



# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА	
1.1 Анализ полимерных материалов для строительства магистральных трубопроводов	8
1.2 Использование полиэтиленовых трубопроводов в газовой отрасли	12
1.3 Развитие технологии соединения полимерных труб	13
1.4 Обзор способов сварки полимерных труб	19
1.5 Задачи диссертационного исследования и методы их решения	30
2 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СВАРКИ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ	
2.1 Описание операций технологического процесса	31
2.2 Описание оборудования	35
2.3 Компоновочная схема установки для сварки магистрального трубопровода из полимерных труб	38
2.4 Проблема сварки полимерных труб при пониженных температурах	45
2.5 Описание технического решения проблемы	49
3 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБ	
3.1 Параметры процесса сварки полимерных труб	54
3.2 Общие сведения по методикам контроля	57
3.3 Методика визуально-измерительного контроля	59
3.4 Методика испытания на осевое растяжение	64
3.5 Методика ультразвукового контроля	68

3.6 Методика испытания на статический изгиб_____	70
3.7 Улучшенная методика испытания на осевое растяжение_____	72
ЗАКЛЮЧЕНИЕ_____	84
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ_____	86

## ВВЕДЕНИЕ

Система промышленных трубопроводов в России является одной из самых развитых в мире. Об этом свидетельствует тот факт, что суммарная протяженная трубопроводов нефтяной и газовой промышленности – более 500 тысяч км. При этом суммарная протяжённость всех наружных трубопроводов – более 15 миллионов км.

Одной из текущих проблем российских трубопроводов – является их высокая степень износа. По этому показателю Российская Федерация занимает первое место в мировом рейтинге. Данная проблема связана с высоким возрастом трубопроводных систем – основные магистрали строились 30-50 лет назад.

Другая проблема износа трубопроводов – агрессивное воздействие на металл транспортируемой среды. Так, по статистике, на нефтяных трубопроводах в результате коррозионной деградации ежегодно происходит от 40 до 79 тысяч отказов. Каждый отказ трубопровода влечет за собой не только необходимость выполнения котлованов, но и наносит вред экологии. В литературных источниках указано [1], что износ нефтяных трубопроводов достиг значения 60 %.

В настоящий момент на нефтегазовый сектор РФ действуют следующие негативные внешние факторы:

1) рост курса иностранной валюты, что делает весьма дорогостоящим осуществление ремонта и замены труб с применением иностранного оборудования и материалов;

2) уменьшение биржевой стоимости энергоносителей, что заставляет снижать себестоимость работ по поддержанию жизнеспособности и вводу в эксплуатацию новых объектов газонефтяного комплекса;

3) действие ограничений на поставку в РФ интеллектуальных технологий, что требует применения отечественных разработок;

4) стремительное схлопывание экономики РФ, что требует предложения высокоэффективных технологических приёмов, не требующих существенных затрат времени и подготовки производства.

В последнее время в нефтегазовой отрасли начинают набирать популярность трубы из полимерных конструкций. При этом варианты уже существуют следующие варианты из применения – напорные системы, выкидные линии скважин, коллекторы, инфраструктурные инженерные системы.

Использование полимерных материалов позволяет достигнуть таких полезных эффектов, как снижение материалоемкости, сокращение временных затрат на строительство, повышение экологичности, экономия других материалов.

Исследованиям в данной теме занимаются такие ученые, как Моисеев Ю.В., Удовенко В.Е., Поспелов А.М, Шухов В.Г., Агапчев В.И., Ромейко В.С., Каргин В.Ю., Бажанов В.Л. , Киселев. Б.А. , М.Н. Боктицкий, Шевченко А.А., Капустин К.Я. , А.Н. Громов, Рейтлингер С.А. и др.

При строительстве трубопроводов из полиэтилена основным техпроцессом, обеспечивающих надёжность транспортировки сред является сварка. При этом для плавления и сварки труб чаще всего используется нагревающий инструмент. Нагрев свариваемых поверхностей труб осуществляется путем их физического контакта с поверхностью нагреваемого инструмента.

Для того, чтобы соединенность нагретые поверхности свариваемых труб необходимо их сжать, но для этого требуется прерывать подачу тепла, чтобы отвести нагревательных элемент. Поэтому процесс нагрева носит прерывистый характер. Получение сварного шва полимерных труб можно разделить на 3 этапа [2]: обеспечение нагрева поверхностей труб, технологическая пауза для отвода нагревательного инструмента, формирование шва путем сдавливания деталей и выдерживания из под

давлением в течении времени, обеспечивающем охлаждение и релаксационные процессы в соединении.

Параметры режима сварки влияют на структуру материала в зоне шва, что, впоследствии, оказывает значительное влияние на надежность сварного соединения в процессе эксплуатации трубопровода [3-4]. Считается, что режимы сварки обеспечивают качественные характеристики получаемого соединения [5-6].

Таким образом, по причины сильного износа промышленных трубопроводов, а также из-за необходимости повышения их надежности в процессе эксплуатации, актуальным является проведение исследований, направленных на развитие в нефтяной и газовой отраслях транспортировки сред по трубам из полимерных материалов. Также требуется разработка рекомендаций по способам применения таких трубопроводов.

Однако использование данной технологии сварки в холодном климате затруднено. Это связано с тем, что в случае низкой температуры окружающего воздуха отсутствует технология получения надежных сварочных соединений.

В нормативной документации по сварки полиэтиленовых труб встык указан температурный диапазон (от  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $+45^{\circ}\text{C}$ ) обеспечивающий возможность проведения сварки без дополнительных мероприятий. Прочность сварного соединения обеспечивается соблюдением теплового режима.

При температурах окружающего воздуха ниже значения, указанного в нормативных документах сварку разрешено проводить при использовании отапливаемых конструкций. Однако возведение таких конструкций связано трудоемкими работами, а их использование связано с большими энергетическими затратами. Кроме того, временные затраты при аварийных случаях не допустимы.

Учитывая вышесказанное, актуальной направления стоит признать разработку матмодели тепловых процессов, возникающих при сварке труб

из полиэтилена. При этом математическая модель должна учитывать основные процессы, влияющие на температурные показатели сварки и обеспечивать обоснование расширения при сварке допустимых температур окружающего воздуха.

Цель магистерской диссертации – повышение производительности и качества выполняемых работ при ремонтной и монтажной сварке полимерных трубопроводов на основе изучения тепловых и физических процессов в свариваемом соединении.

# 1 ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

## 1.1 Анализ полимерных материалов для строительства магистральных трубопроводов

С развитием материаловедения при строительстве нефтегазовых магистралей и ремонте старых трубопроводов все чаще применяются полимерные материалы.

Использование полимерных материалов позволяет достигнуть таких полезных эффектов, как снижение материалоемкости, сокращение временных затрат на строительство, повышение экологичности, экономия других материалов (например, горюче-смазочных).

Порядок применения полимерных труб в системах газоснабжения, основные положения по безопасности их использования описаны в нормативно-правовой документации [7].

Практика использования полиэтилена для газовых трубопроводов с рабочим давлением до 1,2 МПа показала хорошие результаты. Это связано с тем, что полиэтилен обладает низкой газопроницаемостью, стойкостью к коррозии, высокой эластичностью, ударопрочностью при температурах  $-20...+30$  °С, надежностью соединения, экономичностью и экологичностью изготовления элементов труб и соединительных муфт, простотой монтажа труб.

По сравнению с другими термопластами полиэтилен обладает наилучшей длительной прочностью при эксплуатационной температуре до  $+30$  °С [8].

Агрессивное воздействие сред на полимерную основу композиционного материала приводит к возникновению таких процессов, как окисление, гидролиз, гидратации. Это процессы имеют свои особенности, связанные с гетерогенностью системы. Начало разрушения имеет место на поверхности раздела «полимер-наполнитель» и вызвано снижением их

адгезионных качеств, снижения связи между ними. При этом воздействие среды может способствовать к вымыванию связующего материала. Два этих процесса нарушают структуру композиционного материала.

Ниже представлены диффузионные коэффициенты, коэффициенты проницаемости, растворимость газов термопластах (таблица 1.1). Для органических газов аналогичные показатели представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.1 – Коэффициенты влияния газов на различные термопласты при температуре 20 °С [8]

Вид термопласта	Показатель	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
Полиэтилен высокого давления	D·10 <sup>10</sup>	0,46	0,37	-	0,33
	P·10 <sup>17</sup>	1,9...2,6	7,3...12,2	5,7	0,25
	S·10 <sup>7</sup>	4,8	25,8	-	-
Полиэтилен низкого давления	D·10 <sup>10</sup>	0,17...0,2	0,12	-	-
	P·10 <sup>17</sup>	0,3...0,5	2,8...4,2	1,3...1,4	0,075
	S·10 <sup>7</sup>	1,8	2,2	-	-
Полипропилен	P·10 <sup>17</sup>	0,76...1,1	3,0...5,0	4,1...12,3	0,009
Поливинилхлорид	D·10 <sup>10</sup>	0,004...0,012	0,0012	2,3...2,74	0,0014
	P·10 <sup>17</sup>	0,034...0,09	0,1...0,76	-	-
	S·10 <sup>7</sup>	2,92	47,7	0,06	-
Поливинилденхлорид	P·10 <sup>17</sup>	0,002...0,004	0,012...0,022	0,06	0,023
Поливинилфторид	D·10 <sup>10</sup>	0,03	0,0013	-	-
	P·10 <sup>17</sup>	0,002...0,015	0,09...0,068	0,266	-
	S·10 <sup>7</sup>	0,09	0,5	-	-
Полистирол	D·10 <sup>10</sup>	0,11	0,058	4,36	-
	P·10 <sup>17</sup>	1,1...1,52	5,7...6,8	6,9...11,3	0,29

Из таблицы 1.1 видно, что, гетероцепные полимеры (к ним относятся полиформальдегид, полиамиды) обладают меньшей проницаемостью и сорбционностью, чем полиолефины.

Если рассматривать органические газы (таблица 1.2), то проницаемость полипропилена в 2...3 раза меньше, чем у полиэтилена.

При росте температуры газа проницаемость и полиэтилена и пропилена увеличивается. Но для полипропилена проницаемость все равно ниже.

Таблица 1.2 – Проницаемости полиэтилена и полипропилена при использовании углеводородного газа при температурах +20...+60 °С

Вид полимера	$P \cdot 10^{17}, \text{ м}^2/(\text{с} \cdot \text{Па})$				
	температура	метан	этилен	этан	пропан
Полиэтилен	20 °С	1,4...1,7	7,9...9,0	7,9...16,0	8,8...13,7
	40 °С	4,7...5,1	14,3...15,9	14,0...19,6	23,0...35,7
	60 °С	6,4...7,3	15,0...18,7	19,9...22,0	33,0...40,8
Полипропилен	20 °С	0,4...0,5	2,8...4,0	2,5...5,8	1,3...3,99
	40 °С	1,3...1,9	8,2...10,15	4,9...10,8	5,5...5,88
	60 °С	4,1...4,5	10,99...14,6	11,76...20,0	10,7...15,8

Испытания полиэтиленовых трубопроводов показывают, что данный материал обладает достаточно высокой стойкостью к природному газу, но при использовании пропан-бутановой смеси его стойкость оказалась ниже.

Лабораторные эксперименты показывают, что под действием пара данных газов полиэтилен склонен к набуханию. Воздействие жидких фаз данного газа приводит к снижению массы полиэтилена.

На трубах изготовленных из полиэтилена низкого давления этот эффект усугубляется – набухание и потеря массы происходит быстрее.

ГОСТ 16338 описывает полиэтилен низкого давления (высокой плотности), производимый суспензионным и газофазным способами полимеризации при низком давлении на металлоорганических катализаторах в суспензии [9].

ТУ 6-11-00206368-25-93 описывает полиэтилен низкого давления (всех плотностей), получаемый при низком давлении газофазным методом

полимеризации этилена на носителе на металлоорганических катализаторах [10].

Компания «Fina Chemicals», подразделение SA «Petrofina» занимает лидирующее положение по производству гранулированного полиэтилена, используемого для газовых трубопроводов. Данное производство было открыто около 20 лет назад. Данная компания покрывает около 40 % потребностей в материале в европейской части рынка и порядка 10 % мировых потребностей. Продукция «Fina Chemicals» задействована на производстве газовых полиэтиленовых труб в большинстве стран, строящих новые газопроводные системы. При этом программа испытаний производимой продукции соответствует требованиям, предъявляемым такими газовыми компаниями, как «British Gas», «Gas de France» и др. [11].

Компания «Solvay» является производителем полиэтилена высокой, а также средней плотности марок ELTEX TUB. Производство осуществляется по собственной запатентованной технологии, основанной на использовании катализаторов Циглера-Натта (производство Франции, Бразилии, Италии, США) и процесса Филипса на хромовом катализаторе (производство США и Бельгия). Сейчас данное производство входит в состав компании компанией Wienerberger [12].

Все марки ELTEX TUB отличаются простотой перерабатываемости на оборудовании таких зарубежных фирм, как («Battenfeld», «Rayfenhozyer», «Krauss Maffei», «Cincinnati Milakron», «Weber» ) [13].

В Российской Федерации также производят также производят газовые трубы на экструдерах, производство «Трузиома» и производство большевик «Большевик». Помимо труб здесь производятся муфты, различных размеров и фитинги. Трубы произведенные из полиэтилена обладают стойкостью к образованию трещин, высокий ресурс работы, стойкость к разложению от света. Примечательно, то при коэффициенте безопасности больше двух, труба выдерживает номинальное значение напряжения при растрескивании 5 МПа в течение не менее 20 лет.

## 1.2 Использование полиэтиленовых трубопроводов в газовой отрасли

Благодаря развитию материаловедения и в частности производства пластмасс учёные начали рассматривать возможность применения полиэтилена для производства нефтяных и газовых трубопроводов [20, 21].

Позже в 1964 году был проложен газовый трубопровод общей длиной порядка 1460 м, который располагался около города Тамбов. Данный трубопровод рассчитан на использовании при среднем давлении газа. При его строительстве использовались трубы длиной 30 метров, диаметр которых составлял 100 мм. Соединение труб осуществлялось с использованием муфт [22].

Чуть позже в 1965 году был введен в эксплуатацию газовый трубопровод общей длины 1150 метров диаметр труб (200 мм). Данный трубопровод расположен вблизи города Уфа. Однако при строительстве данного газопровода температура окружающего воздуха была ниже допустимой. Поэтому были приняты дополнительные мероприятия по устройству тепляка, благодаря чему температуру удалось повысить до приемлемых значений  $-12...-18$  °С [23].

На момент 1998 г. в Российской Федерации в эксплуатацию было введено порядка 11 тысяч км трубопроводов из полиэтилена [24].

Одновременно с этим не останавливались и исследования по трубопроводам из пластмасс в промышленных транспортных системах [25].

В последнее время при производстве трубопроводов для нефти и газа стали применяться стойкие к агрессивному воздействию среды материалы – стеклопластик, полиэтилен и т.д.

Так в Башкортостане введен в эксплуатацию газовый трубопровод диаметром 160 мм и общей длины 12 километров материалом которого служит полиэтилен: марка труб ПЭ 80ГАЗ SDR11(UJCN 50838).

Пропускная способность газового трубопровода равна 0,7 миллионов м<sup>3</sup>/год.

В этом случае сварка труб из полиэтилена выполнялась встык. При сварке соединяемые детали (тубы и муфты) сжимались под давлением 200 кПА [25].

### 1.3 Развитие технологии соединения полимерных труб

В нормативной документации [14] по сварки полиэтиленовых труб встык указан температурный диапазон (от -15 °С до +45 °С) обеспечивающий возможность проведения сварки без дополнительных мероприятий. Прочность сварного соединения обеспечивается соблюдением теплового режима. При температурах окружающего воздуха ниже значения, указанного в нормативных документах сварку разрешено проводить при использовании отапливаемых конструкций. Однако возведение таких конструкций связано трудоемкими работами, а их использование связано с большими энергетическими затратами.

В работе [15] используется метод предварительного прогрева для сокращения зазора между фитингом (муфтой) и трубой за счет расширения фитинга. Во время предварительного прогрева в зоне контакта труба-фитинг создается температура ниже температуры плавления полиэтилена.

Недостатком такого технического решения является то, что создать такое тепловое воздействие, действующее локально непосредственно на поверхность трубы, возможно лишь с помощью фитинга с открытой нагревательной спиралью. Поэтому метод неприменим с фитингами с закрытой нагревательной спиралью, а также данное техническое решение неприменимо для сварки при температурах ниже регламентированных без строительства специального сооружения.

Одним из главных показателей обеспечивающих выбор режимов сварки труб из полиэтилена является обеспечение границ зоны

термического влияния (ЗТВ). Этим же показателем руководствуются и при оценке качества соединения.

ЗТВ – это та область в корой происходят структурные изменения материала по действием температур. В настоящее время ЗТВ определяется опытным путем, с последующим исследованием структурных показателей. Обычно принимают, что структурные изменения происходят при температурах выше температуры размягчения материала [16, 17].

В предлагаемом техническом решении [18] очистка и циклевка от загрязнений свариваемых поверхностей, установка и закрепление концов свариваемых труб в зажимах центрирующего приспособления с одновременной посадкой детали с закладным нагревателем. Перед проведением сварки на отрезки полимерных труб и деталь с закладным нагревателем наматывают теплоизоляционный материал, толщину которого определяют расчетным путем из условия обеспечения такого же темпа охлаждения соединения в диапазоне температур окружающего воздуха от + 50°С до -15°С, как и при допустимых температурах окружающего воздуха без теплоизоляции. Деталь с закладным нагревателем подключают к источнику питания для предварительного прогрева. Продолжительность и мощность прогрева находят расчетами теплового процесса сварки из условия достижения однородного распределения заданной температуры в детали с закладным нагревателем и трубе.

После прогрева, во время технологической паузы к клеммам муфты переключаются токоподводящие провода от сварочного аппарата. Считывающим карандашом сварочного аппарата проводится считывание штрих-кода и запуск сварки, при этом датчик температуры находится в среде, где температура поддерживается равной значению заданной температуры. После запуска сварка соединяемых деталей проходит в автоматическом режиме, а охлаждение сварного соединения происходит в надетой на сварное соединение теплоизоляционной рубашке.

Для муфтовой сварки труб из полиэтилена ПЭ 80 ГАЗ SDR11 63×5,8 ГОСТ Р 50838-95 при нормированных температурах, например при +20°C продолжительность оплавления составляет около 70 сек. Перед проведением сварки на отрезки полиэтиленовых труб и муфту устанавливают теплоизоляционный материал толщиной 3 см. Толщину теплоизоляции получают с помощью расчетов путем сравнения режимов остывания при допустимых и низких температурах.

Продолжительность прогрева определяют из условия, что средняя температура в области оплавления после технологической паузы 2 минуты становится равным примерно 20 °С. Например, при температуре окружающего воздуха -30 °С согласно расчетам предварительный прогрев проводится 13 минут (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Расчетные продолжительности прогрева при различных температурах окружающей среды

Температура окружающего воздуха, °С	Расчетное время прогрева, мин	Максимальная температура в соединении, °С	Средняя температура в зоне оплавления после технологической паузы (2 мин), °С
-50	21	42	20
-45	19	40	20
-40	17	40	20
-35	15	40	20
-30	13	39	20
-25	11	37	20
-20	10	35	20

К клеммам закладного нагревателя подключается источник питания и подается напряжение 8 В. Максимальная температура в конце прогрева составит +39 °С. В конце технологической паузы продолжительностью 2 мин

средняя температура в области оплавления муфты и труб становится равной 20°C. При достижении 20°C в области оплавления к клеммам муфты подключается сварочный аппарат и проводится автоматическая сварка, при этом для датчика температуры сварочного аппарата имитируется искусственная температура 20°C. Сварочный аппарат согласно имитированной температуре окружающего воздуха в автоматическом режиме производит сварку. Охлаждение сварного соединения проводится в теплоизоляционной рубашке.

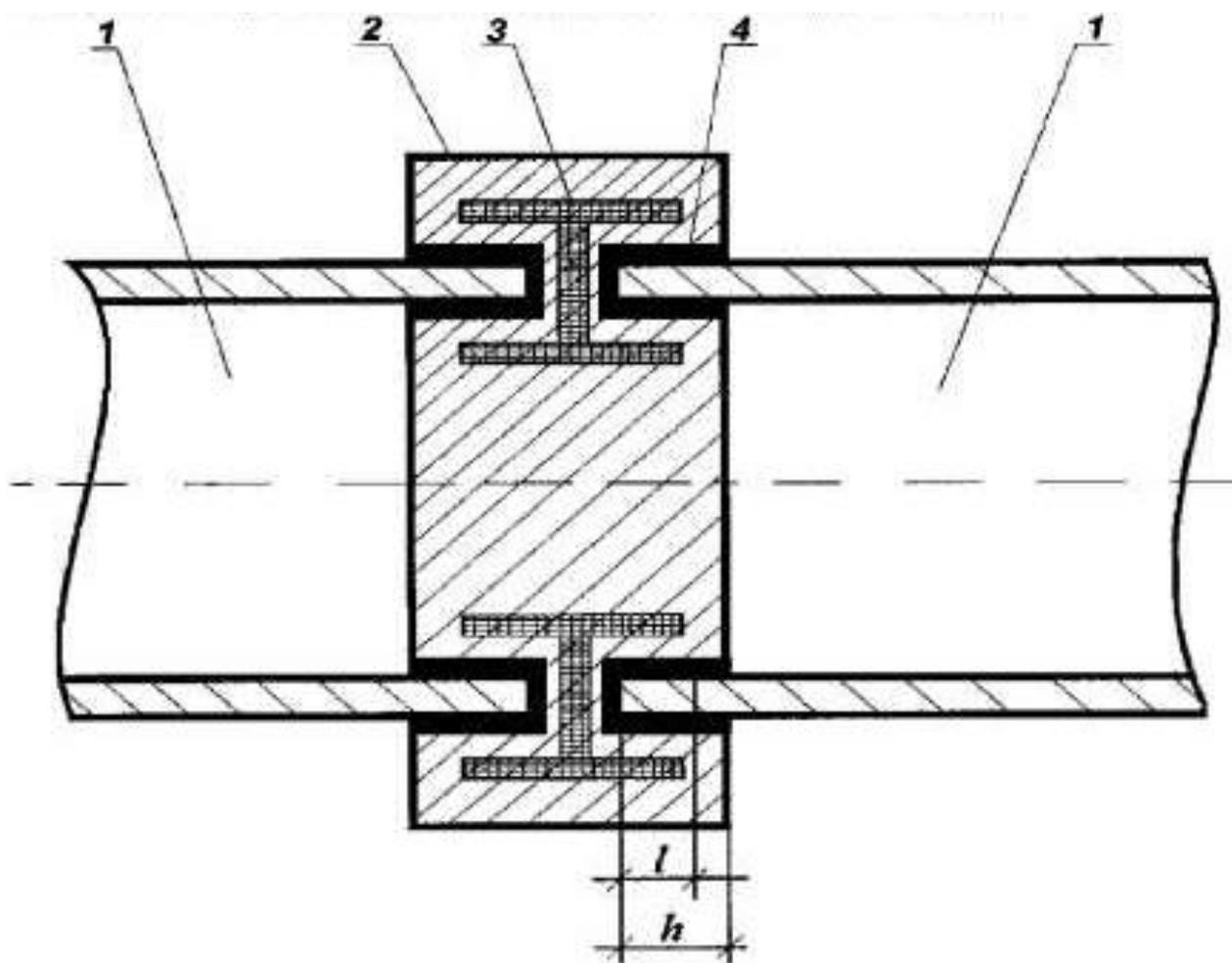
В описании способа [19] для концов свариваемых деталей 1 выполняют центрирование (рис. 1.1). Для этого используют наружную поверхность труб. Затем проводится мехобработка торцов деталей. Ее выполнение необходимо для того, чтобы обеспечить снятие окисленного слоя материала и плотное прилегание деталей. Концы деталей 1 подводят к нагретой оснастке 2, которая содержит источник тепла - элемент 3. Детали в водятся в кольцевую проточку оснастки 4. При этом важно, что глубина  $h$  ввода деталей больше длины  $l$  зоны термического влияния.

Для обеспечения лучшего контакта со свариваемыми деталями проточка оснащена эластичными элементами.

