

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

Институт машиностроения  
(наименование института полностью)

---

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные  
процессы  
(наименование)

---

15.04.01 Машиностроение  
(код и наименование направления подготовки)

---

Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического  
оборудования  
(направленность (профиль))

---

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Исследование остаточных деформаций при сварке труб из  
нержавеющей стали

Студент

Д.И. Баранов  
(И.О. Фамилия)

---

(личная подпись)

Научный  
руководитель

д.т.н., профессор В.В. Ельцов  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

---

Тольятти 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Анализ состояния вопроса .....	6
1.1 Анализ технологии сварки тонкостенных труб из нержавеющей сталей...	6
1.2 Анализ применяемых вариантов снижения остаточных деформаций и напряжений .....	20
1.3 Задачи работы .....	29
2 Методика исследований .....	30
2.1 Сварка образцов для проведения исследований .....	30
2.2 Сварка и исследования геометрии обечаек .....	35
2.3 Исследования качества получаемых сварных соединений.....	38
2.4 Исследования деформаций образцов .....	41
2.4 Металлографические исследования .....	42
2.5 Исследования прочности получаемых сварных соединений .....	46
3 Результаты исследований .....	49
3.1 Результаты исследований геометрии образцов .....	49
3.2 Результаты исследований геометрии труб .....	53
3.3 Результаты исследования микротвердости .....	56
3.4 Результаты исследования прочности .....	57
4 Технологические рекомендации по сварке обечаек .....	58
Заключение .....	61
Список используемых источников .....	63

## Введение

ООО «Прогресс», является членом СРО НП КСК «Союз-Петрострой станларт». Головной офис предприятия расположен в Санкт-Петербурге, объекты, строительством которых занимается ООО «Прогресс» расположены по всей территории России.

Одним из объектов, строительством которых занимается в настоящее время ООО «Прогресс» является Западно-Сибирский комплекс глубокой переработки углеводородного сырья. Указанное предприятие территориально находится в промышленной зоне города Тобольск, к северу от предприятий «Тобольск-Нефтехим» и «Тобольск-Полимер», Тобольской ТЭЦ.

Планируется к производству на предприятии полиолефинов. Сюда относится полиэтилен низкой и высокой плотности а также полипропилен. Поступление необходимых углеводородов на производственную площадку предприятия планируется с по трубопроводу с заводов газопереработки Западной Сибири, которые входят в группу компаний ОАО «СИБУР Холдинг», и с газоперерабатывающих заводов других компаний.

Переработку углеводородов планируется происходить на четырех главных установках: установки пиролиза, установки по производству полипропилена, двух установках по производству полиэтилена.

Все перечисленные установки помимо всего прочего оснащены дымовыми трубами. Высота дымовой трубы 60м. Несущая башня дымовой трубы запроектирована в виде четырехгранной призмы. Газоотводящий ствол представляет собой тонкостенную оболочку из коррозионностойкой стали марки AISI321. При сварке обечаек в оболочку из-за остаточных напряжений происходит деформация кромок, что ведет к невозможности нормального монтажа газоотводящего ствола. Применяемый диаметр дымовых труб при толщине стенки выходит за рамки ГОСТ. Поэтому трубы приходится изготавливать вальцуя листовую металлопрокат и выполняя продольный сварной шов. При этом зачастую собираемость конструкции в монтажных условиях требует дополнительных операций, что увеличивает трудоемкость.

Причиной необходимости дополнительных операций являются деформации, депланация кромок.

Отсюда сформулируем цель работы – повышение качества вытяжных труб путем снижения деформаций на этапе сварки обечаек.

Для достижения сформулированной цели, в работе были поставлены следующие основные задачи:

- выбрать способ снижения остаточных деформаций при сварке обечаек вытяжных труб;

- определить необходимые исследования выбранного способа для повышения его эффективности;

- разработать методику выполнения экспериментальных исследований;

- выполнить эксперименты согласно разработанной методике;

- определить необходимые исследования, требуемые для успешного внедрения выбранного способа в практику;

- разработать методику проведения экспериментальных исследований;

- выполнить эксперименты, обработать их результаты; и оценить их результаты;

- обработать и проанализировать результаты экспериментальных исследований;

- по результатам экспериментальных исследований выдать технологические рекомендации и внедрить их в практику.

