]: / И.А. Закс – Л.: Машиностроение. – 1973. – 208с.
8. Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов [Текст]: / А.С. Зубченко. М.: Машиностроение. – 2003. – 784с.
9. Положение о выпускной квалификационной работе –Тольятти: ТГУ, 2011. – 19с.
- 10.Егоров, А.Г. Правила оформления выпускных квалификационных работ для бакалавриата и специалитета: учебно-методич пособие по выполнению дипломного проекта [Текст] /А.Г. Егоров, Г.Н. Уполовникова, И.А. Живоглядова.- Тольятти.: ТГУ, 2011.- с.8-87
- 11.Казаков Ю.В. Преддипломная практика/ Сост– Тольятти: ТГУ, 2007. - 13 с.
- 12.Акулов, А.И. Сварка в машиностроении: справочник: в 4 т. Т. 2 [Текст]

- / под ред. А.И. Акулова. - М.: Машиностроение, 1978. - 462 с. - Библиогр. в конце гл. - Предм. указ.: с. 454-462
13. Блюм Р. Новые марки высокотемпературных феррито-мартенситных сталей из США, Японии и Европы. Сборник докладов на международной конференции, посвященной оценке остаточного ресурса и продлению срока службы энергоблоков ТЭС, работающих на органическом топливе. — М.: ВТИ, 1994.
 14. Готальский Ю.Н. Особенность кристаллизации металла шва в зоне сплавления разнородных сталей [Текст] – Ю.Н. Готальский / Автоматическая сварка. – 1971. - №6. - с.12-15
 15. Земзин В.Н. Сварные соединения разнородных сталей. [Текст]: / В.Н. Земзин. - М.: Машиностроение, 1972 - 272с.
 16. Лившиц Л.С. Вопросы сварки сталей разнородных структурных классов [Текст]:/ Л.С.Лившиц / Сварочное производство. – 1962. - №11. - с.8-10.
 17. Петров Г.Л. Неоднородность металла сварных соединений. [Текст]: / Г.Л. Петров/ Л., Судпромгиз, 1963, 206с.
 18. Кириличев Н.В., Готальский Ю.Н. Особенность структурной неоднородности в зоне сплавления многослойного аустенитного шва с перлитной сталью. [Текст]: / Н.В. Кириличев Ю.Н. Готальский – Автоматическая сварка. 1980, №9, с. 28-32.
 19. Лазько В.Е., Борисов М.Т., Поплавко М.В. Сварка разнородных сталей высокой прочности. [Текст]: / В.Е. Лазько, М.Т. Борисов М.: МДНТП, 1980, с 140.
 20. Готальский Ю.Н., Снисарь В.В. О содержании никеля в металле шва сварных соединений аустенитных сталей с неаустенитными. [Текст]: / Ю.Н. Готальский, В.В. Снисарь Автоматическая сварка, 1968, №12, с. 9-13
 21. Никитин В.М. Особенности кристаллизации металла шва при сварке плавлением разнородных металлов. [Текст]: / В.М. Никитин Сварочное

- производство, 1973, №5, с. 53-55
22. Haddril D.M., Barker R.G. Microcracking in austenitic weld metal. [Текст]: / «British Welding Journal» 1965, 12, №8, p. 411-419.
 23. Dean C. Philips. Welding metals of dissimilar strengths. [Текст]: / «The Fabricator», 2010, №5, p. 45-49.
 24. Mougnot R., Hanninen H. Microstructures of nickel-base alloy dissimilar metal welds. [Текст]: / Department of Engineering Design and Production. 2013. С. 178.
 25. Article: Welding stainless steels to other steels [электронный ресурс]/ - 2010. – Режим доступа: <http://www.bssa.org.uk/>, свободный
 26. Welding of dissimilar metals. [электронный ресурс]/ - 2012. – Режим доступа: <http://www.totalmateria.com>, свободный
 27. Земзин В.Н., Шрон Р.З. Термическая обработка и свойства сварных соединений. [Текст]: / В.Н. Земзин, Р.З. Шрон Л., Машиностроение, 1978
 28. Стародубцев А.Е., Арчаков С.В. Особенности диагностирования сварных соединений технологический трубопроводов и печных змеевиков из сталей типа 15Х5М, 12Х2М1, заваренных электродами аустенитного класса. [Текст]: / Молодой ученый. №6 2015 – с. 218-222
 29. Киселев С.Н. Температурные поля при сварке цилиндрических оболочек из разнородных металлов. [Текст]: / Сварочное производство, 1975, №12, с.1-3
 30. Рябов В.Р., Рабкин Д.М. Сварка разнородных металлов и сплавов. [Текст]: / В.Р. Рябов, Д.М. Рабкин М.: Машиностроение, 1984. – с.239