Поверхность нагревающего инструмента имеет регламентированную температуру. При этом детали необходимо выдерживать в проточке оснастки до достижения температуры концов труб необходимого значения.

Длительность выдерживания деталей в оснастке определяется также однородностью распределения температуры в ЗТВ.

Как только в концах свариваемых деталей будет сформировано требуемое температурное распределение – нагревательная остратка удаляется. После этого с помощью другого инструмента проводится оплавление торцов свариваемых деталей. После удаления инструмента торцы свариваемых деталей соединяют и выдерживают под давлением в течении времени, необходимым для остывания сварного шва.



- 1- Свариваемые трубы;
- 2- Нагретый инструмент;
- 3- Нагревательный элемент;
- 4- Проточка с эластичными элементами

Рисунок 1.1 – Сборка под сварку

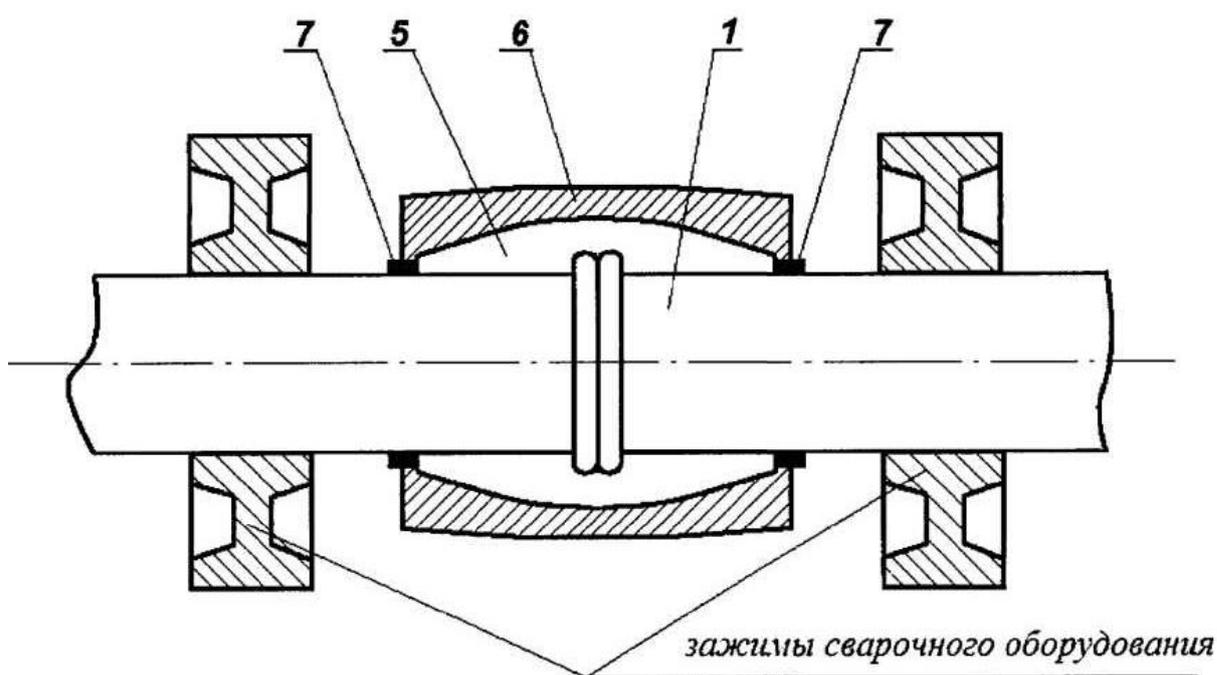
Для того, что бы обеспечить режимную скорость охлаждения сварного шва применяются дополнительные мероприятия (рис. 1.2). Эти мероприятия заключаются в теплоизоляции шва. Для этого соединение помещают в замкнутое пространство 5 состоящего из теплоизоляционного материала 6. Температура в данном пространстве поддерживается с помощью нагревательных элементов и собственного тепла сварного шва.

Зазор между теплоизоляцией и трубой герметизируется эластичным материалом 7.

Такое техническое решение позволяет проводить сварку полиэтиленовых труб при любой температуре окружающего воздуха, т.к. в любом случае обеспечивается требуемая скорость остывания и релаксационные процессы в зоне соединения.

При этом получаемые качественные характеристики сварного соединения соответствуют характеристикам получаемым при регламентируемом температурном интервале, предусмотренной соответствующей документацией.

Однако данный способ сварки имеет и недостатки. Так, например, необходимость проведения дополнительных мероприятий приводит для укрытия сварки теплоизоляционным материалом требует дополнительных временных затрат и приводит к удлинению технологического процесса получения соединения.



- 1 – Свариваемые трубы;
- 5 – Камера ограниченного объёма;
- 6 – Теплоизолирующий материал;
- 7 – Эластичный материал

Рисунок 2.1 – Сварка полимерных труб

## 1.4 Обзор способов сварки полимерных труб

Полимерные трубы и детали соединяют между собой при помощи сварки, конечным результатом которой является неразъемное соединение, равнопрочное (или близкое по прочности) основному материалу. Сварное соединение формируется благодаря введению в зону сварки определенных видов энергии (тепловой, деформационной) и в некоторых случаях ее преобразования, а также движения или преобразования вещества. Характер энергии и интенсивность ее преобразования определяют класс и вид сварки.

Разделение сварки по её типам зависит от механизма воздействия на исходный материал. Для полимерных технологий выделяют два типа сварки: тепловую сварку и химическую сварку.

Сварка, которая в основе имеет сближение макромолекул полимера и возникновение физического взаимодействия между ними, называется тепловой сваркой, сваркой плавлением, или диффузионно-реологической. Для ее осуществления необходимо перевести материал в вязкотекучее состояние (получить вязкий расплав) и обеспечить его течение. В обиходе под термином «сварка» чаще всего подразумевают именно процесс получения сварного соединения в результате плавления полимера.

Сварка, основанная на образовании между макромолекулами полимера химических связей, носит название химической сварки. Для образования химических связей часто требуется нанесение на соединяемые участки присадочных реагентов или обработка поверхностей веществами, изменяющими химическую структуру полимера. Наиболее часто химической сваркой соединяют материалы, не поддающиеся сварке плавлением. При сварке трубопроводов химическая сварка, как правило не применяется.

Процесс тепловой сварки полимеров во многом схож со сваркой металлов плавлением. В обоих случаях образование сварного соединения основано на адгезионном взаимодействии соединяемых поверхностей - поверхностном явлении, заключающемся в возникновении физического и

(или) химического взаимодействия при их молекулярном контакте. В результате этих процессов происходит взаимное слияние (коалесценция) соединяемых поверхностей с исчезновением физической границы раздела и образование промежуточного слоя с однородной или разнородной химической структурой. Возникающие межмолекулярные или межатомные связи и обеспечивают механическую прочность соединения.

Однако, если при сварке металлических изделий с помощью различных источников нагрева добиваются перехода твердого металла в жидкое состояние, полученный объем которого называют сварочной ванной, то в случае полимеров материал переходит в вязкотекучее (по другому - в расплавленное) состояние. При сварке полимеров под вязкотекучим состоянием понимают сходное с жидким состояние высокомолекулярных веществ, но отличающееся большой вязкостью, при котором происходит перемещение центра тяжести макромолекул, а также движение их относительно друг друга при повышенной температуре. При понижении температуры полимер переходит в стеклообразное состояние.

Образование сварного соединения является многоступенчатым механизмом, который включает в себя три стадии. Первая стадия предусматривает активизацию свариваемых поверхностей и повышение энергии теплового движения их макромолекул. Эта стадия реализуется при фазовом переходе материала из твердого состояния в расплавленное. Далее происходит сближение активированных поверхностей, расстояние сближения составляет при этом менее одного нанометра и приводит к образованию физического контакта между свариваемыми поверхностями. Третий этап предполагает отверждение расплава в зоне сварки, в ходе третьего этапа формируются новые надмолекулярные структурные образования.

У изделий из термопластов, активацию производят нагревом свариваемых поверхностей и переходом материала из твердого состояния в вязкотекучее состояние. Следует отметить, что одного нагрева бывает

недостаточно, чтобы образовалось соединение. Это вызвано присутствием на свариваемых поверхностях экранирующей прослойки. Эта прослойка является барьером, который создаёт преграду для активированных макромолекул полимера, расположенных с обеих ее сторон, и не позволяет им физическое контактирование друг с другом. Эта прослойка имеет разнообразную природу. Причинами её возникновения могут быть окисление полимера при контакте с атмосферой расплавленной поверхности, поры вследствие термодеструкции полимера, и шероховатость поверхности, адсорбированные поверхностью газы и т.п.

Следовательно, для реализации межмолекулярного взаимодействия экранирующую прослойку необходимо удалить, вытеснив ее из зоны соединения. Вытеснение прослойки происходит за счет сдавливания свариваемых изделий с приложением к ним внешнего избыточного давления. Избыточное давление на этой стадии приводит к возникновению в зоне соединения пластических деформаций - течения расплава и частичного его вытеснения из зоны сварки. За счёт сдвиговых деформаций принудительно разрушаются находящиеся в плоскости соединения дефектные слои, которые вместе с частью выходящего расплава, обладающего наибольшей термодинамической активностью, эвакуируются из зоны контакта за пределы сварного соединения. Только после вытеснения из зоны сварки экранирующих прослоек возможно полное сближение соединяемых поверхностей и возникновение физического взаимодействия между ними на молекулярном уровне - адгезии.

Таким образом, давление, обеспечивающее движение вещества, требуется при любом способе сварки, в то время как тепловая энергия может как подводиться извне, так и генерироваться в полимерном материале за счет преобразования других видов энергии. Это может быть механическая энергия ультразвуковых колебаний или трения, энергия высокочастотного электрического поля, электромагнитная энергия, энергия инфракрасного излучения, излучения лазера или концентрированного светового луча. При

химической сварке тепловой энергии чаще всего вообще не требуется, однако приложение внешнего давления для реализации сдвиговых деформаций обязательно.

Для нагрева свариваемых поверхностей используют различные источники теплоты: газовый теплоноситель, ультразвуковые колебания, высокочастотное электрическое поле, энергия трения, поток лучистой энергии, нагретый инструмент и т.п. На основании принятой для металлов классификации процессов сварки (ГОСТ 19521-74 «Сварка металлов. Классификация») предложено проводить и классификацию сварки. Тип сварки определяют по механизму проводимого процесса, сварка плавлением и химическая сварка. На основании вида энергии, вводимой для перевода термопласта в вязкотекучее состояние, и способа ее передачи определяют класс сварки.

#### Сварка нагретым газом (рис. 1.3, рис. 1.4)

Первой стали использовать сварку нагретым газом с применением присадочного материала или без него. Этот способ основан на использовании нагретого газа (как правило, воздуха), при помощи которого соединяемые поверхности сначала разогревают. Затем данные поверхности либо прижимают к друг другу или в зону нагретого газа подается присадочный материал в виде прутка.

Главным отличием реализации данного способа является непосредственный подвод тепла к соединяемым поверхностям, а последующий переход от одного участка шва к другому.

Однако, как альтернатива последовательного перехода от одного участка шва существует вариант сварки, при котором нагревается вся поверхность шва за один цикл.

В некоторых случаях сварку осуществляют с применением присадочного материала, который представляет собой пруток. Примечательно, что с использованием такого способа сварки возможно

соединение деталей фактически любых параметров и конфигураций которые могут потребоваться при реализации сварочного производства.

Оснастке осуществляющей подачу тепла в зону свариваемых поверхностей газа-теплоносителя нагрев последнего проводится либо с применения электроэнергии, либо с использованием газового пламени.

В роли газа-теплоносителя обычно выступает воздух, в некоторых случаях, когда используемый термопласт подвержен окислительному разрушению необходимо применение азота или инертных газов.

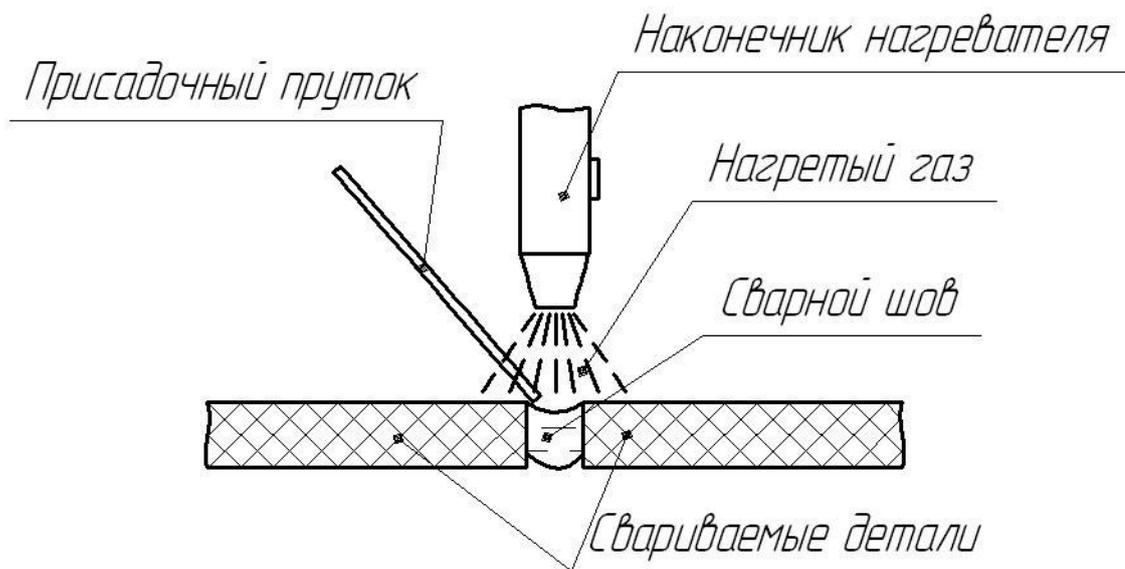


Рисунок 1.3 – Сварка нагретым газом с присадочным материалом

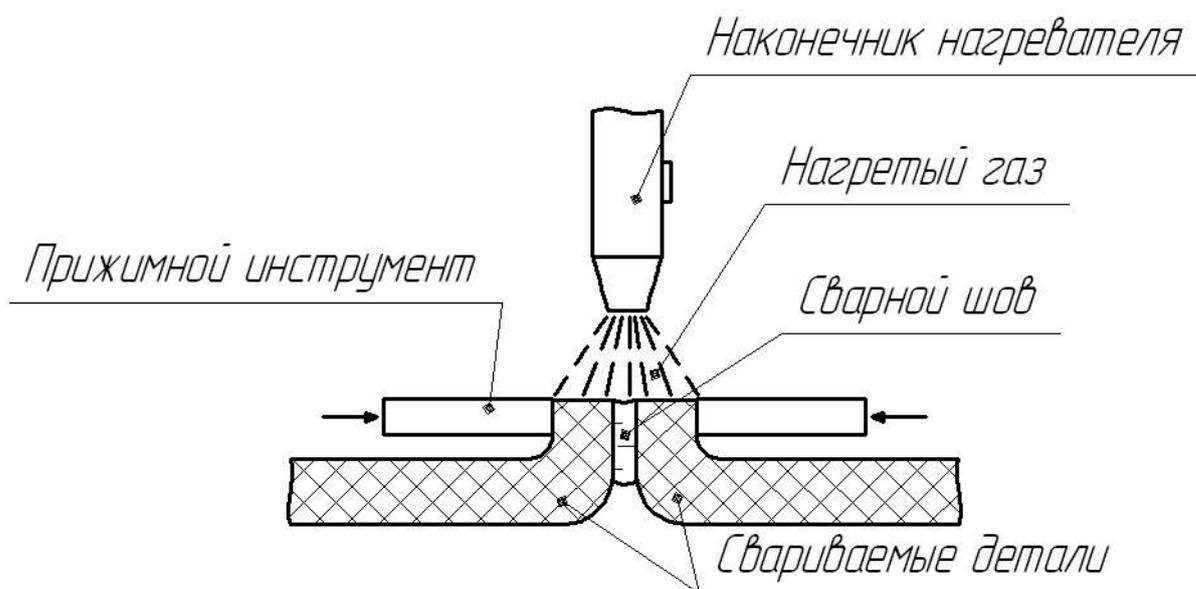


Рисунок 1.4 – Сварка нагретым газом без присадочного материала

### Экструзионная сварка (рис. 1.5)

У сварки экструзионной сваркой с использованием присадки следующая ключевая особенность. Экструдер в зазор между соединяемыми трубами подает расплавленную присадку. Горячая присадка приводит к нагреву материала труб и, нагревая его до состояния текучести, спекается вместе с ним.

Для образования расплава в экструдерах используется материал или в виде гранул (в шнековых экструдерах), или прутка (в прямоточных экструдерах). Экструзионную сварку, в которой для получения расплава используется пруток (его диаметр чаще всего составляет 4...5 мм), иногда называют сваркой расплавленным прутком. Экструзионную сварку используют, как правило, для соединения листовых изделий, плит, при производстве и сварке труб большого диаметра.

Портативные экструдеры серии StarGUN (рис. 1.6) обладают малым весом, обеспечивающим высокую мобильность. Это позволяет использовать данные устройства как в замкнутых промышленных помещениях, так и на улице. В качестве присадочного материалы они могут работать с прутками полипропилена и полиэтилена. Данные устройства могут быть оборудованы встроенным модулем подачи воздуха.

Способ имеет высокую экономичность в сравнении со сваркой горячим воздухом, не требует использования дополнительного оборудования. Получаемые сварные соединения имеют хорошее качество. В качестве недостатка следует отметить высокие требования к навыкам персонала, низкую производительность процесса, что делает этот способ невыгодным в массовом производстве. Так же следует учесть, что при этом способе сварки не рекомендуется применять нахлесточные соединения, прочность которых в 6 раз ниже, чем у стыковых соединений. Следует также принимать во внимание выделяющиеся при осуществлении способа сварки пары и аэрозоли, вредные для работников. Прочность соединения при экструзионной сварке обычно не превышает 60...75 % прочности основного

материала и во многом определяется углом раскрытия кромок при их подготовке к сварке.

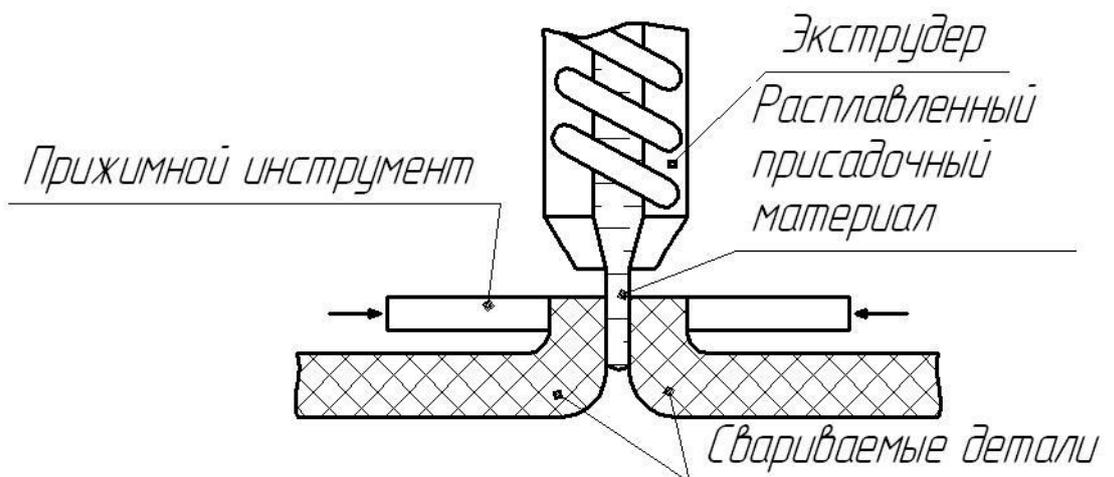


Рисунок 1.5 – Сварка расплавом, получаемым экструзией



Рисунок 1.6 – Портативный экструдер серии STARGUN

#### Сварка нагретым инструментом впаструб (рис. 1.7)

При реализации данного способа для активации свариваемых поверхностей применяется нагретая оснастка из металла. При этом передача тепла свариваемым деталям при контактном способе нагрева носит более интенсивный характер, чем с использованием нагретого воздуха.

Контактный способ нагрева благоприятно сказывается на распределении тепла в свариваемых деталях, т.к. никакие дополнительные зоны заготовок, кроме свариваемых, не подвергаются тепловому перегреву.

Благодаря этому отсутствует эффект термического повреждения материала вокруг соединения. Однако прочностные характеристики сварки при использовании такого способа меньше, чем у трубы.

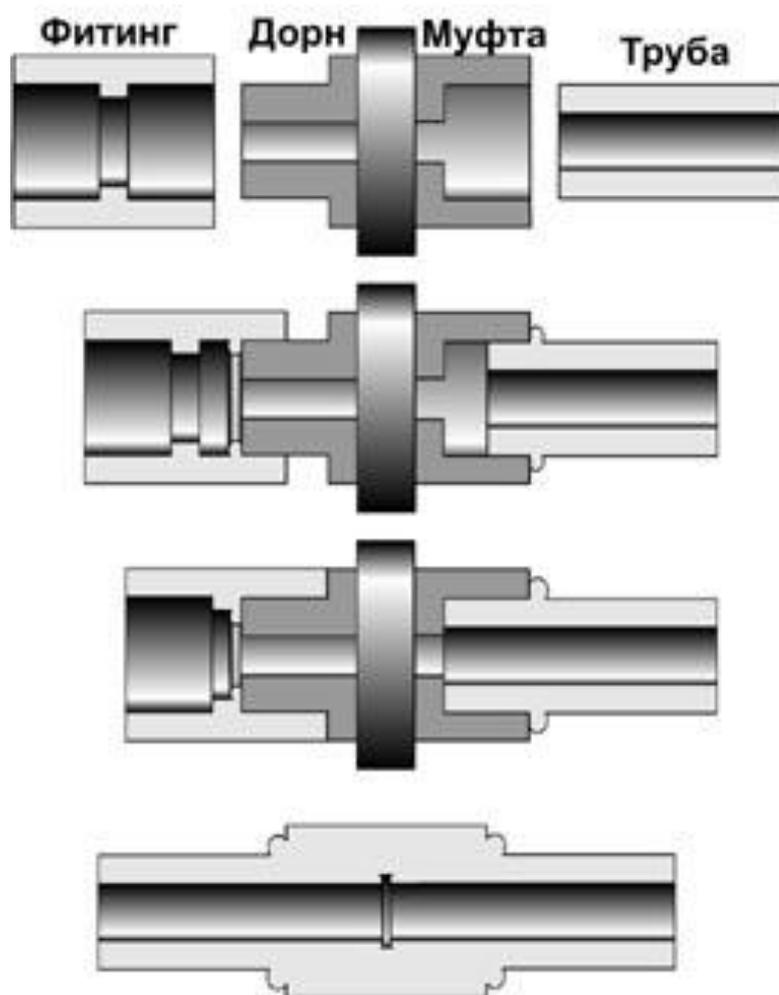


Рисунок 1.7 – Схема сварки нагретым инструментом в раструб

При реализации данного способа необходимо применение фитингов в роли соединительных элементов труб. Трубы с фитингом свариваются в раструб. Металлическая оснастка для нагревания фитингов и труб состоит из следующих элементов – муфта и дорн.

Перед началом формирования сварного соединения с помощью муфты оснастки нагревается наружная часть трубы, а с помощью дорна нагревается внутренняя часть фитинга.

После осуществления нагрева свариваемых поверхностей до нужной температуры оснастка производится удаление оснастки. Затем сразу же производится совмещение трубы и фитинга. После этого они выдерживаются до полного остывания. Таким образом получают сварное соединение.

В процессе контактирования трубы с оснасткой нагревающего инструмента наружная поверхность трубы размягчается и смещается изнутри оснастки наружу. При этом на трубе формируется кольцо в форме валика. Внутренний слой трубы прогревается до такой степени, чтобы появилась возможность упругого сжатия данной части трубы. Это позволит данной части трубы войти в муфту оснастки нагревателя.

То же самое происходит и при совмещении фитинга и дорна нагретого инструмента: труба при этом упруго сжимается, а фитинг, в то же время, упруго растягивается.

Как результат – нагретые поверхности оказывают давление друг на друга. Положительным эффектом является вытеснение воздуха из соединения и перемешивание материала в зоне сварки.

Преимущества раструбной сварки:

- относительная простота способа;
- высокое качество соединения;
- высокая производительность сварки.