Поставленные задачи определили структуру магистерской диссертации, которая состоит из введения, трех глав, заключения.

Предмет и объект исследования определяется тематикой работы, ее целью и задачами.

Предметом исследования являются методы снижения остаточных деформаций и напряжений при сварке дымовых труб

Объектом исследования выступают оборудование и технология для снижения остаточных деформаций и напряжений при сварке дымовых труб.

Теоретической, методологической и информационной базой

исследования послужили:

- ГОСТы, нормативные документы,;
- труды российских и зарубежных специалистов в области сварки и контроля;
- научные статьи в современной периодической печати;
- данные официальных сайтов промышленных учреждений и информационно-аналитических агентств.

В ходе исследования использовались общенаучные и специальные методы познания, а именно системный анализ как методология постановки и подхода к решению проблемы в целом, приемы логического и сравнительного анализа и синтеза, методы сравнений, абстрактно-логических суждений.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что предпринята попытка определения влияния параметров вибрационных колебаний на степень снижения остаточных напряжений.

Практическая значимость исследования заключается в том, что сделанные по их результатам выводы и рекомендации ориентированы на конкретное внедрение в практику строительства металлических вытяжных труб.

## **1 Анализ состояния вопроса**

### **1.1 Анализ технологии сварки тонкостенных труб из нержавеющей сталей**

Металлические дымовые трубы нашли широкое распространение. Это обусловлено рядом преимуществ подобного рода конструкций. В первую очередь это малые значения массы конструкции при достаточно большой высоте, до 200 метров. Недостатки таких конструкций – сравнительно небольшой, до 30 лет, срок службы.

Высота рассматриваемой дымовой трубы 60 м, рисунок 1.1. Несущая башня дымовой трубы запроектирована в виде четырехгранной призмы. Газоотводящий ствол представляет собой тонкостенную оболочку из коррозионностойкой стали марки AISI321. Выбор материала для газоотводящего ствола обусловлен необходимостью успешно сопротивляться воздействию окружающей среды. Коррозионно-стойкие стали применяют для труб с высокой температурой отводимых газов и наличии в них агрессивных компонентов.

Поскольку толщина металла предусмотрена 2 мм, а диаметр 1250 мм, промышленность таких труб не выпускает. Типовой процесс сварки предусматривает сварку листового металла в обечайки. При сварке обечаек в оболочку из-за остаточных напряжений происходит депланация кромок, что ведет к невозможности нормального монтажа газоотводящего ствола дымовой трубы.

Как и при изготовлении сваркой других промышленных объектов первая операция сварки газоотводящего ствола из нержавеющей стали - входной контроль.