Недостатки раструбной сварки:

- требуются специальные центраторы при сварке труб большого диаметра (более 100 мм);
- дополнительные затраты на фитинги.

Сварка встык с использованием нагретого инструмента (рис. 1.8)

Активация поверхности свариваемых деталей проводится с применением специальной оснастки. При этом передача тепла свариваемым деталям при контактном способе нагрева носит более интенсивный характер, чем с использованием нагретого воздуха.

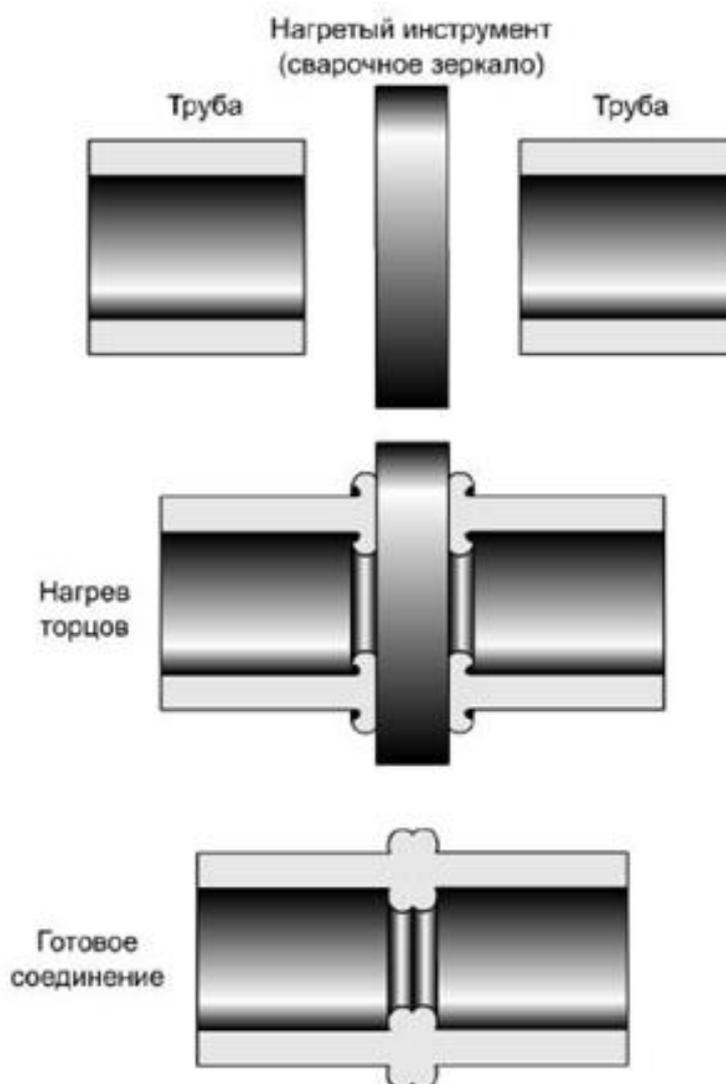


Рисунок 1.8 – Схема сварки нагретым инструментом встык

Контактный способ нагрева благоприятно сказывается на распределении тепла в свариваемых деталях, т.к. никакие дополнительные зоны заготовок, кроме свариваемых, не подвергаются тепловому перегреву.

Благодаря этому отсутствует эффект термического повреждения материала вокруг соединения. Однако прочностные характеристики сварки при использовании такого способа меньше, чем у трубы.

Данный способ сварки заключается в нагреве концов свариваемых труб до заданной температуры, сведение их вместе и последующее удержание под давлением до остывания сварного шва. Особенностью данного способа является необходимость соблюдения большого количества условия для получения качественного шва. Однако современный уровень автоматизации производства позволяет снизить влияния человеческого фактора до минимума, тем самым обеспечивая стабильное качество сварки.

Преимущества сварки нагретым инструментом:

- уменьшается зона термического влияния;
- достигается равнопрочность соединения с материалом трубы;
- упрощенная конструкция соединения (нет необходимости использования соединительных муфт).

Недостатками сварки нагретым инструментом являются:

- требования высокой точности параметров режима сварки и аккуратности выполнения операций технологического процесса;
- влияние температуры низких температур окружающего воздуха на качество получаемого соединения;
- прочность соединения несколько ниже, чем при сварке в раструб;
- требуется сложное оборудование.

## 1.5 Задачи диссертационного исследования и методы их решения

На основании приведённого обзора научной информации по теме сварки магистральных трубопроводов из полимерных труб можно заключить, что основной проблемой сварки является обеспечение надлежащего качества при низких температурах окружающего воздуха (ниже  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Предлагаемые технические решения либо не обеспечивают надлежащего качества, либо требуют существенного усложнения технологического процесса и снижают производительность выполняемых работ.

Таким образом, можно сформулировать задачи дальнейшего диссертационного исследования:

1) на основании литературных и патентных исследований предложить компоновку оборудования для сварки магистральных трубопроводов из полимерных труб;

2) исследовать эффективность различных режимов и способов сварки полиэтиленовых труб (решение этой задачи предусматривает экспериментальную сварку образцов из труб на промышленном оборудовании, определение физико-химических свойств сварного стыкового соединения, измерение прочности сварного соединения);

3) исследовать качество сварных соединений, полученных при различных температурах окружающей среды и предложить способ и режимы сварки в условиях пониженных температур.

## 2 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СВАРКИ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

### 2.1 Описание операций технологического процесса

Сварочный цикл можно разделить на следующие этапы (рис. 2.1):

- Оплавление торцов трубы;
- Нагревание;
- Удаление инструмента для нагрева;
- Сваривание торцов;
- Охлаждение.

Перед началом сварки зоны соединения труб выравниваются с помощью электроторцевателя – инструмента для механической обработки торцов свариваемых труб. Инструмент выравнивает торцы труб под прямым углом относительно оси и удаляет все сколы и неровности сечения. Торцевание должно производиться до тех пор, пока стружка, образуемая в результате торцевания, начнет выходить непрерывной, ровной лентой.



Рисунок 2.1 – Циклограмма процесса сварки встык нагретым инструментом

Далее свариваемые поверхности нагреваются до температуры плавления с помощью специального нагревательного элемента, как показано

на рис. 2.2 и 2.3. На стадии оплавления (рис. 2.2) происходит образование первичного грата.

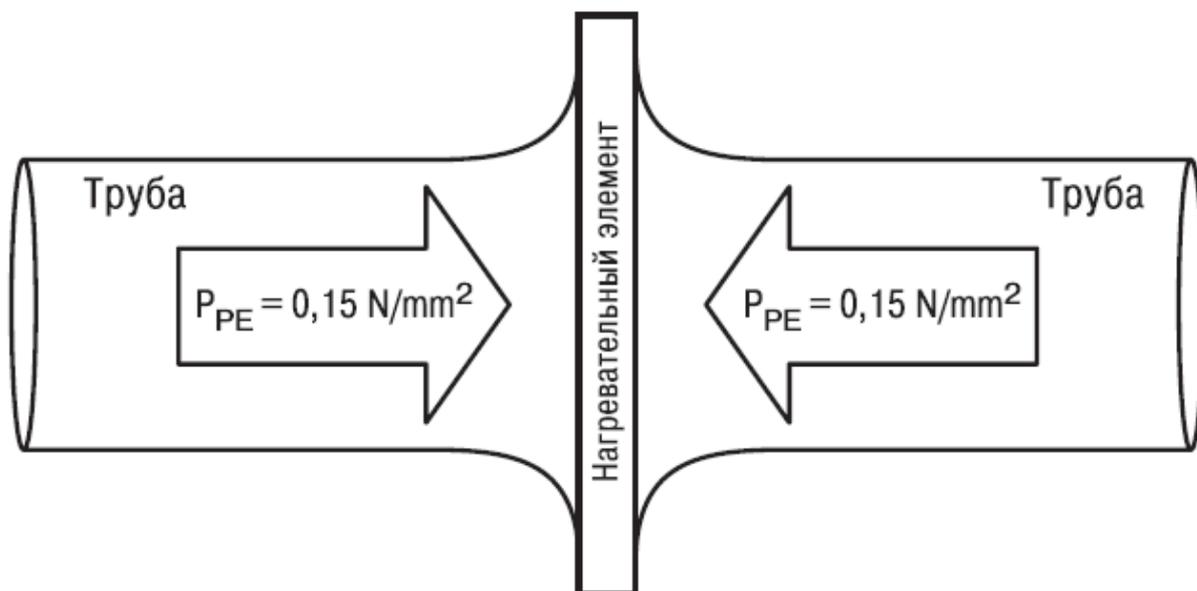


Рисунок 2.2 – Стадия оплавления торцев труб

На стадии нагрева (рис. 2.3) тепло распространяется вглубь материала. Так как на данном этапе требуется обеспечить только контакт между свариваемыми деталями и нагревательными элементом, то прикладываемое в этом случае давление близко к нулевому значению.

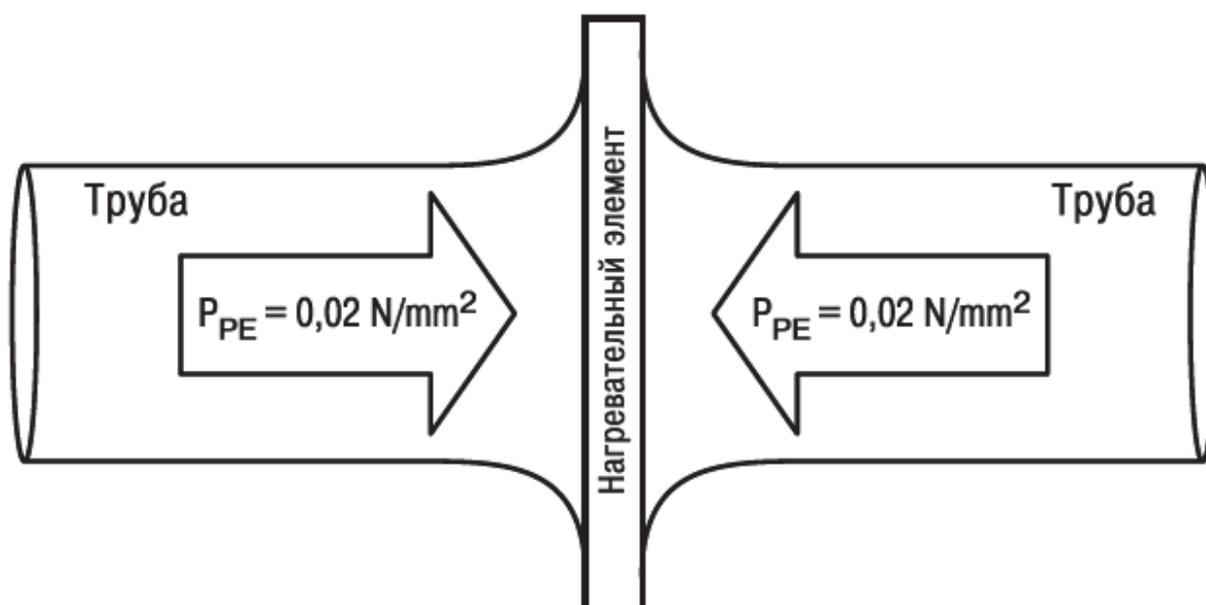


Рисунок 2.3 – Стадия нагрева торцев труб

Затем нагревательный элемент удаляется из области сварки как показано на рис. 2.4 (стадия удаления нагревателя). Нагревательный элемент необходимо удалять так, чтобы не загрязнить и не повредить нагретые для сварки поверхности трубы. Контактные поверхности нужно быстро соединить, не допуская других соприкосновений. Время перехода должно быть настолько кратким, насколько это возможно, иначе нагретые поверхности застынут, что негативно повлияет на качество сварки.

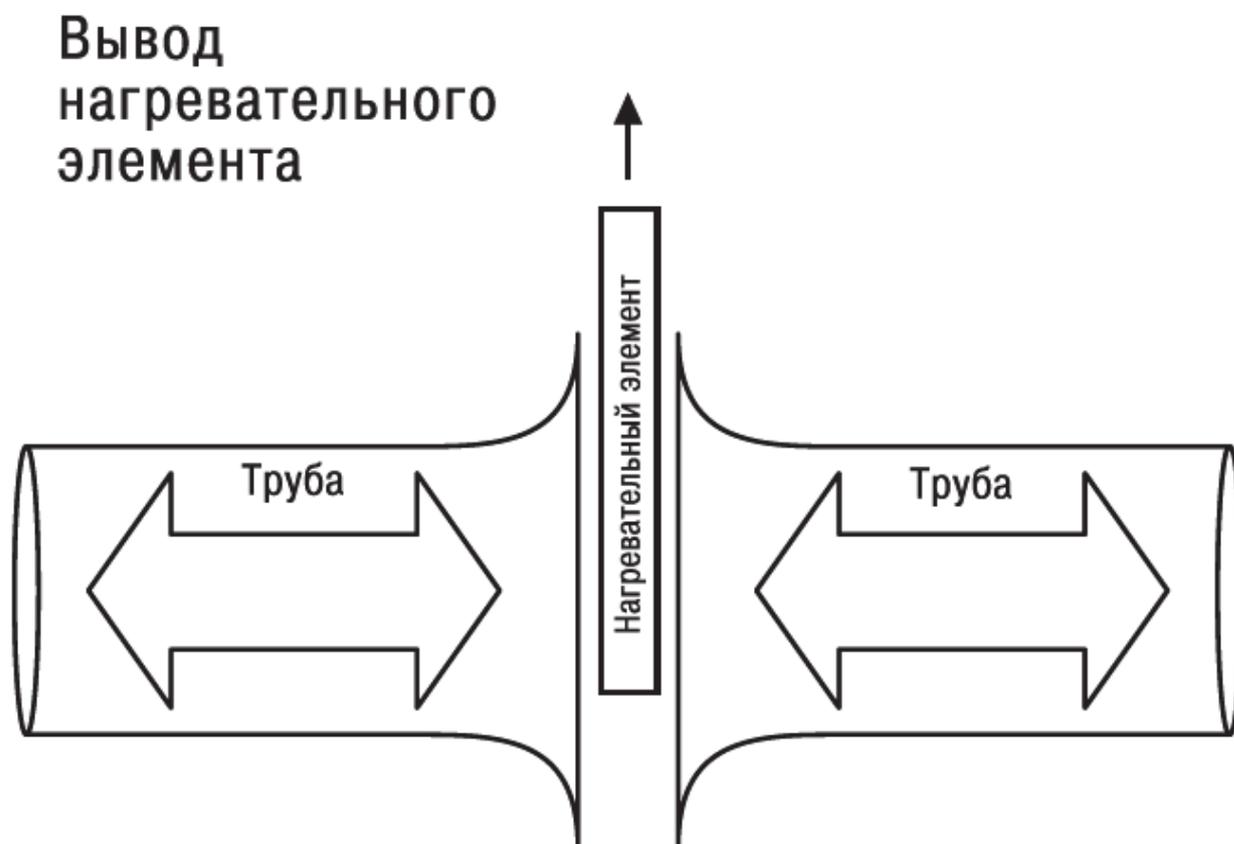


Рисунок 2.4 – Стадия удаления нагревательного инструмента

На стадии сварки (рис. 2.5) образуется конечный грат и, требуемые для надежности сварки, связи (на молекулярном уровне). Свариваемые части трубы соединяются под давлением равным давлению на станции оплавления торцов.

На заключительной стадии охлаждения (рис. 2.6) производится осадка стыка, при этом прочностные характеристика шва принимают максимальные значения.

После соединения должен появиться симметричный буртик (рис. 2.7). Одинаковый размер правого и левого буртика показывает правильность сварки. Различный размер буртиков показывает различные характеристики вязкости соединяемых материалов, то есть процедура сварки произведена неверно.

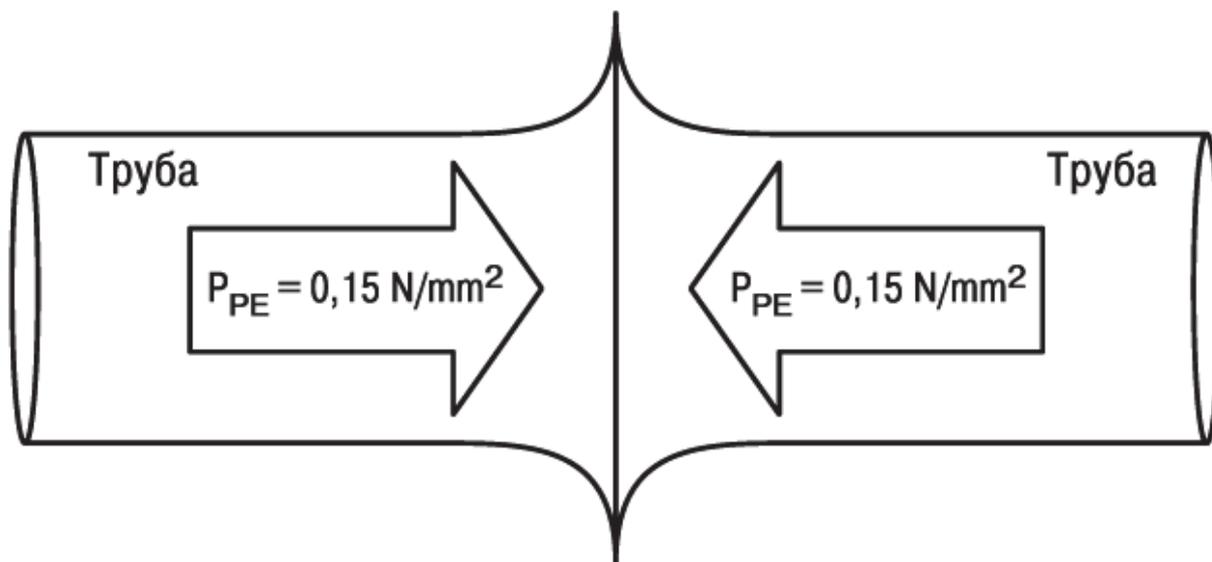


Рисунок 2.5 – Стадия сварки

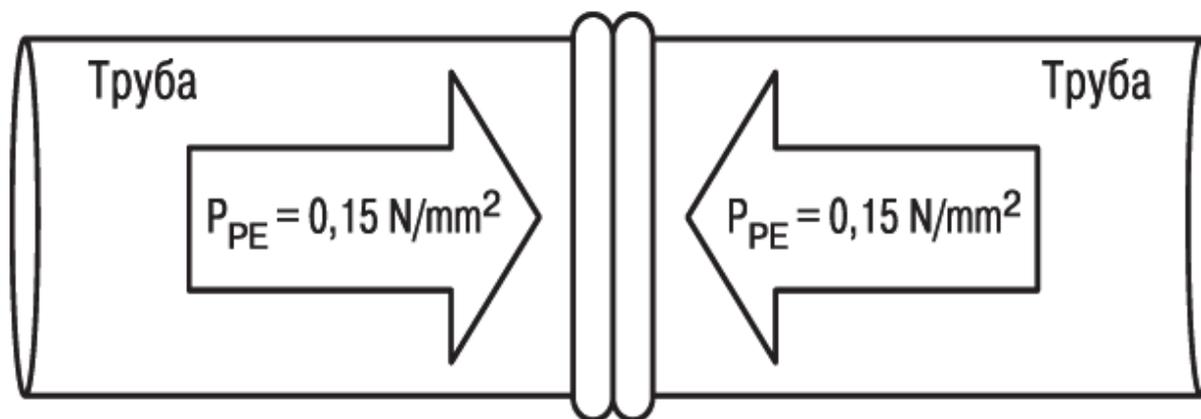


Рисунок 2.6 – Стадия охлаждения



Рисунок 2.7 – Буртик при сварке полиэтиленовых труб

## 2.2 Описание оборудования

Установки для стыковой сварки трубопроводов из полиэтилена состоят из следующих компонентов.

Центратор (рис. 2.8) – базовый элемент машины, состоящий из прочной основы (станина) и четырех зажимов, выполненных из металла и предназначенных для надежной фиксации труб в нужном положении. Обычно половина из этих зажимов подвижны, а другая их часть надежно закреплены на специальных направляющих.



Рисунок 2.8 – Центратор для сварки полимерных труб

Торцеватель (рис. 2.9) – инструмент, предназначенный для торцевания поверхностей деталей перед сваркой путем их механической обработки.

Торцеватель имеет специальные крепления для его надежного крепления на сварочном оборудовании. Данное устройство имеет подвижные зажимы, благодаря которым обеспечивается давление необходимое для прижатия деталей к торцевателю.

Для обеспечения безопасности данное устройство комплектуется выключателями, обеспечивающими отсутствие включения двигателя вни сварочной машины.

Рабочие лезвия данного устройства имеют двухстороннюю заточку. Практикуется смена стороны установки рабочего лезвия, если одна кромка вследствие износа затупилась. Перевернув, можно использовать их вторую режущую кромку. Чтобы не менять геометрию ножей, их не рекомендуется затачивать.



Рисунок 2.9 – Торцеватель для сварки полимерных труб

Нагревательный элемент (сварочное зеркало) (рис. 2.10) – является одним из главных устройств, необходимым для активации (нагрева) поверхностей деталей подвергающихся сварке.

Рабочие поверхности зеркала покрыты специальным материалом (тефлон), который предотвращает их загрязнение налипшим фрагментами из полиэтилена. Для контроля температурного режима сварочное зеркало оборудовано термометром.



Рисунок 2.10 – Нагревательный элемент для сварки полимерных труб

Гидравлический привод (рис. 2.11) – устройство необходимое для поддержки давления сжатия деталей на требуемом уровне. При необходимости значение давления можно регулировать и устанавливать нужные значения для любого этапа сварки.



Рисунок 2.11 – Гидравлический привод для сварки полимерных труб

Редукционные вкладыши (рис. 2.12) – множество полуколец, необходимых для обеспечения сварки всех размеров полиэтиленовых труб.

Чаще всего редукционные вкладыши идут в комплекте со сварочным оборудованием, однако, при необходимости, их можно приобрести отдельно.



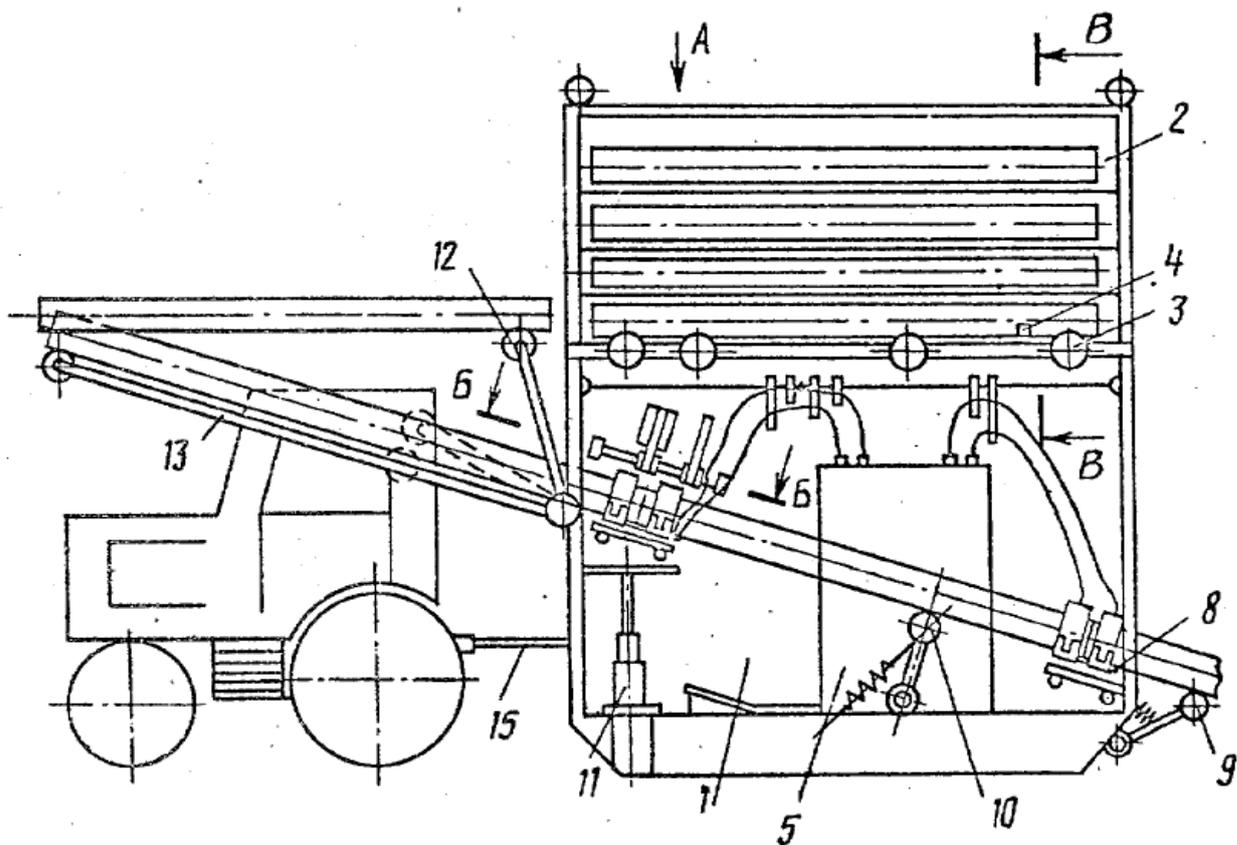
Рисунок 2.12 – Редукционные вкладыши для сварки полимерных труб

### 2.3 Компоновочная схема установки для сварки магистрального трубопровода из полимерных труб

Предлагаемая установка для сварки магистрального трубопровода из полимерных труб (рис. 2.13, 3.14) содержит крытую платформу, содержащую основание 1, в котором размещаются силовые механизмы и работают операторы, и верхнюю часть 2, где размещаются трубы, приводной рольганг 3, отсекаТЕЛЬ 4, станцию гидропривода 5, две автономных пары неподвижного 6 и подвижного 7 зажимных хомутов, каждая из которых связана с силовым приводом 8, поддерживающий ролик 9, обеспечивающий, сход с платформы по траншее плети, подпружиненный ролик 10 для поддержания свободного конца трубы, стол 11 подъема, обеспечивающий подъем и удержание зажимных хомутов при стыковке труб, отклоняющий ролик 12, служащий для поддержания трубы и укладки ее на наклонный рольганг 13, лебедку 14, служащую для перемещения платформы вдоль траншеи с помощью троса 15, вал 16, на котором установлены торцователь 17 и нагреватель 18, электроагрегат 19, обеспечивающий электричеством все потребители.