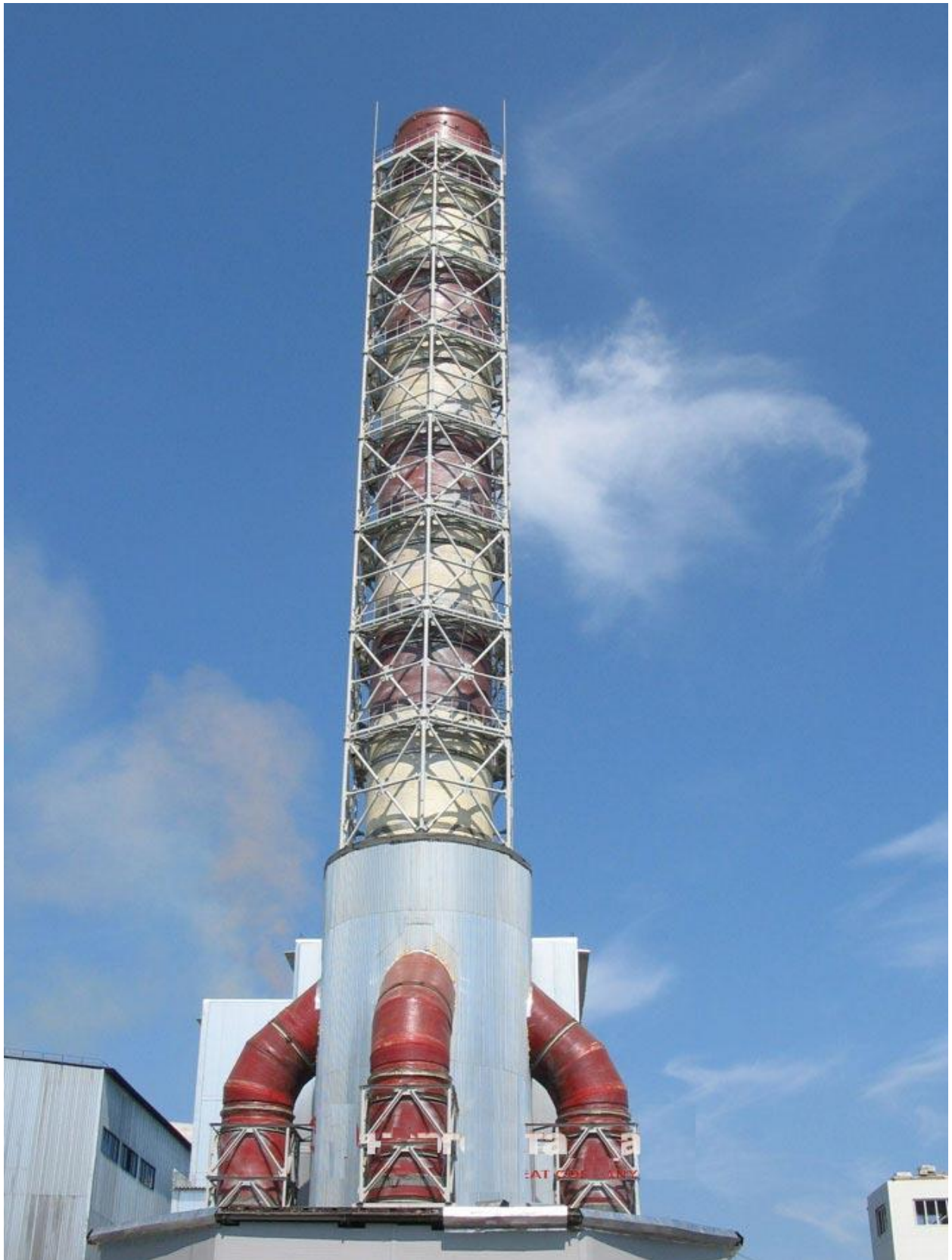


Рисунок 1.1 - Вытяжная труба металлическая, общий вид

В процессе контроля поступающих на участок заготовок труб контролируют следующее:

- сертификаты, на сталь из которой изготовлены трубы;
- маркировку проката, она должна совпадать с указанными в сертификате требованиями;
- соответствие поверхности проката требованиям стандартов/технических условий.

В процессе контроля поступающих на участок сварочных материалов проверяют соответствие электродов ГОСТам 9466-75 и 10052-75.

Сопроводительная документация к каждой партии электродов должна содержать следующие данные:

- название фирмы-изготовителя;
- название фирмы, осуществляющей поставку;
- тип и марку электрода, его геометрические характеристики;
- номер партии, а также дату изготовления;
- вес партии;
- результаты испытаний электродов;
- стандарты и технические условия согласно которых электроды были изготовлены.

Входному контролю подвергается каждый ящик, в котором находятся упаковки с электродами. На ящике должна быть предупреждающие надписи, предостерегающие от хранения электродов в условиях сырости и необходимости бережной транспортировки.

Хранение, подготовка, а также контроль сварочных материалов осуществляется в соответствии с РТМ 26-304-78 "Организация хранения, подготовки и контроля сварочных материалов"

Если нарушены условия хранения электродов, то выполняется выборочная проверка электродов на соответствие их требуемым свойствам.

Следующим этапом выполняются заготовительные операции. К таким операциям относят правку заготовок, наметку листов, резка, формирование кромок, изготовление отверстий, а также гибку.

Резка заготовок из коррозионностойкой стали может производиться



механическим способом. Изготовление в заготовках технологических отверстий (например, для люков, арматуры) осуществляется воздушно-плазменным методом.

При выполнении термической резки необходимо удалить металл с краев заготовки на глубину 0,8 мм от максимальной шероховатости в соответствии с ГОСТ 14792-60.

После запуска ребер необходимо проверить:

- Качество подготовки кромок и их соответствие требованиям. Тест удобно выполнять с помощью специальных шаблонов;
- Толщина листов на соответствие допускам;
- Качество очистки поверхностей листов.