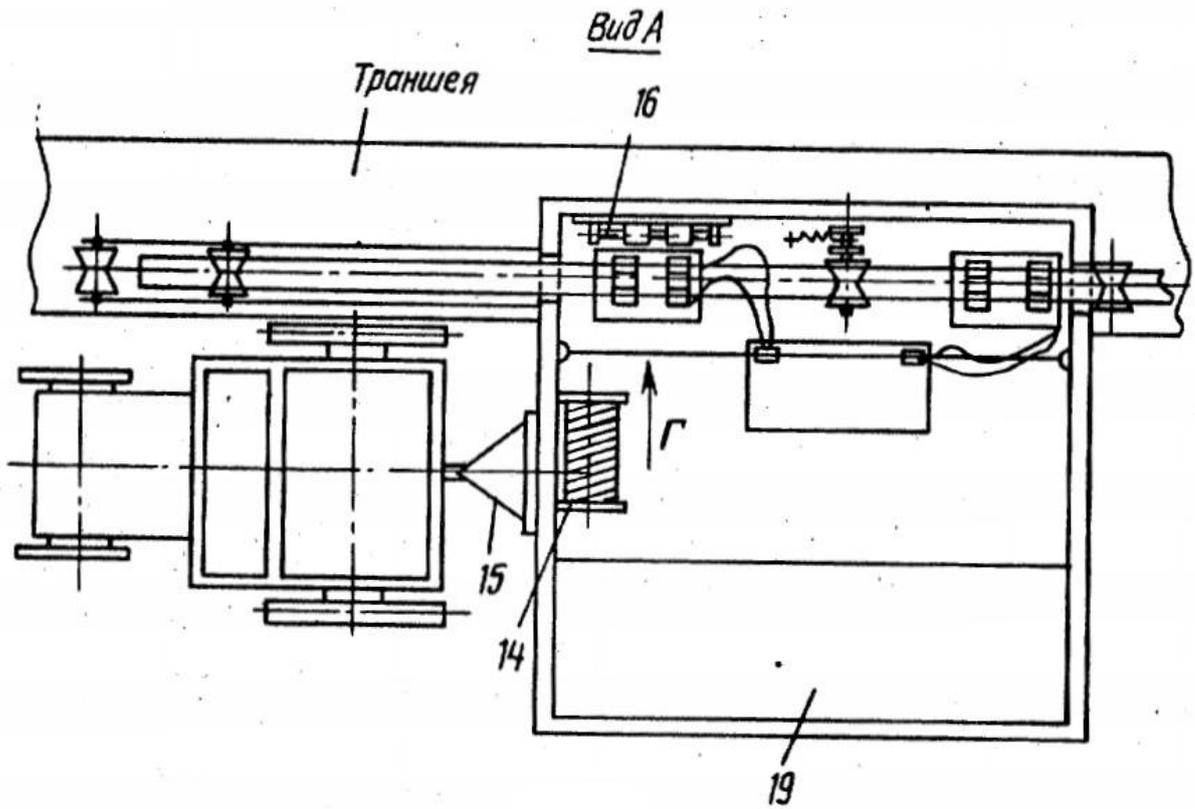
Неподвижный 6 и подвижный 7 зажимные хомуты состоят из трех частей: нижнего сектора 20, левого сектора 21 и правого сектора 22, соединенных откидным болтом 23, Хомуты 6 и 7 установлены на раме 24, имеющей ролики 25. На раме 24 закреплен неподвижный хомут 6 к силовому приводу 8, представляющий собой гидроцилиндр, шток которого соединен с подвижным хомутом 7.

Рама 24 с хомутами 6 и 7 установлена на направляющей 26, один конец которой шарнирно соединен со столом 11, а другой конец опирается на регулируемый по высоте упор 27, Направляющая 26 имеет подпружиненный палец 28, служащий для удержания автономной пары хомутов в исходном положении. Для уменьшения напряжений в сварных швах наклон направляющей 26 соответствует наклону свариваемых труб.



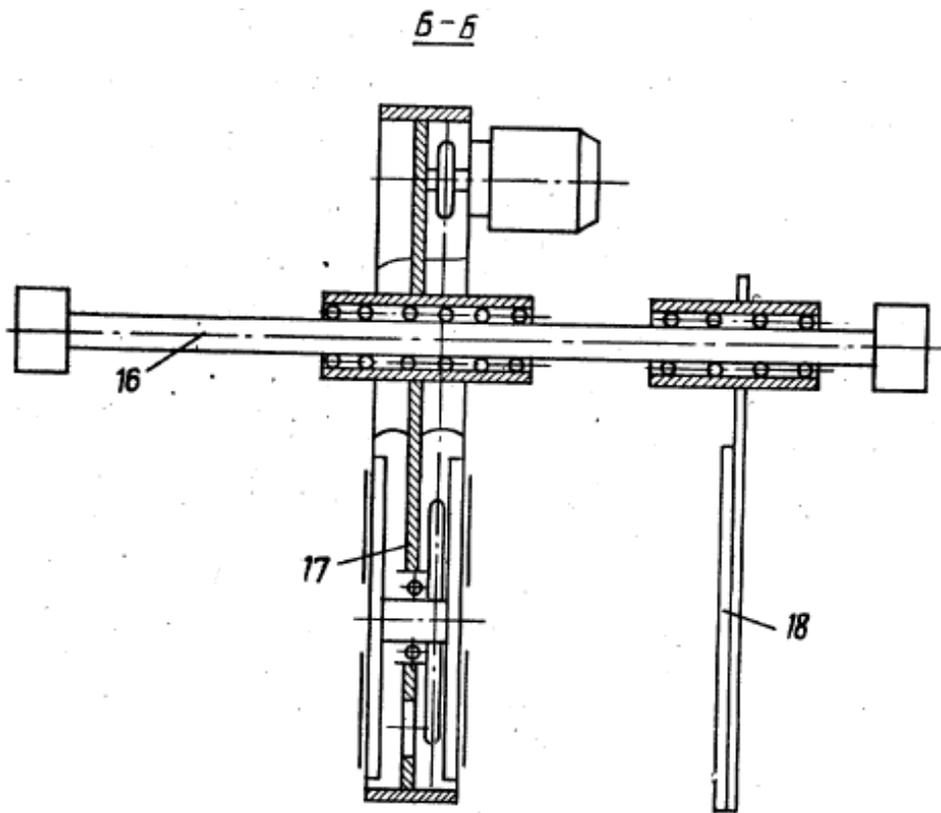
1 – основание, 2 – верхняя часть, 3 - приводной рольганг, 4 - отсекатель,  
 5 – станция гидропривода, 6 – пара неподвижных хомутов, 7 – пара  
 подвижных хомутов, 8 - силовой привод, 9 – поддерживающий ролик, 10 –  
 подпружиненный ролик, 11 – стол подъема, 12 – отклоняющий ролик,  
 13 – наклонный рольганг, 14 – лебедка, 15 - трос перемещения

Рисунок 2.13 – Схема установки для сварки пластмассовых труб



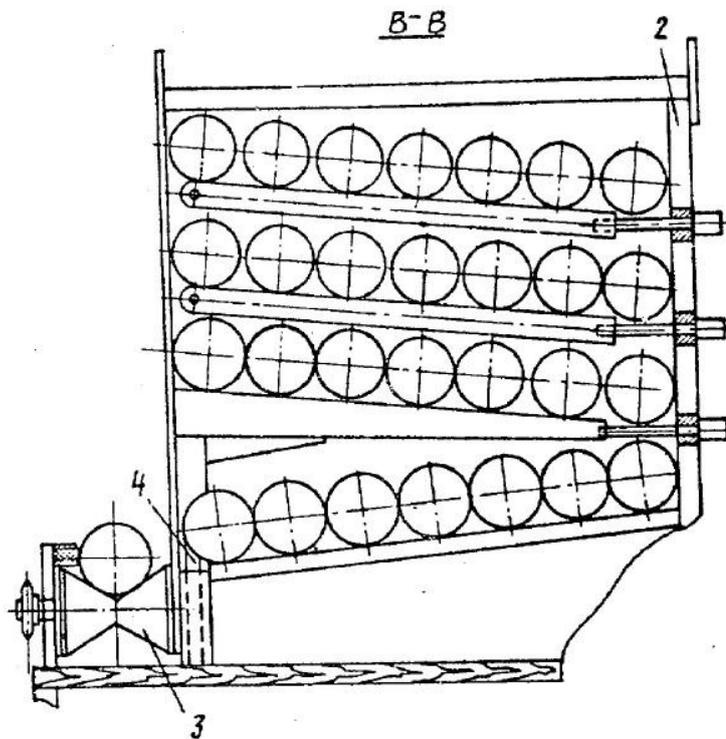
14 – лебедка, 15 - трос перемещения, 16 – вал, 17 – торцователь,  
 18 – нагреватель, 19 – электроагрегат

Рисунок 2.14 – Вид «А» на схеме установки для сварки пластмассовых труб



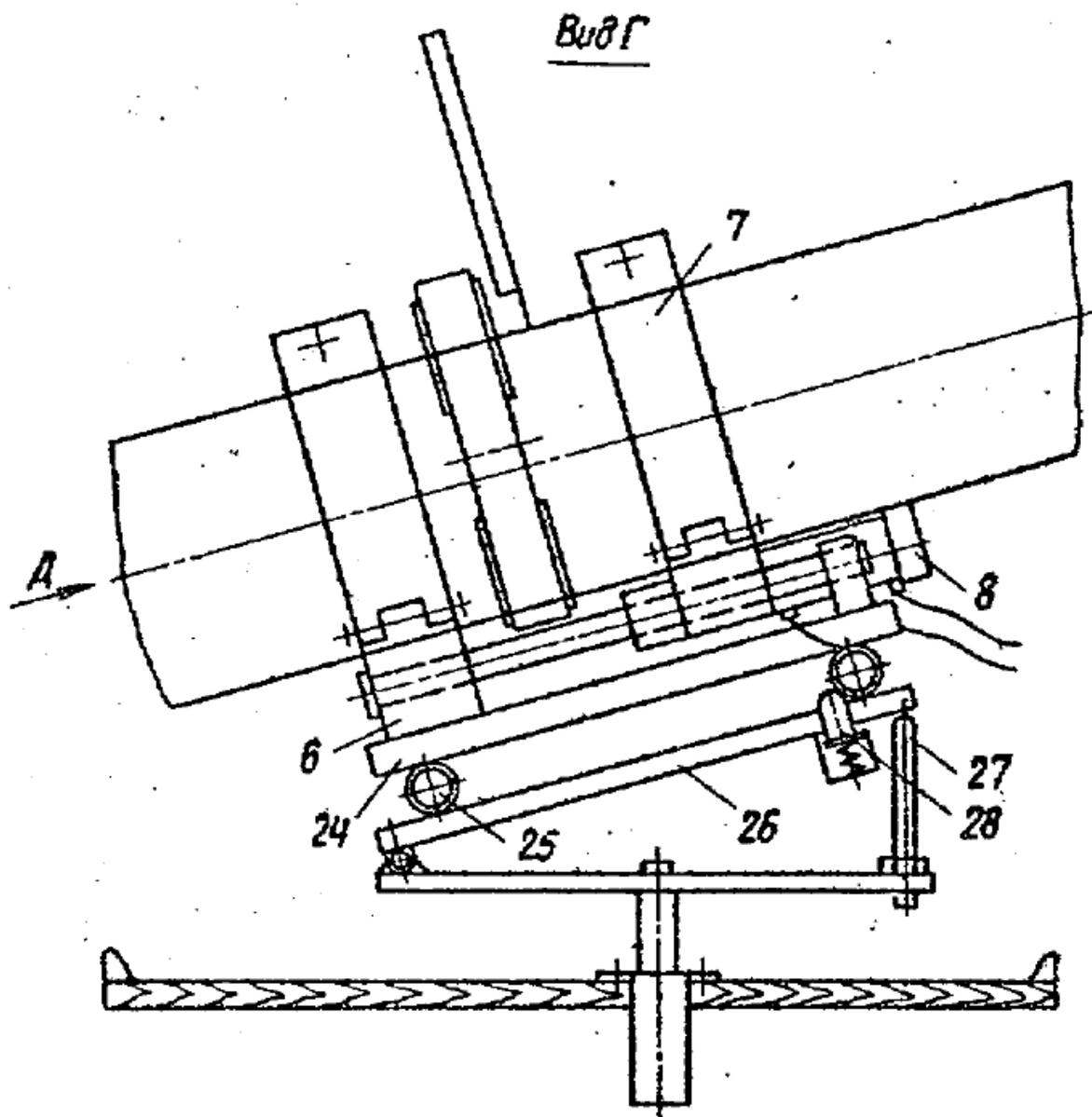
16 – вал, 17 – торцователь, 18 – нагреватель

Рисунок 2.15 – Сечение «Б-Б» на схеме установки



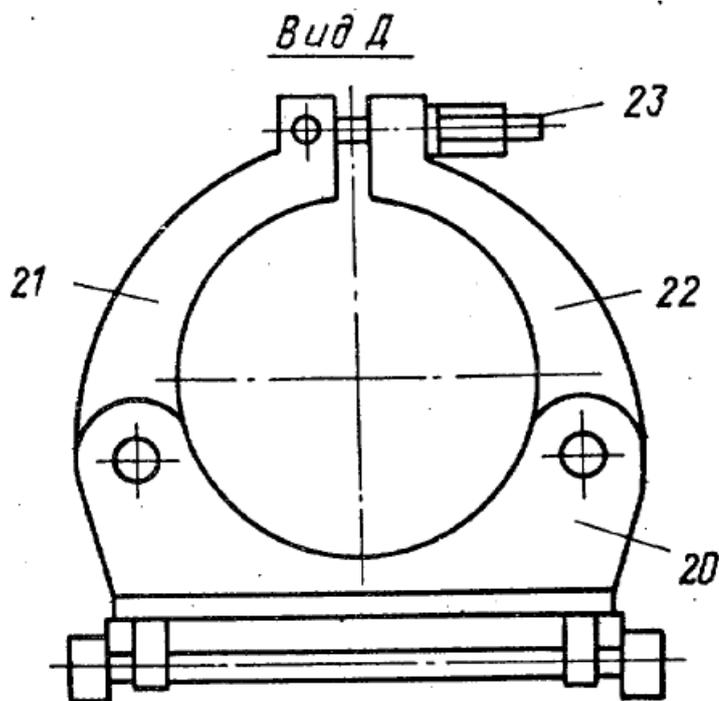
3 - приводной рольганг, 4 - отсекатель

Рисунок 2.16 – Сечение «В-В» на схеме установки



6 – пара неподвижных хомутов, 7 – пара подвижных хомутов, 8 - силовой привод, 24 – рама, 25 – ролики, 26 – направляющая, 27 – упор, 28 – подпружиненный палец

Рисунок 2.17 – Вид «Г» на схеме установки для сварки пластмассовых труб



20 – нижний сектор, 21 - левый сектор,  
22 – правый сектор, 23 –откидной болт

Рисунок 2.18 – Вид «Д» на схеме установки для сварки пластмассовых труб

Установка работает следующим образом. Первая из свариваемых труб по команде оператора скатывается на приводной рольганг 3, перемещается впе-15 ред до упора и отклоняющим роликом 12 укладывается на наклонный рольганг 13, который подает ее на пост для закрепления в хомуте 6 с необходимым вылетом, затем подобным образом подается вторая труба до упора в первую. Зафиксировав вторую трубу в хомуте 7 силовым механизмом 8, вторая труба отводится на расстояние^ обеспечивающее ввод торцователя 17, затем трубы сжимаются силовым приводом 8, торцы Обрабатываются и на место торцователя вводится нагреватель 18,

После нагрева и вывода нагревателя торцы сжимаются с усилием осадки. Зафиксировав в хомутах сваренные трубы, включают лебедку 14 и установка перемещается на необходимое расстояние. При этом первая труба укладывается в траншею, а первая пара зажимных хомутов, удерживающих сваренный стык под усилием осадки, автоматически перемещаясь, отклоняет

ролик 10, который затем автоматически возвращается в исходное положение и поддерживает трубу, которая сходит с наклонного рольганга 13. Вторая пара зажимных хомутов подается на стол 11 подъема, поднимается в исходное для работы положение, устанавливается на направляющей 26 и следующая труба подается на наклонный рольганг 13 и перемещается до соприкосновения торцов.

После зажатия концов плети и трубы цикл обработки и сварки труб повторяется. Окончив обработку и сварку труб во второй паре зажимных хомутов, оператор освобождает первую пару хомутов и перемещает их в исходное положение. Для загрузки стола 11 подъема включают лебедку 14, перемещая установку на новое место. В зависимости от размеров труб в данной установке может быть две и более автономных пар зажимных хомутов.

Перемещение установки может производиться как транспортным средством, так и с помощью лебедки 14, трос которой может закрепляться за якорь либо за раму канавокопателя.

За счет наличия двух автономных пар подвижного и неподвижного хомутов, связанных с силовым приводом, осуществляется одновременная укладка сваренных труб в траншею и сварка последующих заготовок труб, а также за счет наличия крытой платформы, служащей для хранения и механизированной подачи труб на сварку, повышается производительность труда, улучшаются условия труда операторов.

Размещение труб на крытой платформе защищает трубы от отрицательно влияющих атмосферных осадков и солнечных лучей, что в результате повышает качество сварного шва, т.е. качество сварки.

Каждая автономная пара зажимных хомутов в исходном положении устанавливается на направляющую под углом наклона, соответствующем углу наклона свариваемых труб, что уменьшает напряжения в сварных швах от изгиба плети.

## 2.4 Проблема сварки полимерных труб при пониженных температурах

Основной проблемой сварки полиэтиленовых труб является сильная зависимость качества соединения от температуры окружающего воздуха. Испытания сварных соединений изготовленных при температуре воздуха ниже регламентированных значений показывают, что такие швы обладают низкой долговечности. Такой шов преждевременно разрушается в зоне сплавления.

Данный негативный эффект связан с температурными напряжениями, возникающим в материале труб из-за неравномерности нагрева. Для получения качественного шва необходимо образование в зоне сварки сплавления сферлитной структуры (нежелательным является сплавления ленточной структуры).

Так при благоприятных тепловых режимах ленточные сплавления выталкиваются в процессе сварки в грат и вследствие релаксации расплава трансформируется в сферолитные.

Формирование ленточной структуры в зоне сплавления объясняется повышением температуры кристаллизации деформируемых полимерных расплавов [34].

Также, учитывая расчеты, описанные в исследовании [35], термические напряжения, получающиеся при сварке, растут с уменьшением значения температуры окружающего воздуха. Наибольшему влиянию данных напряжений подвергается зона сплавления. В условиях, когда окружающий воздух охлажден до температур ниже регламентированных значений, для получения нужного объема расплава увеличивают длительность воздействия контактного нагревателя на свариваемые поверхности. Но в этом случае нагревается только малая длина труба находящаяся вблизи шва.

Чем менее однородно температурное поле в материале труб рядом со стыком, тем больше возникает вредных термических напряжений. Рост

напряжений не способных рефлексировать может привести к появлению и росту термических трещин в зоне сварки.

На основе выше сказанного можно сделать предположение, что проблему низкой температуры окружающего воздуха можно решить путем прогрева материала трубы на небольшом расстоянии от торца. Это позволит снизить неоднородность теплового поля в процессе сварки (с использованием обычных режимов), что приведет к снижению термических напряжений. Вместе с этим, при охлаждении шва целесообразно проводить внутри камеры из теплоизолирующего материала.

Если сравнить теплотехнические характеристики металла и пластмассы, то можно заметить, что теплопроводность полимеров 100...200 раз ниже.

Коэффициент теплопроводности полиэтилена по табличным данным составляет 0,16...0,42 Вт/(м·°С), при этом у стали данный показатель – 25...88 Вт/(м·°С) [29]. Именно из-за этого тепловой деструкции подвергается незначительная часть материала, ограниченная изотермой +80·°С [16].

Одновременно с этим, нагретые участки полиэтилена охлаждаются значительно медленнее, чем металлы.

Технологические возможности контактной сварки полиэтиленовых деталей раскрыты не до конца.

Так сохранившаяся под действием нагревательного элемента сварочной установки тепла могла бы использоваться с пользой в условиях сварки при низких температурах воздуха.

Известен способ осуществления сварки при низкой температуре воздуха окружающей среды [19]. Он основан на использовании изотермы, которая обращена выпуклой частью к сварному шву, при этом зона термического влияния локализована в окрестностях сварного шва [30].

Рисунок 2.19 показывает, как распределена температура в тощине материала трубы при низкой температуре окружающего воздуха (-40 °С).

Примечательно, что температурное поле при рассмотрении распределения по толщине имеет однородный вид. Так различие температур в средней части и на свободных поверхностях равно 10 °С. По этой причине в процессе оплавления достаточным является обеспечение совпадения зависимостей температур на отрезке, проходящей по средней части стенки свариваемой трубы.