После приемки труб непосредственно к месту сварки перед сборкой заготовок необходимо завершить рубцевание до характерного металлического блеска и обезжирить поверхность. Ширина зачистки  $\geq 2$  см снаружи и  $\geq 1$  см внутри листа.

Сборка выполняется с применением приспособления. Первый этап - сборка и сварка обечайки. Необходимо проверить величину нестыковки кромок, которая должна не превышать миллиметр на сторону. В зазор необходимо установить зазорники.

Сварка может быть проведена только после оценки отделом технического контроля правильности сборки. При осуществлении сборки должна быть учтена возможность свободной усадки свариваемого металла. Запрещается производить совместную сборку с посадкой с натягом.

Прихватки должны располагаться равномерно по периметру стыка. Необходимо предусмотреть расстояние между прихватками равное 0,15-0,20 метра. Длина каждой прихватки должна быть порядка 1 см.

При выполнении прихватки используются электроды с основным покрытием марки ОЗЛ-8 с поперечным сечением диаметром 3 миллиметра. При этом используется обратная полярность постоянного тока - 50-100 ампер.

Сделанные прихватки обрабатывают шлифовальным кругом и

подвергают визуальному контролю. Необходимо руководствоваться к качеству прихваток теми же требованиями, которые предъявляются к основному сварному шву.

Если результат контроля прихватки показал на наличие недопустимых дефектов, их удаляют способом механической обработки.

После выполнения прихваток и положительных результатов их контроля производят сварку швов. Используются электроды с основным покрытием марки ОЗЛ-8 диаметром поперечного сечения 4 миллиметра. При этом используется обратная полярность постоянного тока - 100-130 ампер.

Используется источник сварочного тока ВД-306.

Трубы, соответствующие требованиям входного контроля монтируют на штатные места. При монтаже используют автокран Liebherr LTM 11200-9.1. Грузоподъемность крана 1200 тонн а подъем он может осуществлять на высоту до 100 метров.

Общий вид крана, на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Кран Liebherr LTM 11200

Сталь, из которой изготовлены вытяжные трубы для данного случая, 12Х18Н10Т относится к аустенитным. Сварка указанной стали обладает рядом особенностей. Следует отметить, что лучшими свойствами в процессе эксплуатации обладают стали с аустенитно-ферритной структурой. Что является важным для нашего случая, такие стали обладают лучшей коррозионной стойкостью. Особенно при питинговой коррозии. Для феррита характерно растворение карбидов внутри зерна. В случае аустенитной структуры стали карбиды располагаются по границе зерен и являются местами образования питингов.

По сравнению с низкоуглеродистыми сталями большинство высоколегированных сталей и сплавов обладают пониженным коэффициентом теплопроводности (до 2 раз при повышенных температурах) и увеличенным коэффициентом линейного расширения (до 1,5 раза). Низкий коэффициент теплопроводности приводит при сварке к концентрации тепла и вследствие этого к увеличению проплавления металла изделия. Для получения заданной глубины проплавления снижается величина сварочного тока на 10 - 20%.

Увеличенный коэффициент линейного расширения приводит при сварке к большим деформациям сварных изделий, а в случае значительной жесткости - относительно крупные изделия, повышенная толщина металла, отсутствие зазора между свариваемыми деталями, жесткое закрепление изделия - к образованию трещин в сварочном изделии. Высоколегированные стали и сплавы более склонны к образованию трещин, чем низкоуглеродистые. Горячие трещины появляются большей частью в аустенитных сталях, холодные - в закаливающихся сталях мартенситного и мартенситно-ферритного классов. Кроме этого, коррозионностойкие стали, не содержащие титана или ниобия или легированные ванадием, при нагревании выше 500°С теряют антикоррозионные свойства по причине выпадения из твердого раствора карбидов хрома и железа, которые становятся центрами коррозии и коррозионного растрескивания. Термической обработкой (чаще всего закалкой) можно восстановить антикоррозионные свойства сварных изделий. Нагревом

до 850°C ранее выпавшие из раствора карбиды хрома вновь растворяются в аустените, а при быстром охлаждении они не выделяются в отдельную фазу. Такой вид термообработки называют стабилизацией. Однако стабилизация приводит к снижению пластичности и вязкости стали. Получение высокой пластичности, вязкости и одновременно анти-коррозийности сварных соединений возможно нагревом металла до температуры 1000 - 1150°C и быстрым охлаждением в воде (закалка). Содержание углерода в основном металле и металле шва до 0,02 - 0,03% полностью исключает выпадение карбидов хрома, а следовательно, межкристаллитную коррозию. На практике нашли применение следующие пути предотвращения трещин при сварке высоколегированных сталей: создание в металле шва двухфазной структуры (аустенит и феррит); ограничение в шве содержания вредных примесей (серы, фосфора, свинца, сурьмы, олова, висмута) и введение таких элементов, как молибден, марганец, вольфрам; применение электродных покрытий основного и смешанного видов; создание при сварке менее жесткого состояния изделия. Практикой сварки аустенитной стали установлено, что с увеличением жесткости при выполнении шва необходимо к аустениту прибавлять феррита в количестве от 2 до 10%. В этом случае пластичность металла шва по сравнению с аустенитным швом повышается и усадка даже при жестком состоянии сварного изделия происходит за счет повышенной пластической деформации металла шва без образования трещин.

Выбор материала для изготовления вытяжных труб в значительной степени определяется назначением и условием их работы. «Наиболее распространенным материалом является холоднокатаная лента из высоколегированной коррозионно-стойкой стали типа 18-8 следующих марок (в соответствии с ГОСТ 4986—70): 08X18H10, 12X18H9, 17X18H9, 12X18H9T, 12X18H10T, 12X18H10E, 08X18H10T, 08X18H12T-ВИ, 03X18H12-ВИ» [23].

В магистерской диссертации выбор материала остановлен на стали 12X18H10T. Это сталь конструкционная криогенная, используется в промышленности для деталей, работающих до 600 °С. Это сварные аппараты

и сосуды, работающие в разбавленных растворах азотной, уксусной, фосфорной кислот, растворах щелочей и солей и другие детали, работающие под давлением при температуре от  $-196$  до  $+600$  °С, а при наличии агрессивных сред до  $+350$  °С.; сталь аустенитного класса. Хромоникелетитановая аустенитная сталь 12Х18Н10Т получила наибольшее распространение в промышленности ввиду возможности успешного использования ее в разнообразных эксплуатационных условиях. Она обладает высокой коррозионной стойкостью в ряде жидких сред, устойчива против межкристаллитной коррозии после сварочного нагрева, сравнительно мало охрупчивается



Рисунок 1.3 - Химический состав стали 12Х18Н10Т.

«Сварные швы на стали 12Х18Н10Т заметно уступают основному металлу в пластичности, что объясняется дендритной ликвацией углерода. Причиной пониженной ударной вязкости сварных швов является недостаточная стабильность аустенита при сверхнизких температурах. В условиях глубокого холода возможен распад аустенита по схеме А - М или А - а + К", где А - аустенит, М - мартенсит, а - вторичный феррит, К" - вторичные карбиды. Наличие небольшого количества первичного феррита в данном случае не имеет решающего значения. Об этом свидетельствуют результаты следующих опытов. Часть образцов подвергли закалке на воздухе после часового нагрева при  $1080^{\circ}$ , С, благодаря чему была ликвидирована дендритная ликвация углерода, но сохранена ферритная составляющая. Ударная вязкость шва повысилась в 2 раза (данные ниже). Таким образом, получение нормализации

шва и тела в сварных особотонкостенных трубах можно добиться путем ее закалки» [1]. «Лента (сталь 12X18H10T) поставляется в термически обработанном состоянии с травленной поверхностью, без дрессировки. Поверхность ленты должна быть серебристо-матовой или блестящей. На поверхности ленты не допускаются окалина, коррозия или ее следы, следы перетрава, поверхностные загрязнения, плены. Лента не должна быть склонной к межкристаллитной коррозии» [2].

Механические свойства мягкой ленты в состоянии поставки должны соответствовать требованиям ГОСТ 4986—70. Механические свойства стали 12X18H10T приведены в рисунке 1.4.

**Механические свойства ленты из высоколегированной стали**

Марка стали*	$\sigma_B$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	Марка стали*	$\sigma_B$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %
12X18H9	54	37	12X18H10E	Не более 75	35
17X18H9	58	35	08H18H10T	54	40
08X18H10	54	40	03X18H12-ВИ	40	40
12X18H9T	54	35	08X18H12T-ВИ	45	40
12X18H10T	54	35			

\* Рекомендуемый режим термической обработки: закалка при 1050—1080° С, охлаждение в воде или на воздухе.