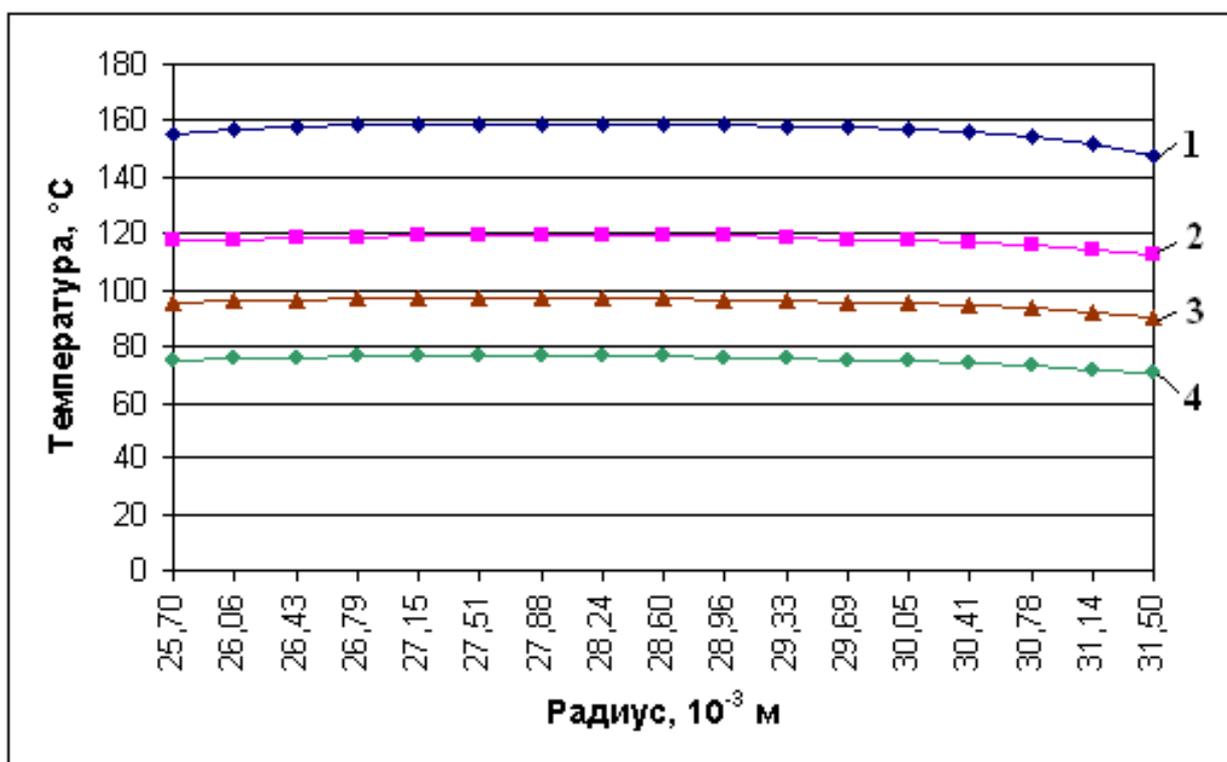


Рисунок 2.19 – Значение температуры в зависимости от расстояния z (расстояние от нагревательного элемента толщину) в момент времени  $t=110$  с при температуре воздуха  $T_0=-40$  °С: 1 –  $z=1$  мм; 2 –  $z=2$  мм; 3 –  $z=3$  мм; 4 –  $z=4$  мм.

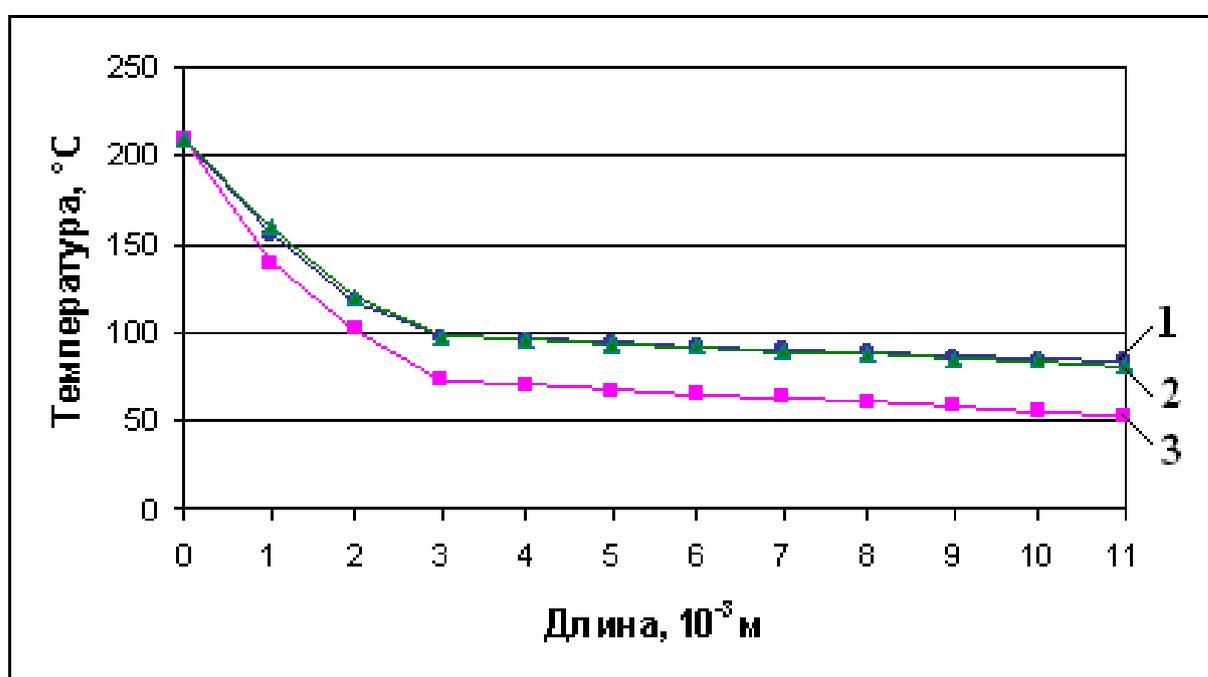
Как видно из рисунка 2.20 –достижение необходимых температур при сварке на холодном воздухе может быть обеспечено повышением длительности нагрева.

Совпадение температурных полей в зоне сварки при различных значениях температуры окружающей среды (в том числе и ниже

регламентированных) может быть обеспечено, если будет достигнута одинаковая глубина проплавления. Это показано на рисунке 2.21.

Если сварке подвергается такие изделия как трубы марки ПЭ 80 SDR11, то при регламентированных температурах окружающего воздуха длительность оплавления – 55 секунд. В этом случае рассчитанная глубина проплавления равна 1,63 мм.

Чтобы достигнуть такую же глубину проплавления при температуре окружающего воздуха  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  длительность оплавления должна составлять 96 секунд



- 1 –  $t=55$  с при температуре воздуха  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- 2 –  $t=110$  с при температуре воздуха  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- 3 –  $t=55$  с при температуре воздуха  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Рисунок 2.20 - Значения температуры в зависимости от расстояния вдоль трубы

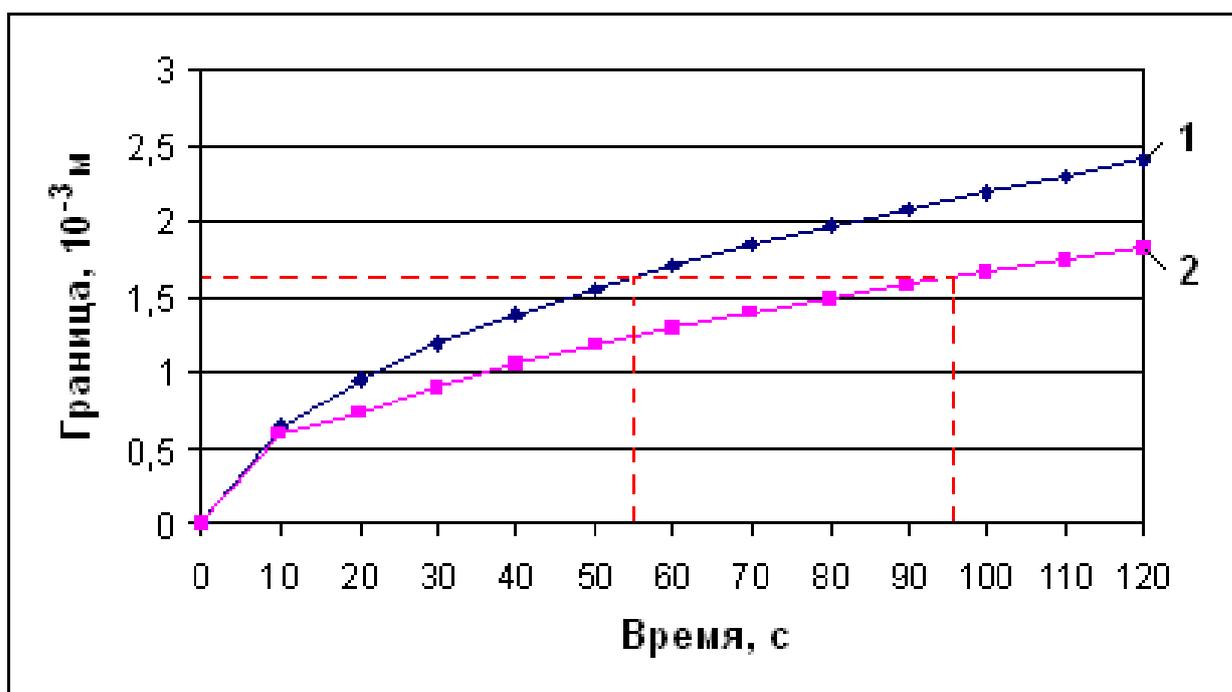


Рисунок 2.21 – Влияние температуры окружающей среды на границу проплавления: +20 °C (1); -40 °C (2)

## 2.5 Описание технического решения проблемы

В предлагаемом [31] способе при проведении сварочных работ взамен строительства теплового укрытия с требуемой температурой среды и продолжительной выдержкой свариваемого шва полиэтиленовых труб предлагается доводить температуру ЗТВ торцов свариваемых деталей до регламентной температуры с помощью предварительного подогрева. Чтобы это реализовать концы труб вводят с нагреваемым инструментом на значение глубины большей, чем ЗТВ. При этом инструмент нагрева имеет такую температуру, как будто сварка производится при регламентируемой температуре окружающей среды. Свариваемые детали выдерживают в инструменте нагрева до тех пор, пока в ЗТВ температурное поле не станет однородным. При этом непосредственное оплавление торцов производится с использованием другого инструмента.

Температура в ЗТВ при любых значениях температуры окружающей среды путем проводимых мероприятий приравнивается к

регламентируемому температурному диапазону. Произведенные в данных условиях сварные соединения обладают физико-механическими характеристиками соответствующие соединениям, выполненными при регламентированной температуре внешней среды.

Предложено решение по доработке технологии сварки таким образом, что отсутствует необходимость дополнительного нагрева концов труб перед сваркой и отсутствует необходимость использования изолированной камеры из утеплительного материала для замедления процессы охлаждения шва.

Необходимое температурное поле в ЗТВ достигается предпрогревом зоны сварки, а увеличением длительности времени оплавления, которая выбирается в зависимости от температуры воздуха с учетом физических характеристик трубы.

Данное решение работает следующим образом.

В описании способа [19] для концов свариваемых деталей 1 выполняют центрирование (рис. 1.1). Для этого используют наружную поверхность труб. Затем проводится мехобработка торцов деталей. Ее выполнение необходимо для того, чтобы обеспечить снятие окисленного слоя материала и плотное прилегание деталей.

Обработанные концы свариваемых деталей вводят в контакт с тефлоновой поверхностью нагревательного аппарата для осуществления их оплавления.

Длительность оплавления рассчитывается, учитывая температуру окружающего воздуха, физические свойства трубы, глубина проплавления торца трубы, достигаемая при регламентированных температурах окружающего воздуха.

После оплавления концов труб нагревательный элемент удаляется (убирается из зоны сварки) и затем происходит сжатие оплавленных концов. Детали удерживаются в сжатом состоянии в течение заданного промежутка времени.

Для того чтобы обеспечить охлаждение шва с требуемой скоростью, данный процесс осуществляется в ограниченном пространстве 1 заданных размеров. При этом за счет теплоты сварочного соединения 2 в воздух данного пространства находится регламентированном температурном диапазоне. Предотвращение преждевременного остывания воздуха в пространстве обеспечивается теплоизоляцией 3 (рисунок 2.22).

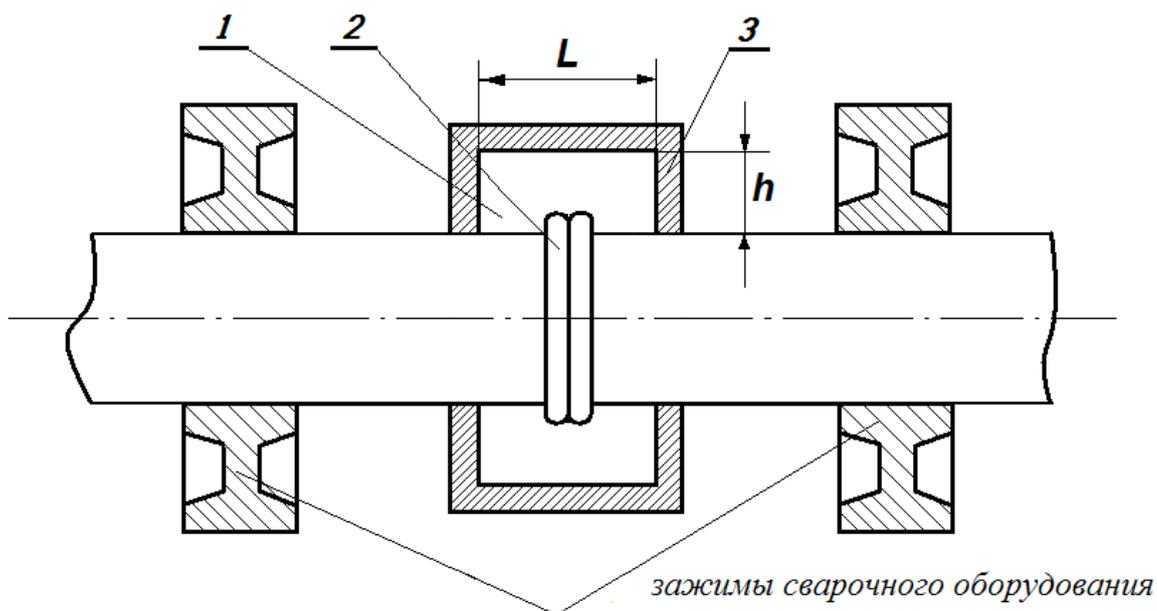
Объем воздуха в замкнутом пространстве влияет на скорость охлаждения соединения.

Чтобы обеспечить скорость остывания шва на регламентированном уровне необходимо регулировать объем пространства путем изменения длины  $L$  камеры и ее высоты  $h$ .

При сварке трубопроводов из полиэтилена ПЭ 80 SDR11 (ГОСТ 50838) при температуре внешней среды, лежащей в нормированном диапазоне, длительность оплавления составляет 55 секунд. В данном случае рассчитанная глубина проплавления составляет 1,63 мм (график №1 на рисунке 2.21). При температуре окружающего воздуха  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  для достижения данной глубины проплавления продолжительности оплавления должна составлять 96 секунд (график №2 на рисунке 2.21). В данном случае распределение температуры в ЗТВ практически одинаковое [32].

Производят осадку оплавленных торцев после удаления инструмента под давлением и выдержку под этим давлением в течение определенного времени в замкнутом ограниченном объеме. Этот замкнутый объём обеспечивает значение температуры окружающего воздуха вокруг свариваемого соединения исходя из регламентированного интервала температуры окружающего воздуха. При этом следует учесть, что с увеличением длины  $L$  камеры при фиксированном значении высоты  $h$  камеры происходит более быстрое снижение температуры. Это происходит из-за увеличения присутствия в камере поверхности трубы с низкой температурой. Увеличение высоты  $h$  камеры при фиксированном значении длины  $L$  приводит к существенно меньшему снижению температуры..

Расчетным путем были найдены геометрические размеры теплового контура ( $L=40$  мм,  $h=20$  мм), при которых температура среды в внутри изолированного пространства обеспечивается собственным теплом сварного шва на требуемом уровне. Расчеты проводились для сварки труб марки ПЭ 80 SDR11 (ГОСТ 50838). Результаты представлены на рисунке 2.23 [33].



- 1 – Ограничитель объёма;
- 2 – Сварное соединение;
- 3 – Теплоизолирующий материал

Рисунок 2.22 – Остывание сварного шва в камере из теплоизоляционного материала

В результате при любой температуре окружающей среды, за счет замкнутого теплового контура вокруг ЗТВ и тепла от сварного шва обеспечивается такое значение температуры окружающего воздуха, которое лежит регламентированном диапазоне.

Качественная сварка обеспечивается путем увеличения длительности оплавления до достижения такой же глубины проплавления торца детали, как и при регламентированных температурах окружающей среды. При этом требуемая скорость охлаждения сварки обеспечивается за счет теплоты

сварного соединения и регулируется путем изменения соотношения горячей и холодной частей сварного соединения внутри теплового контура. Произведенное при таких мероприятиях сварное соединение обладает такими же физико-механическими характеристиками, как сварка полученная при температуре окружающей среды, лежащей в регламентированном интервале.

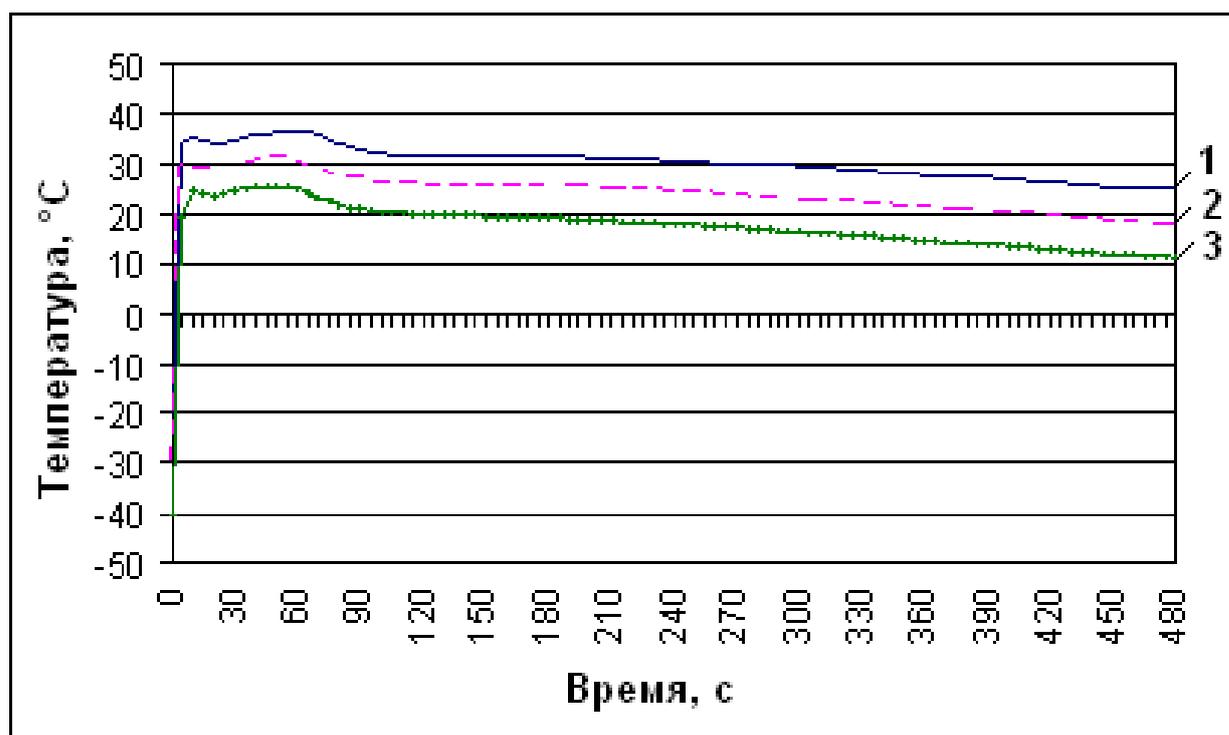


Рисунок 2.23 – Колебание температуры воздуха внутри камеры из теплоизоляционного материала при остывании сварного шва при различных значениях внешней температуры воздуха: -20 °C (1); -30 °C (2); -40 °C (3)

## 3 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБ

### 3.1 Параметры процесса сварки полимерных труб

Основными параметрами технологического процесса при сварке полиэтиленовых труб являются:

- температура нагревателя  $\theta_n$ ;
- время оплавления  $t_{опл}$ ;
- время прогрева  $t_{пр}$ ;
- время технологической паузы  $t_{пауз}$ ;
- время осадки  $t_{ос}$ ;
- давление при оплавлении  $P_{опл}$ ;
- давление при нагреве  $P_{нагр}$ ;
- давление при осадке  $P_{ос}$ .

К дополнительным параметрам относятся – температура окружающей среды  $\theta_c$ , геометрические характеристики свариваемых поверхностей, физические характеристики материала и др.

От данных параметров зависят эксплуатационные характеристики сварки, структура материала в различных зонах соединения, производительность процесса получения сварки и другие качественные характеристики соединения [3-5].

Исследование эффективности различных режимов сварки полиэтиленовых труб проводят следующими способами [36, 39]

- исследование кристалличности с помощью дифференциально-сканирующей калориметрии
- определение свойств материала в зоне сварки полиэтиленовых труб помощью механических испытаний;
- продолжительными испытаниями в активной среде.

Схема зон сварного соединения труб из полиэтилена показана на рисунке 3.1. Чтобы исследовать характеристики сварки, из каждой указанной области осуществляют вырезку образцов-плёнок. После, в соответствии с ГОСТ 14235, проводят испытания на растяжение.

Данная методика испытаний позволяет определить механические свойства материала для каждой из указанных на рисунке 3.1 областей сварного стыкового соединения.

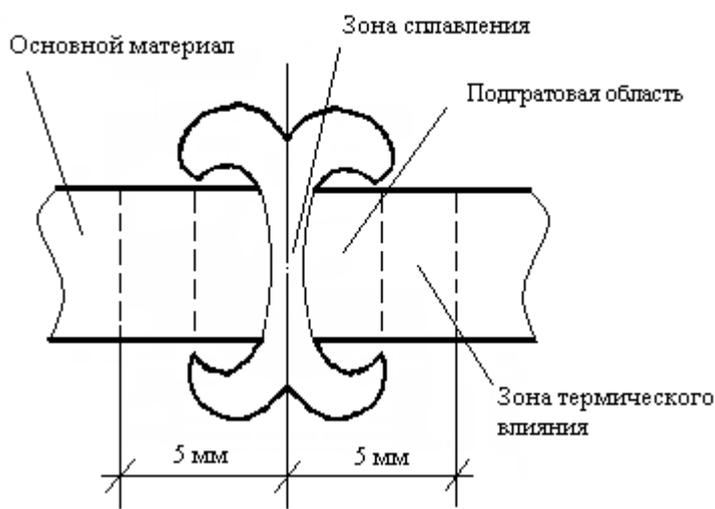
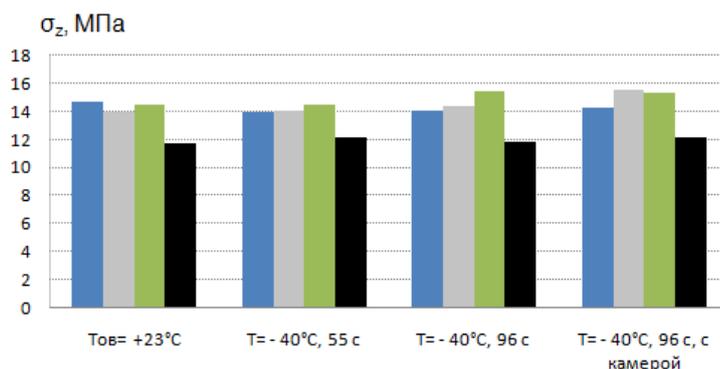


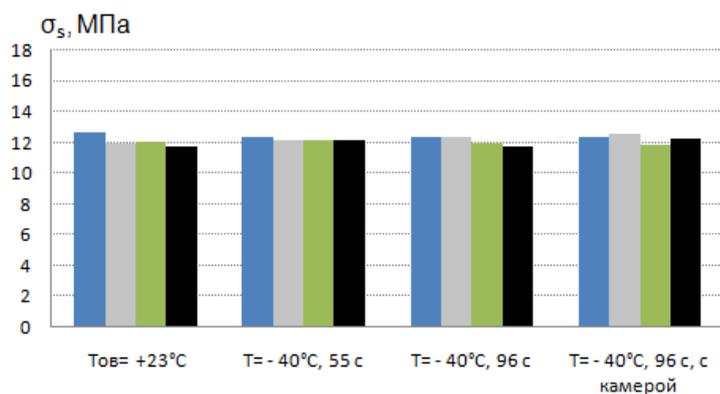
Рисунок 3.1 – Схема зон сварного соединения труб из полиэтилена

Ниже показаны результаты испытаний на разрывной машине образцов полученных из различных областей сварных соединений. Диаграммы на рисунке 3.2 показаны для сварных соединений полученных при комнатной температуре окружающего воздуха  $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$  по стандартной технологии (табл.3.1), при температуре окружающего воздуха, равной  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  без использования предварительного нагрева.

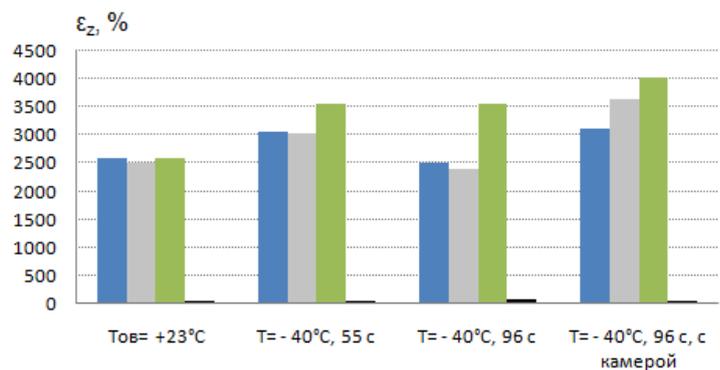
Результаты указывают на то, что в сварном соединении слабой прочностью вне зависимости от температуры внешней среды обладает область сплавления. Значения предела текучести материала в области сварок произведенных при различных условиях, сильно не различаются и находятся на одном уровне в пределах  $11,7\dots 12,6\text{ МПа}$ . Область сплавления обладает низкими значениями относительного удлинения при максимальной нагрузке.



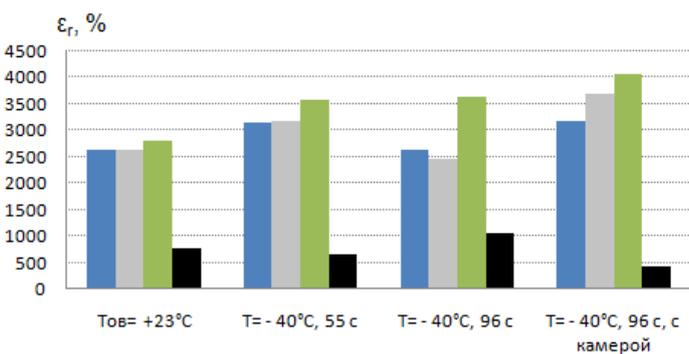
а)



б)



в)



г)

■ Основной материал ■ ЗТВ ■ Подгратовая область ■ Зона сплавления

Рисунок 3.2 – Результаты испытаний материала из различных зон термического влияния сварки: а) прочность при растяжении б) предел текучести; в) относительное удлинение при максимальной нагрузке; г) относительное удлинение при разрыве

Таблица 3.1 – Параметры режима сварки ПЭ труб

Номинальная толщина стенки, мм	Оплавление стыка, мм	Нагрев, сек	Вывод нагревательного элемента, сек (max время)	Осадка, время процесса сварки, сек	Охлаждение стыка под давлением $P = 0,15 \pm 0,01 \text{ N/mm}^2$ сек (min время)
4,5	0,5	45	5	5	6
4,5 ... 7	1,0	45 ... 70	5 ... 6	5 ... 6	6 ... 10
7 ... 12	1,5	70 ... 120	6 ... 8	6 ... 8	10 ... 16
12 ... 19	2,0	120 ... 190	8 ... 10	8 ... 11	16 ... 24
19 ... 26	2,5	190 ... 260	10 ... 12	11 ... 14	24 ... 32
26 ... 37	3,0	260 ... 370	12 ... 16	14 ... 19	32 ... 45
37 ... 50	3,5	370 ... 500	16 ... 20	19 ... 25	45 ... 60
50 ... 70	4,0	500 ... 700	20 ... 25	25 ... 35	60 ... 80

### 3.2 Общие сведения по методикам контроля

Существуют два типа методов контроля сварных соединений – разрушающие методы и неразрушающие. Они отличаются тем, что первый тип методов приводит как разрушению тестируемых образцов.

Также существуют методы контроля, которые обязательны для использования - так называемые экспресс методы. Обычно они проводятся лабораториями организаций, выполняющих сварку трубопроводов. Так же существуют специальные методы контроля, рекомендуемые отраслевыми испытательными центрами для подтверждения результатов экспресс методов контроля и для детального изучения свойств получаемых сварных соединений.

Для контроля качества стыковой сварки нагретым инструментом полимерных труб используются [14, 36]:

- визуальный осмотр соединений;
- механические испытания на разрывной машине;
- контроль дефектов с использованием ультразвука;
- испытание на изгиб при статической нагрузке;

- тестирования соединения труб давлением;
- испытания динамические испытания сварного соединения на растяжение.

Осмотр сварных соединений состоит из визуального контроля и измерительного. Он заключается в поиске таких дефектов соединения, как сдвиг поверхностей, оценка геометрии грата. При использовании данного метода контроля необходимо помнить, что высота грата зависит от длительности, температуры нагрева и силы сжатия свариваемых деталей. Также необходимо понимать, что колебание высоты грата связано с неоднородностью проплавления стыка по его примеру. При этом если обнаружен сдвиг труб, то это означает в допущении ошибки на этапе центрирования.

Проблема внешнего осмотра заключается в малой информативности и неточности данного метода. Это связано с тем, на форму грата оказывают влияние также и температура наружного воздуха, физические свойства материала. Поэтому даже при одинаковых условиях сварки форма грата получается различной. Неточность метода заключается в его возможности выявления только критических крупных дефектов соединения.

Механическим испытаниям на разрывной машине подвергаются сварные соединения выполненные нагретым инструментом встык. Качественным критерием в этом методе является характер разрушения сварки. Дефекты, которые может выявить такой метод – сквозной непровар, связанный с нарушением режимов сварки или качеством предварительной подготовки заготовок. Механическим испытаниям на разрывной машине является пока основным и единственным оперативным методом оценки качества. Показателем качества сварки являются характеристические особенности разрушения. Такой метод позволяет выявлять дефекты недоступные при визуальном осмотре соединений.

**Ультразвуковой контроль (УЗК)** в своей основе содержит свойство ультразвука отражаться и преломляться от границ раздела сред, имеющих различные акустические свойства. В том числе ультразвук отражается

практически полностью от трещин и других дефектов, которые заполнены газами. С помощью ультразвукового контроля выявляются внутренние дефекты: несплавления, трещины, отдельные или цепочки (скопления) пор, включения. Методика УЗК позволяет выявлять дефекты площадью более  $1,5 \text{ мм}^2$  [38].

**Испытания на статический изгиб** проводятся с использованием образцов-полосок, у которых по центру расположен сварной шов. При испытании на статический изгиб определяют угол изгиба образца, на котором проявляются первые признаки разрушения.

Требуется, чтобы образец смог выдержать угол деформирования  $\geq 160^\circ$  без появления видимых дефектов (трещины) и без разрушения. В этом случае результаты тестирования будут считаться положительными.

### 3.3 Методика визуально-измерительного контроля

Визуально-измерительному контролю можно подвергать сварные соединения полиэтиленовых труб, выполненные в стык.

При оценке внешнего вида шва, с использованием данного метода контроля необходимо руководствоваться следующими пунктами:

- цвет валиков должен быть одного цвета с трубой и не иметь трещин, пор, инородных включений;
- необходимо проверить симметричность валиков рядом со стыком по всей окружности трубы;
- необходимо проверить, чтобы отношение ширины валиков грата к общей ширине грата лежало в диапазоне  $0,3 \dots 0,7$  в независимости от места шва. Сварка осуществлялась с использованием соединительных деталей то данное соотношение должно лежать в диапазоне  $0,2 \dots 0,8$ ;
- смещение наружных кромок свариваемых заготовок не должно превышать 10 % от толщины стенки трубы (детали);

- впадина между валиками грата (линия сплавления наружных поверхностей валиков грата) не должна находиться ниже наружной поверхности труб (деталей);

- угол излома сваренных труб или трубы и соединительной детали не должен превышать 5°.

Геометрические характеристики валиков грата должны соответствовать значениям, представленным в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Размерные характеристики шва

Параметры наружного грата	Условное обозначение труб								
	SDR11 140x12,7	SDR17, 6 160x9,1	SDR11 160x14,6	SDR17, 6 180x10, 2	SDR11 180x16, 4	SDR17, 6 200x11, 4	SDR11 200x18, 2	SDR17,6 225x12,8	SDR11 225x20,5
Высота, мм	3,0-5,0	2,5-4,5	3,0-5,0	2,5-4,5	3,5-5,5	3,0-5,0	4,0-6,0	3,0-5,0	4,5-6,5
Ширина, мм	9,0-13,0	6,5-9,5	10-15	6,5-9,5	11-16	8,5-12	13-18	9,0-13,0	14-21

Качественный шов (рис. 3.3 а) имеет гладкие и симметричные валики грата округлой формы. При этом геометрические характеристики грата равно как и внешний вид шва должны полностью соответствовать требованиям указанным выше.

Браком считается шов с несимметричными валиками грата одинаковой высоты в одной плоскости, но различной в противоположных точках шва с различием по высоте более 50 % в противоположных точках шва (рис. 3.3 б). Причиной такого брака является превышение допустимого зазора между торцами труб перед сваркой.

Брак в виде чрезмерно-большого малого грата округлой формы (рис. 3.3 в). В этом случае величина наружного грата по высоте и ширине меньше предельных значений, показанных в таблице 3.2. Данный брак возникает при недостаточной силе сжатия деталей или недостаточном нагреве кромок.

Брак в виде чрезмерно-большого грата округлой формы (рис. 3.3 г). В этом случае величина наружного грата по высоте и ширине больше

предельных значений, показанных в таблице 3.2. Данный брак возникает при слишком высокой силе сжатия деталей или при чрезмерном нагреве кромок.

Брак в виде несимметричности грата по окружности стыка (рис. 3.3 д). Данный брак возникает, когда различие по высоте и ширине валиков грата по всей окружности шва превышает 40%, возникает по причине неоднородности материала или толщин свариваемых труб.

Брак в виде узкого, высокого грата. Данный брак возникает по причине чрезмерного давления при осадке стыка при пониженной температуре нагревателя.

Брак в виде малого грата с впадиной между валиками (рис. 3.3 ж). Данный брак возникает по причине низкой температуры нагревателя при отсутствии достаточного нагрева.

Брак в виде неравномерность (асимметричность) валиков грата (рис. 3.3 з) при различии по высоте валиков грата в одной плоскости более 40 % с одновременным смещением образующих труб более 10 % от толщины стеки возникает вследствие смещения труб относительно друг друга.

Брак в виде неравномерного распределения грата по периметру шва (рис. 3.3 и). Данный брак возникает из-за смещения нагревателя в процессе прогрева. Высота грата в месте неравномерного выхода больше его ширины, впадина между валиками грата нечетко выражена или отсутствует. В противоположной точке шва грат имеет размеры, меньшие на 50 % и более.

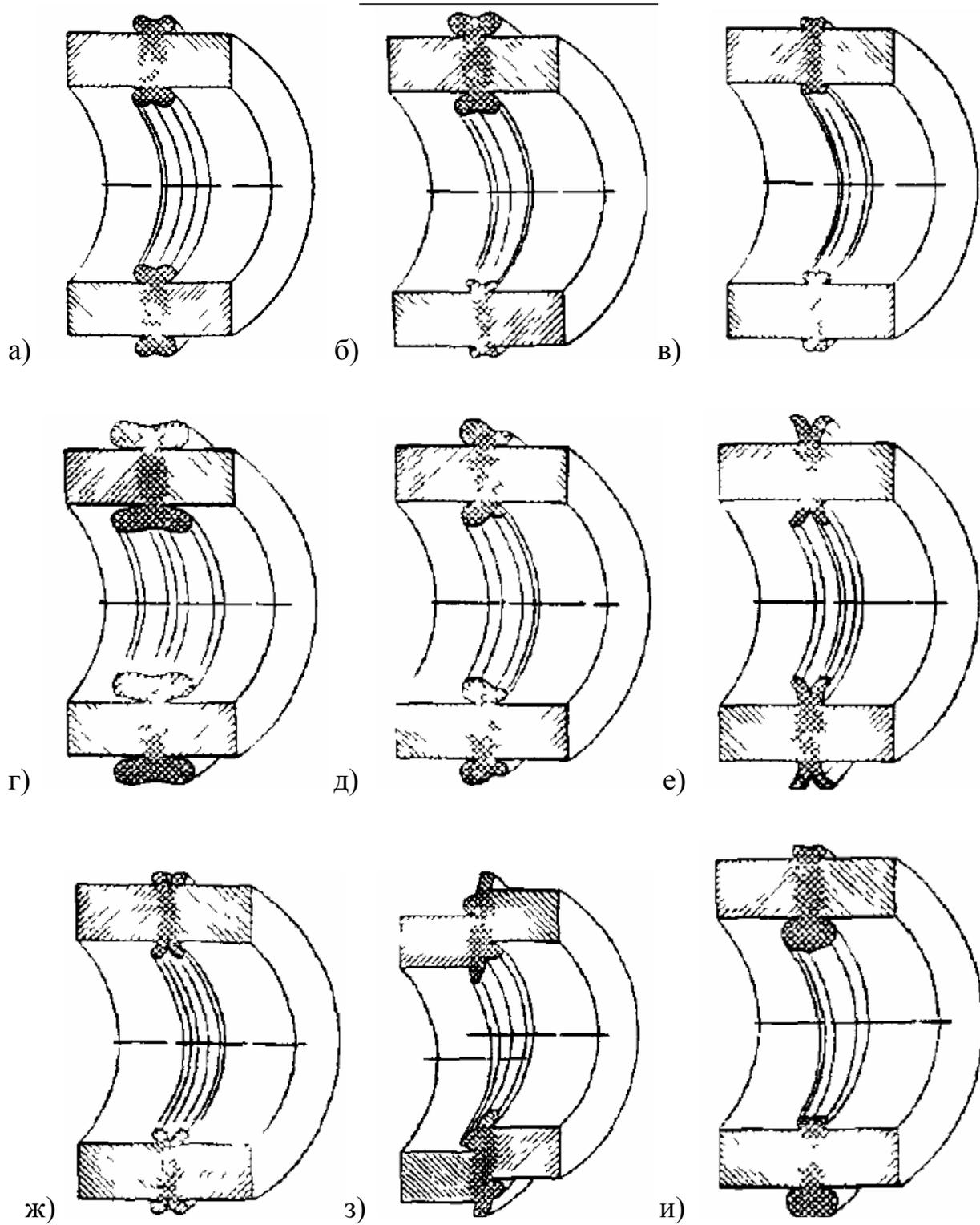


Рисунок 3.3 – Брак при сварке полимерных труб

При условии соответствия грата описанным требованиям считается, что визуально-измерительный контроль пройден успешно.

Результаты внешнего осмотра и проверки размеров сварочного грата соединений, выполненных сваркой нагретым инструментом встык, считают положительными, если они отвечают описанным выше требованиям.

В том случае если присутствует повреждение валика, которое имеет небольшой размер ( $< 2$  см) и не затрагивает основной материал трубопровода, то оно не считается за брак.

Оценку внешнего вида сварных соединений проводят визуально, применение увеличительных приборов не требуется, оценку производят, сравнивая оцениваемое соединение с контрольным образцом, также производят оценку размеров наружного сварочного грата.

Измеряют швы как минимум на двух противоположных участках периметра шва. Контролируют ширину и высоту наружного грата с применением штангенциркуля по ГОСТ 166. Допустимо использовать шаблоны проходных и непроходных размеров.

Симметричность контролируют путем выполнения замеров валика грата. При этом ширина валика измеряется с применением измерительной лупы в соответствии с нормативной документацией ТУ 3-3.125-81.

Смещение кромок может измеряться с использованием специального шаблона. Схема измерения смещения кромок изображена на рис. 3.4. Производят установку шаблона по образующей одной из труб, прижимают шаблон к трубе в области около шва. Смещение кромок при этом вызывает подъем шаблона над поверхностью трубы, которое можно наблюдать на другом конце опорной площадки шаблона. С применением щупа по ТУ 2-034-0221197-011-91 замеряют зазор между поверхностью заготовки и пяткой шаблона. Далее производят расчёт отношения (в процентах) измеренного абсолютного значения смещения кромок к номинальной толщине стенки трубы. Точность расчётов должна составлять 1%.

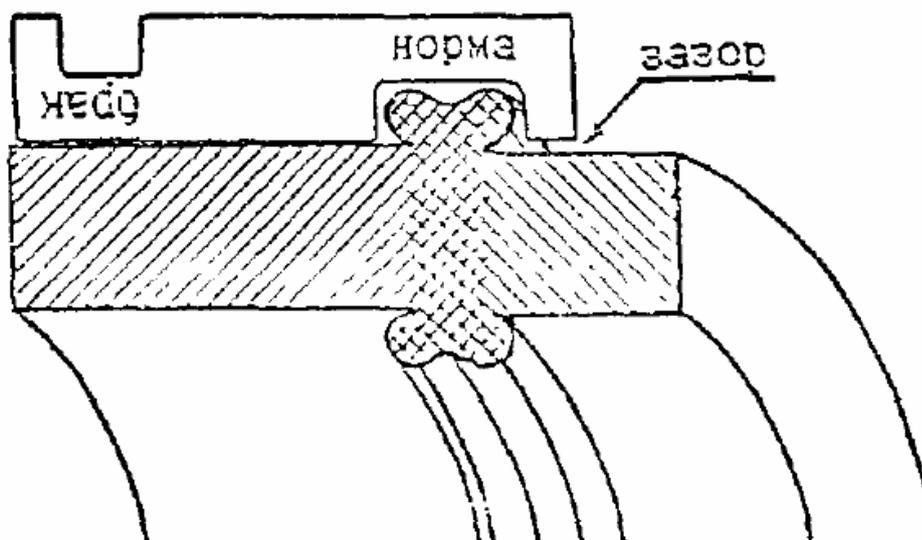


Рисунок 3.4 – Применение шаблона для контроля шва

### 3.4 Методика испытания на осевое растяжение

Механические испытания на разрывной машине можно применять для исследования стыковой сварки полиэтиленовых труб.

Критерием определения качества сварного соединения, выполненного сваркой встык является характер разрушения образцов.

Существуют следующие варианты разрушений:

- Разрушение первого типа. В этом случае разрушение наблюдается после формирования "шейки" - типичного сужения площади поперечного сечения образца во время растяжения на одной из половин испытываемого образца. Разрушение наступает, как правило, не ранее чем при достижении относительного удлинения более 50 % и характеризует высокую пластичность. Линия разрыва проходит по основному материалу и не пересекает плоскость сварки.
- Разрушение второго типа. В этом случае разрушение начинается при достижении предела текучести в момент начала формирования "шейки". Разрушение наступает при небольших величинах относительного удлинения, как правило, не менее 20 и не более 50 %, и характеризует низкую

пластичность. Линия разрыва пересекает плоскость сварки, но носит вязкий характер.

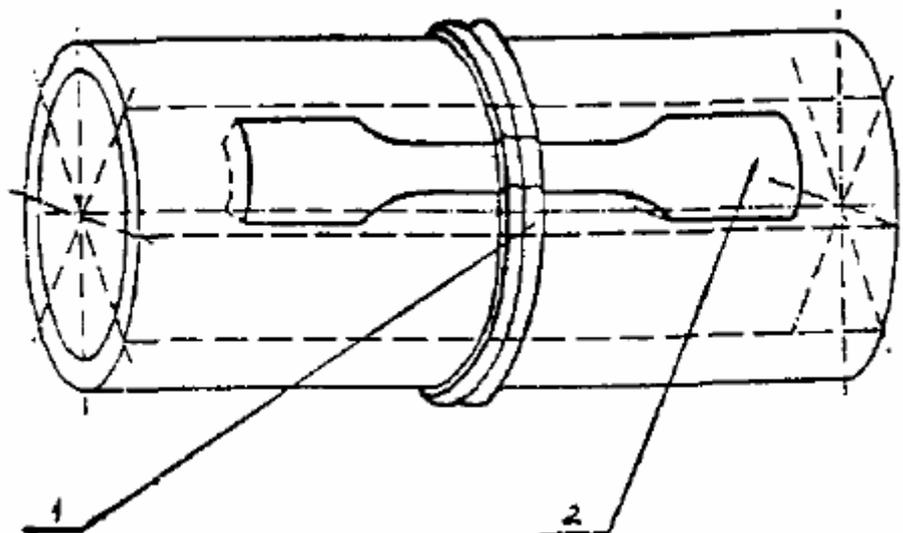
- Разрушение третьего типа. В этом случае разрушение происходит до достижения предела текучести и до начала формирования "шейки". Разрушение наступает при удлинении образца, как правило, не более 20 % и характеризует хрупкое разрушение. Линия разрыва проходит точно по плоскости сварки.

Результаты испытания считаются положительными, если при испытании на осевое растяжение не менее 80 % образцов имеют пластичный характер разрушения I типа. Остальные 20 % образцов могут иметь характер разрушения II типа. Разрушение III типа не допускается.

При испытании на осевое растяжение определяются также предел текучести и относительное удлинение при разрыве. По результатам испытаний формируют протокол по форме, установленной требованиями СНиП 3.05.02.

Испытания разрывной машине путем тестирования образцов в форме лопаток (второй тип в соответствии с ГОСТ 11262). Образцы-лопатки получают с использованием механической обработки из отрезков сварных соединений труб, имеющих длину не менее 160 мм. Из каждого контролируемого стыка производят вырезку (вырубку) не менее пяти образцов, которые равномерно распределены по периметру шва трубы.

При этом необходимо соблюдать параллельность оси образца и оси трубы. Толщина образца должна соответствовать толщине стенки трубы. Сварное соединение должно располагаться посередине образца с точностью  $\pm 1$  мм. Образцы не должны иметь таких дефектов, как раковины, трещины и должны быть свободны от других дефектов. Схема, по которой производится изготовление образцов-лопаток для испытаний на осевое растяжение, приведена на рис. 4.3.



1 – контролируемый стык;

2 – расположение образца для механических испытаний

Рисунок 3.5 – Схема вырезки образцов из стыка для механических испытаний

Перед испытанием производят кондиционирование образцов по ГОСТ 12423 при температуре  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  не менее 2 ч.

Испытания проводят со скоростью раздвижения зажимов испытательной машины –  $(100 \pm 10)$  мм/мин для образцов труб с номинальной толщиной стенки менее 6 мм и  $(25 \pm 2,0)$  мм/мин для образцов труб с номинальной толщиной стенки 6 мм и более.

Существуют требования, указывающие на то, что испытание образцов на разрывной машине следует проводить только спустя сутки после окончания сварки.

В рассматриваемой работе использовалась разрывная машина Р-50 (рис. 3.6). Для повышения эффективности измерений в базовую комплектацию машины были внесены следующие изменения:

- демонтирована приборная стойка разрывной машины;
- на месте приборной стойки, справа от испытательной установки, установлен силовой блок (основные функции: питание электронных систем

разрывной машины, управление электроприводом, электропривод, защита от аварийных ситуаций, сигнализация);

- кнопочная станция заменена на микропроцессорный пульт оператора (основные функции: управление разрывной машиной; измерение нагрузки, перемещения, деформации, скорости, времени; вывод данных на принтер и персональный компьютер; расчет результатов испытания в соответствии с ГОСТ 1497-84);

- на испытательной установке (сверху) установлены силоизмерительный датчик, подвесная система и арретир нового типа.

Техническая характеристика модернизированной машины Р-50:

1. Нормируемые диапазоны измерения нагрузки – 0...50 кН:

- датчик силы 50 кН: от 2 до 50 кН;
- датчик силы 5 кН: от 0,2 до 5 кН;
- датчик силы 0,5 кН: от 0,02 до 0,5 кН;

2. Погрешности съема измерений силы нагрузки в рамках диапазона: не более 1%.

3. Индикация нагрузки от 0 до 50 кН с дискретностью:

- датчик силы 50 кН: 1 Н;
- датчик силы 5 кН: 0,1 Н;
- датчик силы 0,5 кН: 0,01 Н

Число сегментов индикатора нагрузки – 5.

4. Диапазон измерения перемещения (без учета захватов) от 0 до 900 мм.

5. Погрешность измерения перемещения не более:

- + 0,1 мм в диапазоне от 0 до 50 мм;
- + 0,5 мм в диапазоне от 50 до 900 мм.

6. Дискретность измерения перемещения: 0,01 мм.

7. Диапазоны скорости перемещения подвижной траверсы: 0,1...500 мм/мин.



Рисунок 3.6 – Измерительный комплекс на базе разрывной машины Р-50

Управление разрывной машиной осуществляется с клавиатуры микропроцессорного пульта оператора. Возможно отображение и печать диаграмм и протоколов испытаний.

### 3.5 Методика контроля качества с использованием ультразвука

Для контроля качества сварки полиэтиленовых труб встык может применяться ультразвуковой дефектоскоп.

Число стыковых соединений подлежащих ультразвуковому контролю регламентируется в СНиП.

При таком виде контроля применяются современные дефектоскопы, имеющую функцию записи и запоминания руль татов УЗК контроля. Такие дефектоскопы позволяют выводить требуемую информацию как на настольный компьютер, ноутбук или планшет, так на принтер.



Рисунок 3.7 – Состав комплекта для ультразвукового контроля

Комплекс «СКАРУЧ» состоит из следующих узлов:

1. МП - механическое приспособление с датчиком измерения пройденного пути.
2. Малогабаритный восьмиканальный дефектоскоп УИУ «СКАНЕР».
3. ИК – информационный кабель.
4. АБ – многоэлементный акустический блок.

Обычно методика работы ультразвуковым дефектоскопом и порядок корректировки его основных параметров указаны в соответствующей инструкции.

Ультразвуковой дефектоскоп обеспечивает обнаружение следующих дефектов: трещина, поры различных размеров, нежелательные включения посторонних фрагментов в шов, величина смещения кромок деталей.

Критерии для признания соединения браком основанные на применении ультразвукового дефектоскопа:

- наличие скоплений дефектов, численное значение эквивалентной площади которых  $<10\%$  средней толщины стенки;
- смещение кромок деталей на величину  $>10\%$  от средней толщины стенки;
- наличие скоплений дефектов, численное значение эквивалентной площади которых  $<10\%$  средней толщины стенки, но при этом их протяженность  $>15\%$  от длины окружности трубы;

Оценка качества стыковых сварных соединений полиэтиленовых газопроводов производится по альтернативному признаку - "годен" или "не годен".

В данной работе применили измерительный комплекс «СКАРУЧ» на базе дефектоскопа «Сканер+» (рис. 3.7).

### 3.6 Методика испытания на статический изгиб

Испытаниям на статический изгиб подвергают соединения, которые выполнены сваркой нагретым инструментом.

Для испытаний используют образцы-полоски, у которых по центру расположен сварной шов. При испытании на статический изгиб определяются угол изгиба образца, при котором проявляются первые признаки разрушения. Результаты испытания можно считать положительными, если образцы без разрушения и появления трещин выдерживают изгиб на угол не менее  $160^\circ$ .

Испытания на статический изгиб выполняют на образцах-полосках, размеры которых приведены в табл. 3.3.

Образцы-полоски вырезают (вырубают) из контрольных стыков симметрично по периметру с одинаковым шагом в количестве не менее пяти шт.

Испытания выполняют по схеме, представленной на рисунке 3.8.

Таблица 3.3 – Размеры образцов для испытания на изгиб при статических нагрузках, мм

Размеры образца			Длина пролета между роликовыми опорами	Толщина траверсы
Толщина	Ширина	Длина		
$3 < h < 5$	20	150	80	4
$5 < h < 10$	20	200	90	8
$10 < h < 15$	30	200	100	12,5
$15 < h < 20$	40	250	120	16
$20 < h < 30$	50	300	160	25

Нагрузка передается на образец через траверсу, устанавливаемую на середине образца напротив сварного шва. Местное утолщение грата образца со стороны опорной траверсы снимается.

Испытательные образцы устанавливаются таким образом, чтобы внутренняя сторона трубы находилась в области растяжения.

Скорость приложения нагрузки должна составлять 50 мм/мин.

Испытания продолжаются до достижения угла изгиба  $160^\circ$ .

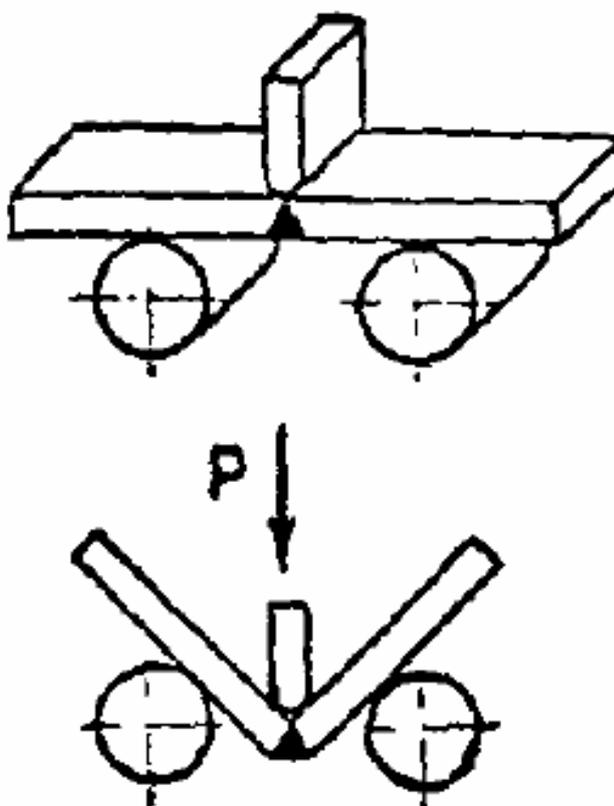


Рисунок 3.8 – Принцип проведения испытаний на изгиб при статической нагрузке

### 3.7 Улучшенная методика для испытаний на осевое растяжение

Существующие методы контроля качества сварных стыковых соединений полимерных труб являются недостаточно информативными, и при их помощи практически невозможно количественно определить прочность сварного соединения по стыку сварки. Некоторыми авторами высказывается мнение о невысокой информативности испытаний и низкой достоверности получаемых при этом результатов [42...46].

Одним из самых информативных способов контроля качества сварки полимерных трубопроводов является испытание на осевое растяжение. Несмотря на то, что прочность сварного стыкового соединения полимерной трубы меньше, чем прочность материала самой полимерной трубы, при испытаниях на разрыв образование «шейки» (рис. 3.9) происходит по основному материалу полимерной трубы из-за большей площади сечения по стыку сварки за счет образования наружного и внутреннего грата [14, 39].



1 – Исходный образец; 2, 3 – стадии разрушения

Рисунок 3.9 – Испытание образцов на осевое растяжение

Для количественной оценки прочности сварного стыкового соединения предложен способ испытаний сварных соединений с заданной площадью сварки, основанный на том обстоятельстве, что сварной шов по прочности, как правило, уступает прочности основного материала [40].

Для получения образцов сварного соединения с заданной площадью сварки, для соответствующего типоразмера пластмассовой трубы изготавливается шаблон из тонкого теплоизоляционного материала, размещаемого между торцами труб и препятствующего их сварке по всему периметру материала. Шаблон (рис. 3.10) обеспечивает получение образцов-лопаток с площадью сваренных участков, соответствующей или меньше, чем сечение рабочей части основного материала образца-лопатки.

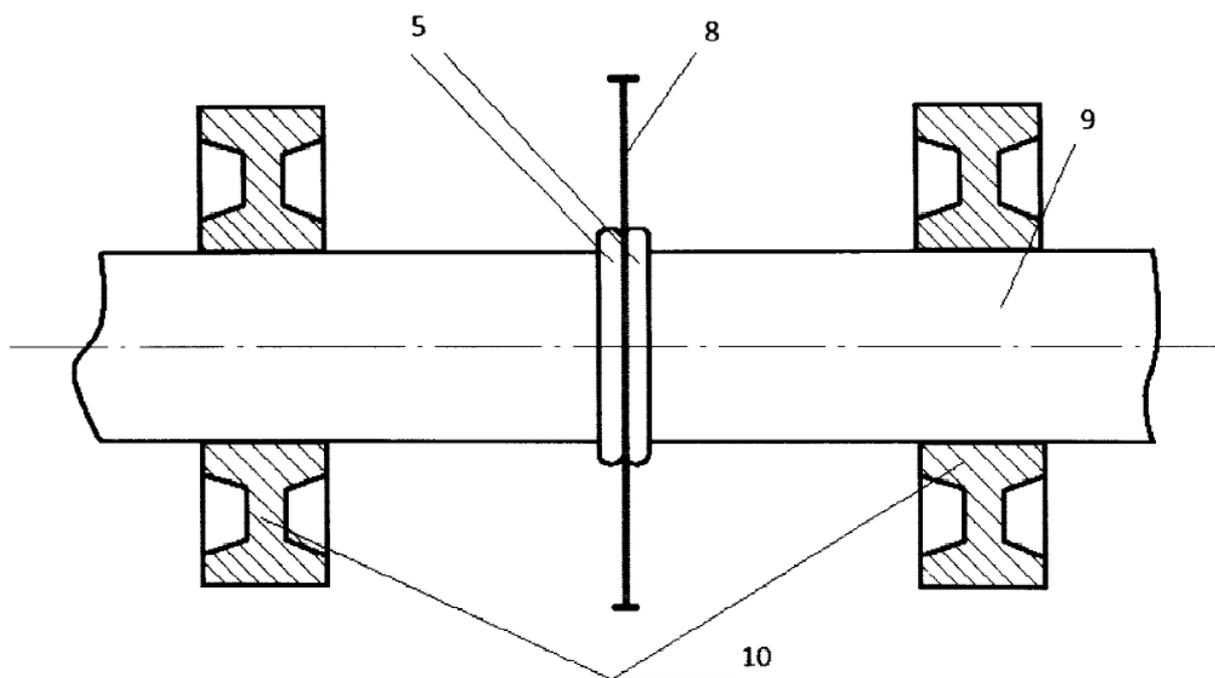
В процессе сварки шаблон устанавливается между торцами свариваемых труб после удаления нагретого инструмента, т.е. дальнейшее охлаждение сварного соединения под давлением осадки производится уже в контакте с шаблоном. Таким образом, достигается заданная площадь сварки. Полученные по ГОСТ 11262-80 образцы-лопатки испытывали на осевое растяжение. Так как наименьшей прочностью обладает область сварного соединения, то при условии равенства поперечного сечения образца-лопатки и стыка сварки, разрушение происходит по стыку сварного соединения.



Рисунок 3.10 – Шаблон для получения образцов

На рис. 3.11 приведен шаблон с искусственно нанесенными дефектами для исследования прочности сварного стыкового соединения так, чтобы реально сваренная площадь была равной или меньшей чем сечение рабочей части образца-лопатки. Внизу приведено сечение сваренной трубы по плоскости расположения шаблона: 1 - расположение трубы при сварке, 2 - вырез для сваривания торцов трубы, 3 - материал, препятствующий свариванию торцов трубы, 4 - площадь сваренного торца трубы, 5 - грат внешний, 6 - грат внутренний, 7 - ширина вырезаемого образца-лопатки.

На рис. 3.12 приведена схема осаживания под давлением сварного стыкового соединения с искусственно нанесенным дефектом (шаблоном): 8 - шаблон, 9 - полимерная труба, 10 - зажимы сварочного оборудования.



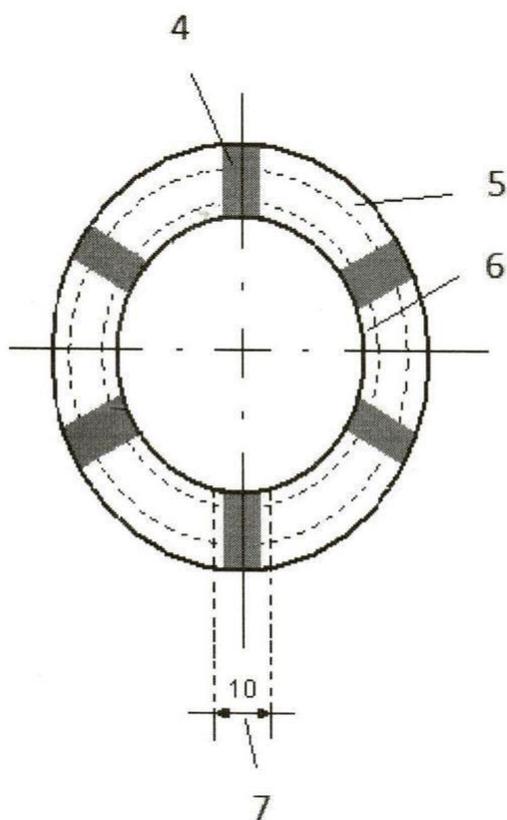
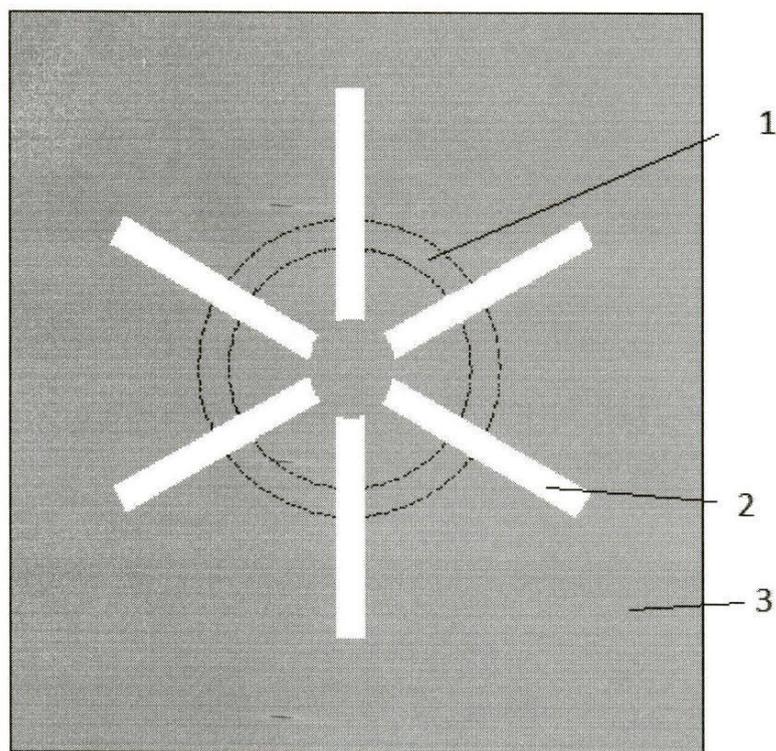
5 – грат внешний;

8 – шаблон;

9 – полимерная труба;

10 – зажимы сварочного оборудования

Рисунок 3.12 – Схема осаживания под давлением сварного стыкового соединения с искусственно нанесенным дефектом (шаблоном)



1 – расположение трубы при сварке; 2 – вырез для сваривания торцов трубы;  
 3 – материал, препятствующий свариванию торцов трубы; 4 – площадь  
 сваренного торца трубы; 5 – грат внешний; 6 – грат внутренний; 7 – ширина  
 вырезаемого образцопатки

Рисунок 3.11 – Шаблон для контрольной сварки и его расположение на трубе

Методика осуществляется следующим образом. Для исследуемого сварного стыкового соединения полимерной трубы заданного типоразмера заранее готовятся шаблоны из тонкого материала 3, препятствующего свариванию торцов трубы 1, например, из бумаги для офисной техники «Снегурочка», согласно рис. 4.8. Вырез 2 для сваривания торцов трубы располагается так, чтобы в образцах-лопатках для испытаний на растяжение площади сваренных участков 4 были равными друг к другу, а по величине равными или не большими, чем сечение рабочей части основного материала образца-лопатки 7. Затем концы свариваемых полимерных труб 9 устанавливают в зажимы сварочного оборудования 10, центрируют по наружной поверхности, производят срезание неровностей торца трубы, торцы труб приводят в непосредственный контакт с нагретым до или выше температуры плавления материала трубы инструментом, имеющим плоскую поверхность оплавления, затем инструмент удаляют, а вместо него вводят один из приготовленных шаблонов, и оплавленные торцы, между которыми находится шаблон 8, осаживают под давлением и выдерживают под этим давлением определенное время, диктуемое скоростью охлаждения и релаксационными процессами в сварном соединении (рис. 4.9). Материал, вытесненный из стыка под давлением осадки, образует внешний 5 и внутренний 6 сварочный грат, как при обычной сварке без использования шаблона.

Через 24 ч после производства сварки изготавливают образцы-лопатки типа 2 по ГОСТ 11262 [41] равномерно по периметру шва не менее пяти образцов так, чтобы область сварки находилась на середине образца-лопатки. Испытания на растяжение образцов-лопаток производят согласно ГОСТ 11262. Обработку результатов испытаний проводят принятыми методами.

Если сечения тестируемых заготовок одинаково и в поперечном направлении и в стыке сварки, то при испытаниях разрушение происходит по стыку сварки. Это связано с тем, что прочность в зоне сварки наименьшая.

Это позволяет при использовании данной методики определять прочность сварки по стыку с исключением влияния вклада гранта в получаемые прочностные характеристики.

Механические испытания образцов проводились на разрывной машине Р-50с учетом требований ГОСТ 11262. При этом скорость нагружения заготовок – 25 мм/мин.

При испытаниях разрушения тестируемых образцов происходило в месте сплавления деталей.

При испытаниях производился съем диаграммы «нагрузка-деформация» из которой определялось максимальная нагрузка  $P_{\text{раз}}$ , вызвавшая разрушение образца.

При этом напряжение  $\sigma$  при разрушении образца определялось в соответствии с выражением 3.1:

$$\sigma = \frac{P_{\text{раз}}}{S}, \quad (3.1)$$

где  $S$  – площадь сваренного участка.

При проведении исследований использовалась машина для стыковой сварки полимерных труб нагревательным элементом Roweld P160 SANILINE (рис. 3.13). Экспериментальная сварка труб проводилась на трубах ПЭ 80 SDR 11 63×5,8. Это труба диаметром всего 63 мм. Однако, для организации магистрального трубопровода может быть использована машина Roweld P1200, которая позволяет осуществлять сварку полимерных труб диаметром до 1200 мм (рис. 3.14).



Рисунок 3.13 – Машина для стыковой сварки полимерных труб нагревательным элементом Roweld P160 SANILINE, которая использовалась при экспериментальной сварке



Рисунок 3.14 – Сварка магистрального трубопровода из полимерных труб при помощи машины Roweld P1200



Рисунок 3.15 - Установка шаблона для создания заданной площади сварки в сварном соединении

За базовые были приняты следующие значения параметров режима сварки: давление при осадке  $P_{ос}=4,4$  атм., время технологической паузы  $t_{п}=4$  с, температура нагревателя  $T_{н}=220$  °С, время нагрева  $t_{н}=58$  с, время охлаждения  $t_{охл}=8$  мин, давление при нагреве  $P_{н}=0,6$  атм.

Сварка нагретым инструментом встык производилась с соблюдением заданной площади сварки по описанной выше методике, при комнатной температуре с измененным одним вышеуказанным параметром технологического процесса сварки при сохранении остальных параметров.

В ходе испытания установлено, что наибольшая прочность получается при температуре нагревательного инструмента 220...240 °С (рис. 3.16).

Повышение давления при нагреве уменьшает прочность сварного соединения по стыку (рис. 3.17). В то же время очень странным является наименьшая величина прочности сварного шва при рекомендованном значении давления при осадке – 4,4 атм. (рис. 3.18).

Увеличение продолжительности нагрева приводит к увеличению прочности, что, видимо, объясняется увеличением площади грата (рис. 3.19).

Увеличение продолжительности технологической паузы в 2...4 раза при комнатной температуре для данного типоразмера полиэтиленовой трубы не приводит к снижению прочности сварного шва (рис. 3.20).

Уменьшение времени охлаждения стыка под давлением осадки не влияет на прочность сварного шва (рис. 3.21).

Таким образом, был предложен метод количественной оценки прочности стыкового сварного соединения полимерной трубы по стыку, с помощью которого можно подобрать технологические режимы сварки с наибольшей прочностью.

Увеличение технологической паузы в 2...3 раза не приводит к уменьшению прочности сварного соединения полимерных труб.

Уменьшение времени остывания сварного соединения под давлением осадки не оказывает влияния на прочность по стыку сварного соединения полиэтиленовых труб.

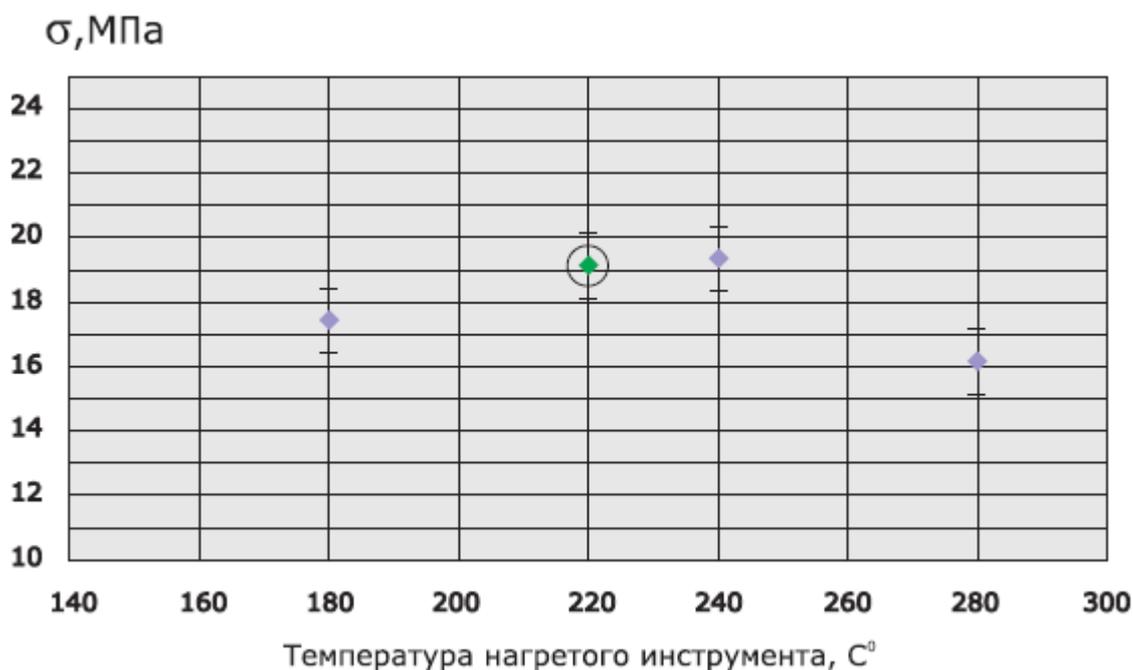


Рисунок 3.16 – Предельное напряжение соединений, в зависимости от температуры нагревательного инструмента

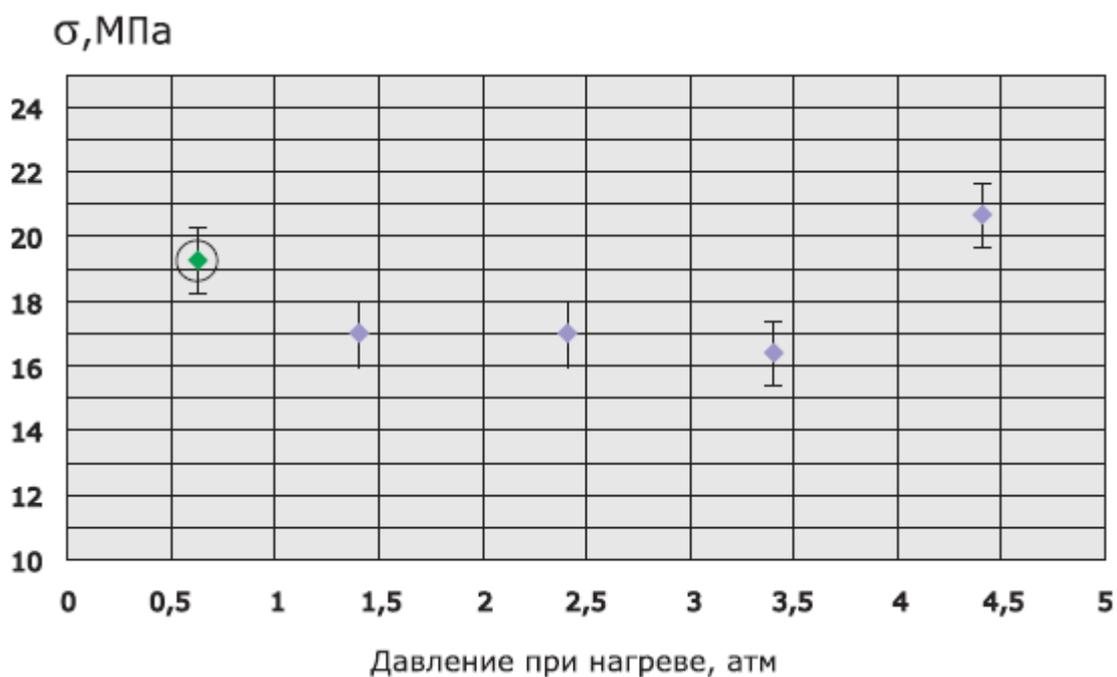


Рисунок 3.17 – Разрушающее напряжение сварных соединений при различных давлениях при нагреве торцов свариваемых труб

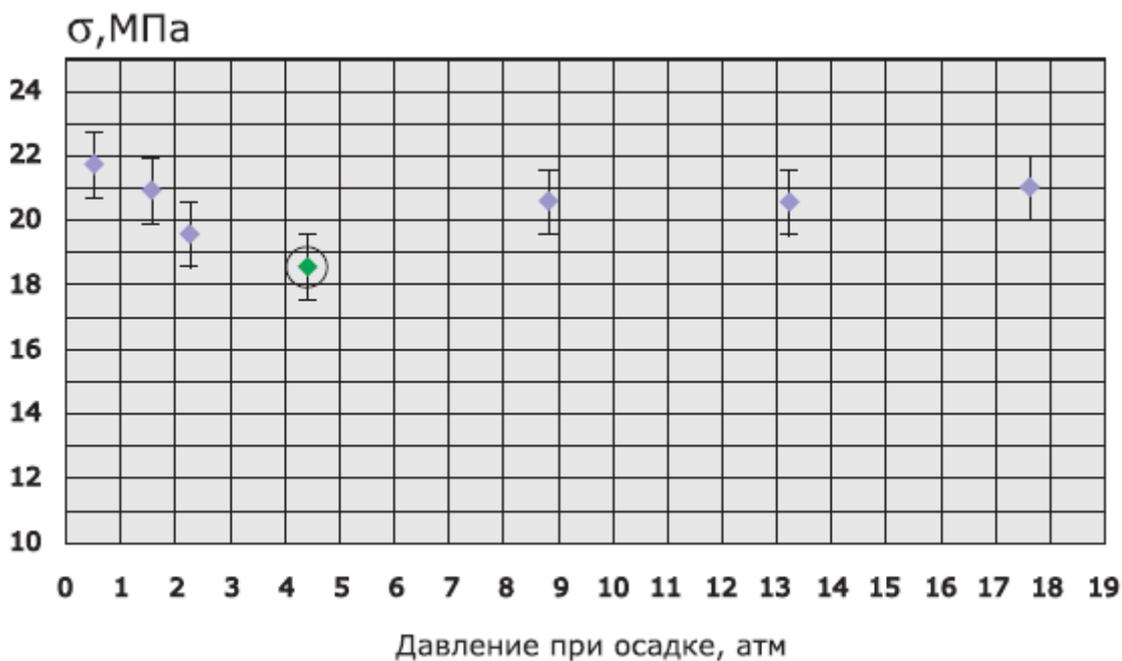


Рисунок 3.18 – Разрушающее напряжение сварных соединений, полученных при различных давлениях при осадке

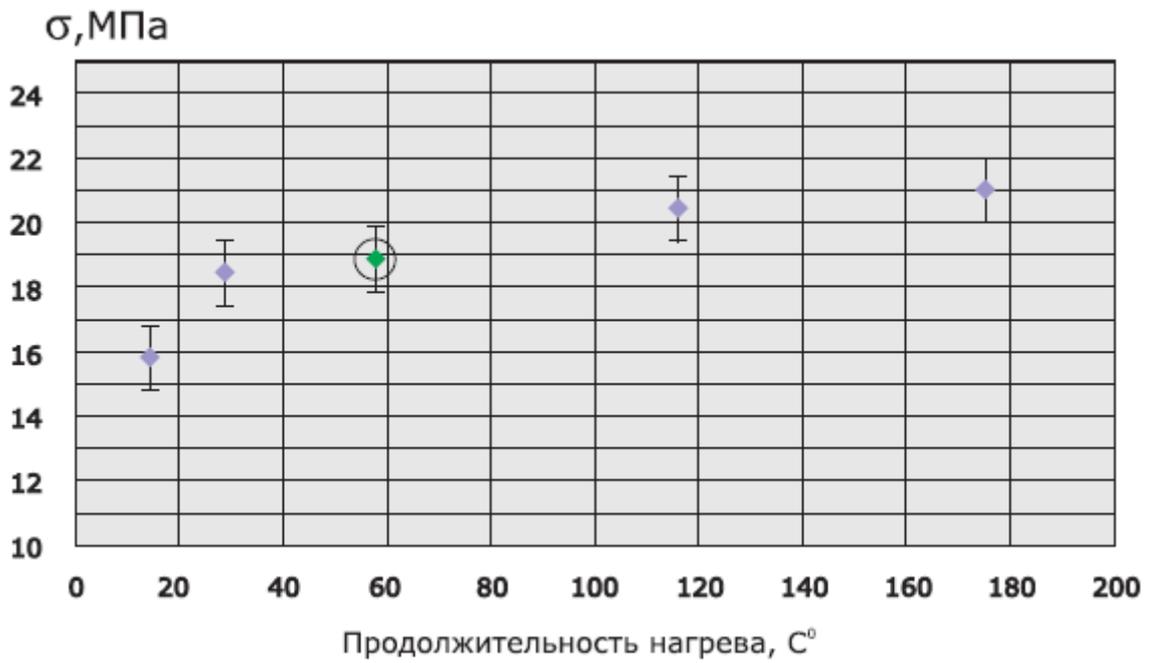


Рисунок 3.19 – Разрушающее напряжение в зависимости от продолжительности нагрева торцов свариваемых труб

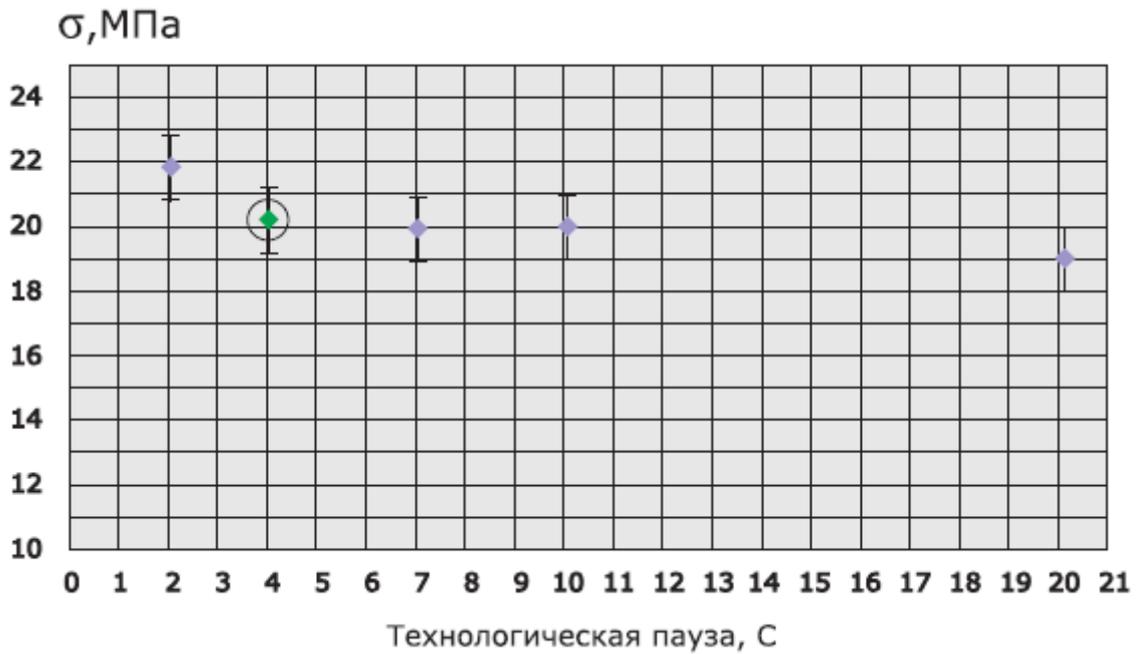


Рисунок 3.20 – Разрушающее напряжение сварных соединений в зависимости от продолжительности технологической паузы

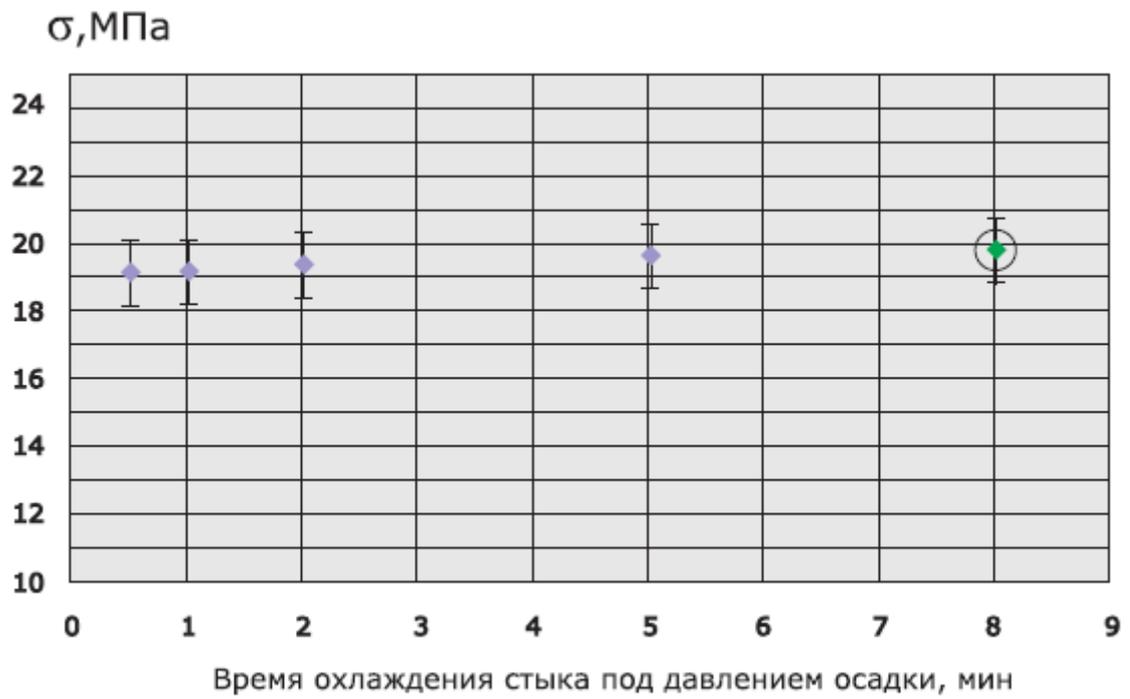


Рисунок 3.21 – Пределное напряжение соединений полученные при разных значениях времени охлаждения

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании достигалась цель - повышение производительности и качества выполняемых работ при ремонтной и монтажной сварке полимерных трубопроводов на основе изучения тепловых и физических процессов в свариваемом соединении.

При анализе состояния вопроса был выполнен обзор научно-технической литературы в области сварки полимерных трубопроводов. Проведено комплексное исследование истории развития технологии сварки полимерных трубопроводов для транспортировки углеводородов. Были рассмотрены основные методы, свойства и технические средства. По мере открытия новых материалов проходит совершенствование технологии производства и сварки труб, разрабатываются различные добавки, обеспечивающие необходимые эксплуатационные свойства полимерных материалов. Как наиболее перспективный и нашедший самое широкое применение при сварке полимерных трубопроводов, отмечен способ стыковой сварки нагретым инструментом. Как одна из главных сложностей сварки полимерных магистральных трубопроводов отмечено ухудшение свойств сварных соединений при сварке в условиях пониженных температур.

Для повышения эффективности оборудования на основании краткого обзора технологических операций при сварке трубопроводов из полимерных труб предложена компоновочная схема оборудования для сварки магистральных трубопроводов. Предложенная схема позволяет автоматизировать основные и вспомогательные операции, повысить производительность и улучшить условия труда сварщиков. Также при использовании предложенного оборудования существенно повышается качество выполняемого трубопровода за счёт уменьшения напряжения изгиба в свариваемой плети трубопровода.

Исследования тепловых процессов при сварке полимерных труб позволили установить, что в условиях отрицательных температур

окружающего воздуха необходимая температура нагрева торцов труб может быть обеспечена путём продления стадии оплавления. Для повышения качества сварных соединений, выполненных при отрицательных температурах окружающего воздуха, предложена технология сварки, предусматривающая дополнительный прогрев труб за счёт увеличения времени контакта труб с нагретым инструментом на стадии оплавления и остывания труб на стадии охлаждения в замкнутом объёме.

Для повышения эффективности технологии был проведён обзор и анализ научно-технической информации по вопросу контроля качества сварных соединений полимерных труб, выполненных стыковой сваркой нагретым инструментом. Исследования эффективности различных методов разрушающего и неразрушающего контроля качества показывают, что существующие испытания зачастую не позволяют выявить нарушения технологии сварки и обеспечить получение количественной оценки прочности сварного соединения.

Предложенная методика позволяет дать оценку прочностным свойствам различных зон сварного стыкового соединения полимерных труб. Экспериментальная сварка и испытания образцов по предложенной методике позволила установить, что прочность шва сварного соединения полиэтиленовых труб марки ПЭ80 ГАЗ SDR11 на 11...20 %, ниже чем прочность основного материала.

Проведённые исследования были проведены на трубах из полиэтилена ПЭ80 диаметром 63 мм, они позволили предложить мероприятия по повышению эффективности оборудования и технологии сварки полимерных трубопроводов. Полученные результаты с учётом имеющейся информации об уровне техники позволяют сделать вывод об эффективности применения результатов настоящего диссертационного исследования при сварке магистральных газопроводов.

На основании вышеизложенного цель диссертационного исследования может считаться достигнутой.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ращепкин, А. К. Обеспечение безопасности трубопроводов нефтегазового комплекса совершенствованием конструкции и технологии монтажа комбинированных труб из термопластов : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19, 05.26.03 / Андрей Константинович Ращепкин ; Институт проблем транспорта энергоресурсов. – Уфа, 2007. – 140 с.

2. Akkurt, A. An analysis of electro-melting and hot element welding methods' safety used to join PE natural gas pipes / A. Akkurt, [и др.] // International journal of electronics; mechanical and mechatronics engineering . – 2012. --№ 2. – pp. 493–504.

3. Faraz, A. Effect of Welding Parameters on the Structural Performance of Fusion Welded Extruded and Injection Molded HDPE Joints / A. Faraz, [и др.] // Journal of Space technology. – 2014. – № 1. – pp. 114–119.

4. Старостин, Н. П. Контактная сварка полиэтиленовых труб оплавлением при низких температурах окружающей среды / Н. П. Старостин, О. А. Амосова // Сварочное производство. – 2007. – № 4. – С. 17–20.

5. Kumar, S. Fine Element Simulation of Resistance Welding of High Density Polyethylene Pipe / S. Kumar, Y. Kumar, A. Singh // International Journal of Engineering and Technical Research. – 2014. – Vol. 2. – pp. 89–97.

6. Нестеренко, Н. П. Моделирование температурных полей и напряжений в полиэтиленовых трубах при сварке нагретым инструментом / Н. П. Нестеренко, И. К. Сенчиков, О. П. Червинко, М. Г. Менжерес // Автоматическая сварка. – № 2. – 2009. – С. 11–15.

7. Зубаиров, Т. А. Анализ основных нормативных документов на полимерные материалы для газопроводов / Т. А. Зубаиров, Б. Н. Мастобаев, М. М. Фаттахов // Научно-информационный сборник Нефтегазохимия. Выпуск 3. Москва 2014. – С. 25–27.

8. Зубаиров, Т.А. Развитие технологии изготовления и применения труб из полимерных и композитных материалов : дис. ... канд. техн. наук :

07.00.10 / Тимур Артурович Зубаиров ; Уфимский государственный нефтяной технический университет. – Уфа, 2015. – 125 с.

9. ГОСТ 16338-85 Полиэтилен низкого давления. Технические условия. Межгосударственный стандарт книжный номер. Использование и издательское оформление. – М: Стандартинформ, 2005. – 35 с.

10. ТУ 6–5–1983–87 Композиции полиэтилена низкого давления для труб соединительных деталей газораспределительных сетей. Технические условия.

11. Производство композиционных полимерных материалов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.steelexpo.ru>

12. PIPELIFE расстался с SOLVAY / Полимерные трубы: Информационно-аналитический журнал. – № 1. – 2012. – С. 5–6.

13. Трубы полимерные [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pe-pipe365.ru>

14. СП 42-103-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Проектирование и строительство газопроводов из полиэтиленовых труб и реконструкция изношенных газопроводов.

15. Эккерт, Р. Соединительные детали для полиэтиленовых труб. Конструкция фитингов с закладной нагревательной спиралью и ее влияние на качество сварного соединения / Роберт Эккерт // Полимергаз. – 2003. – № 3. – С. 44–49.

16. Родионов, А.К. Трещиностойкость сварных стыковых соединений полиэтиленовых труб / А. К. Родионов, Ф. И. Бабенко, Н. А. Коваленко // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2003. – Т. 8, № 3. – С. 19–20.

17. Barber , P. The use of tensile tests to determine the optimum conditions for butt fusion welding certain grades of polyethylene, polybutene-I and polypropylene pipes / P. Barber, J. R. Atkinson // Journal of materials science. – 1974. – vol. 9. – pp. 1456–1466.

18. Способ муфтовой сварки полимерных труб : пат. № 2450202 Рос. Федерация : МПК F 16 L 47/02 / Н. П. Старостин, Г. В. Ботвин, Е. В. Данзанова; заявл. 19.07.2010; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 13. – 2 с.

19. Способ сварки полимерных труб : пат. № 2343331 Рос. Федерация : МПК F 16 L 13/00, F 16 L 47/00 / Н. П. Старостин, А. И. Герасимов, О. А. Амосова; заявл. 14.12.2006; опубл. 10.01.2009, Бюл. № 1. – 4 с.

20. Фаттахов, М. М. Трубопроводный транспорт из полиэтиленовых труб / М. М. Фаттахов // Трубопроводный транспорт-2005. Тезисы докладов международной учебно-научно-практической конференции.– Уфа: Изд-во «ДизайнПолиграфСервис», 2005. – С. 235–237.

21. Ромейко, В. С. Сколько пластмассовых труб нужно России? / В. С. Ромейко // Трубопроводы и экология. – 1998. – № 3. – С. 5.

22. Каргин, В. Ю. Полиэтиленовые газовые сети. Материалы для проектирования и строительства / В. Ю. Каргин, В. Е. Бухин, Ю. Н. Вольнов. – Саратов: ОАО «Приволжское книжное издательство», 2001. – 400 с.

23. Миронов, В. Я. Применение стеклопластиковых труб на нефтяных промыслах Башкирии / В. Я. Миронов, Н. Г. Пермяков, Т. А. Зайцева // НТС «Нефтепромысловое дело».– М.: ВНИИОЭНГ, 1967.– № 10. – С. 16–21.

24. Карякина, М. И. Технология полимерных покрытий / М. И. Карякина, В. Е. Попцов. – Л.: Химия, 1983. – 336 с.

25. Фаттахов, М. М. Из истории использования пластмассовых труб в нефтегазопромысловых трубопроводных системах России / М. М. Фаттахов // История науки и техники.– 2008.– № 6, специальный выпуск № 3. – С. 96–99.

26. Зубаиров, Т. А. Использование труб из полимерных материалов для сбора и транспорта газа на промыслах и в газовых сетях России / Т. А. Зубаиров, Б. Н. Мастобаев, М. М. Фаттахов // Научно-информационный сборник Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. Выпуск 3. Москва, 2014. – С. 10-12.

27. Рыкалин, Н. Н. Расчёты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.

28. Дьяконов, В. П. Справочник по MathCAD PLUS 7.0 PRO / В. П. Дьяконов. – М.: СК Пресс, 1998. – 352 с.
29. Бабичев, Н. А. Физические величины: справочник / Н. А. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
30. Зайцев, К. И. Сварка полимерных материалов: справочник / К. И. Зайцев, Л. Н. Мацюк, А. В. Богдашевский [и др.]. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
31. Старостин, Н. П. Сварка полимерных труб для газопроводов при низких температурах / Н. П. Старостин, А. И. Герасимов // Нефтегазовое дело. – 2009. – № 1.
32. Аммосова, О. А. Сварка полиэтиленовых труб встык при температурах воздуха ниже нормативных. Ч. 1 / О. А. Аммосова, А. И. Герасимов и Н. П. Старостин // Пластические массы. – 2008. – № 9. – С. 38–41.
33. Аммосова, О. А. Сварка полиэтиленовых труб встык при температурах воздуха ниже нормативных. Ч. 2 / О. А. Аммосова, А. И. Герасимов и Н. П. Старостин // Пластические массы. – 2008 – № 10. – С. 45–46.
34. Гринюк, В. Д. Микроструктура и качество стыковых сварных соединений полиэтилена / В. Д. Гринюк, А. А. Шадрин, А. В. Золотарь [и др.] // Автоматическая сварка. – 1990. – № 11. С. 23–26.
35. Нестеренко, Н. П. Моделирование температурных полей и напряжений в полиэтиленовых трубах при сварке нагретым инструментом / Н. П. Нестеренко, И. К. Сенченков, О. П. Червинко, М. Г. Менжерес // Автоматическая сварка. – 2009. – № 2. – С. 11–15.
36. Герасимов, А. И. Способы испытания сварного соединения полимерных труб / А. И. Герасимов, Г. В. Ботвин, Е. В. Данзанова // Арктика XXI век. Технические науки. – 2013. – № 1. – С. 64–76.

37. Красников, М. А. Механика разрушения стыковых сварных соединений полиэтиленовых труб при испытаниях на растяжение статической нагрузкой / М. А. Красников, Ю. В. Пожалов, В. А. Соколов // Полимергаз. – 2011. – № 1. – С. 36–38.

38. Шурайц, А. Л. Газопроводы из полимерных материалов: пособие по проектированию, строительству и эксплуатации / А. Л. Шурайц, В. Ю. Каргин, Ю. Н. Вольнов. – Саратов: Изд-во «Волга-XXI век», 2007. – 612 с.

39. Данзанова, Е. В. Влияние параметров сварки на прочность сварного стыкового соединения полиэтиленовых труб / Е. В. Данзанова, А. И. Герасимов, Г. В. Ботвин // Полимерные трубы. – 2015. – № 3. – С. 48–52.

40. Способ испытания прочности сварного стыкового соединения полимерных труб : пат. № 2465560 Рос. Федерация : МПК G 01 L 1/00, G 01 L 1/26, F 16 L 47/00, G 01 L 1/00. / А. И. Герасимов, Е. В. Данзанова, Г. В. Ботвин ; заявл. 20.04.2011; опубл. 29.10.2012, Бюл. № 30. – 7 с.

41. ГОСТ 11262-80. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. – Введ. 1980-12-01. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 16 с.:

42. Максименко, В. Н. Повышение усталостной прочности соединений труб из ПЭВП, выполненных сваркой оплавлением встык / В. Н. Максименко // Сварочное производство. – 1982. – № 1.

43. Адаменко, А. А. Повышение качества соединений пластмассовых труб, выполненных контактно-тепловой сваркой / А. А. Адаменко, Г. Н. Кораб, В. П. Тарногородский // Автоматическая сварка – 1983. – № 3. – С. 51–53.

44. Аксенова, Г. В. Контроль качества сварных соединений труб из полиэтилена по характеру разрушения при осевом растяжении / Г. В. Аксенова, Е. А. Кашковская // Автоматическая сварка. – 1980. – № 2. С. 61–63.

45. Бартнев, Г. М. Физика и механика полимеров / Г. М. Бартнев. – М.: Высшая школа, 1983.

46. Зайцев, К. И. Сварка пластмассовых трубопроводов / К. И. Зайцев, В. Ф. Истратов, И. Ф. Ляшенко. – М.: Недра. – 1974. - 71 с.

47. Lai, H. S. Effect of defects on the burst failure of butt fusion welded polyethylene pipes / H. S. Lai, [и др.] // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2016. – Vol. 30. – pp. 1973–1981