Рисунок 1.4 - Механические свойства ленты 12X18H10T

К ленте, предназначенной для сварки особотонкостенных труб, предъявляются высокие требования. Лента, поступающая с металлургических заводов, проходит входной контроль по геометрическим размерам, качеству поверхности, на соответствие химического состава, отсутствие склонности к межкристаллитной коррозии, механические свойства. Поверхность ленты по внешнему виду должна быть травленной, серебристо-матовой или блестящей. На поверхности ленты, как отмечалось выше, не допускаются окалина, коррозия и ее следы, следы перетрава, поверхностное загрязнение, плены. На поверхности возможны отдельные мелкие царапины глубиной не более половины допустимого отклонения по толщине ленты. На краях ленты не должны быть надрывы, выводящие ее за пределы допустимых отклонений на ширину.

На рисунке 14 представлена схема установки для резки ленты на дисковых ножницах.

Для случая межкристаллитной коррозии если повреждение и возникло на границе аустенитных зерен, то граничащие с ними ферритные зерна, у которых межзеренная граница не содержит карбидов, предотвратят сквозное разрушение.

Чаще применяют сталь, в которой от 2 до 8% феррита. Другим положительным моментом двухфазных сталей является повышенная стойкость к образованию горячих трещин в металле шва при сварке.

Отрицательное проявление феррита – старение стали и потеря пластичности. Однако это наблюдается при высоких рабочих температурах. Но оборудование применительно к условиям фармацевтической промышленности эксплуатируется в условиях невысоких температур нагрева.

Также может быть повышена коррозионная стойкость при введении молибдена в количестве 2-3% [4]. Например, при сварке хромомолибденовых сталей перлитными электродами ЦЛ17 с последующей термообработкой взамен сварки аустенитными электродами отмечено снижение коррозионного растрескивания. В этой же работе показано, что промывка оборудования нефтехимических предприятий водно-аммиачным раствором, щелочная среда, уменьшает склонность к питтингообразованию.

К межкристаллитной коррозии может привести перегрев. Причиной перегрева могут быть такие отклонения от параметров технологического режима сварки как высокая сила сварочного тока, низкая скорость сварки. Также необходимо при многопроходной сварке дожидаться остывания наложенного валика и затем выполнять следующий валик. Высокая температура ускоряет процессы диффузии, атомы углерода диффундируют из глубины кристалла в приповерхностную область, там соединяются с атомами хрома в карбиды и поверхностный слой обедняется хромом.

Также уменьшается количество хрома при большой длине дуги. При увеличении длины дуги ухудшается защита сварочной ванны, выгорают такие элементы как хром, титан.

При длительном действии высокой температуры атомы углерода вследствие интенсивных диффузионных процессов перемещаются к поверхности, соединяясь с атомами хрома, образуют карбиды, в результате поверхностный слой зерна аустенита обедняется хромом. Некоторые исследователи считают, что данный механизм также является инициатором межкристаллитной коррозии [5].

С учетом изложенного выработаны технологические рекомендации по сварке нержавеющей сталей – вести сварку на минимальной длине дуги и тонкими валиками, при многопроходной сварке, обеспечивая охлаждение каждого валика.

Научные работы в области аргонодуговой сварки неплавящимся электродом (TIG) за последние 20 лет были направлены, в первую очередь, на повышение производительности способа. Дело в том, что концентрация тепловой энергии у такой дуги невелика и уступает некоторым другим способам дуговой сварки.

Традиционные методы повышения производительности путем увеличения погонной энергии – больше тока и выше скорость – для нашего случая неприемлемы из-за снижения качества сварного соединения. Возможно появление таких дефектов как подрезы, раковины, пористость. В данном случае возможно воздействие на дугу направленным потоком защитного газа. Газодинамическое воздействие на дугу улучшает формирование швов [6].

Для повышения производительности за счет увеличения мощности дуги возможно применение активирующих флюсов [7]. Но пространственное положение шва при ремонтной сварке на емкостях в нижнем положении достаточно редкое.

Применение продольного магнитного поля обеспечивает сжатие столба дуги и увеличение концентрации энергии и проплавляющего действия дуги [8].

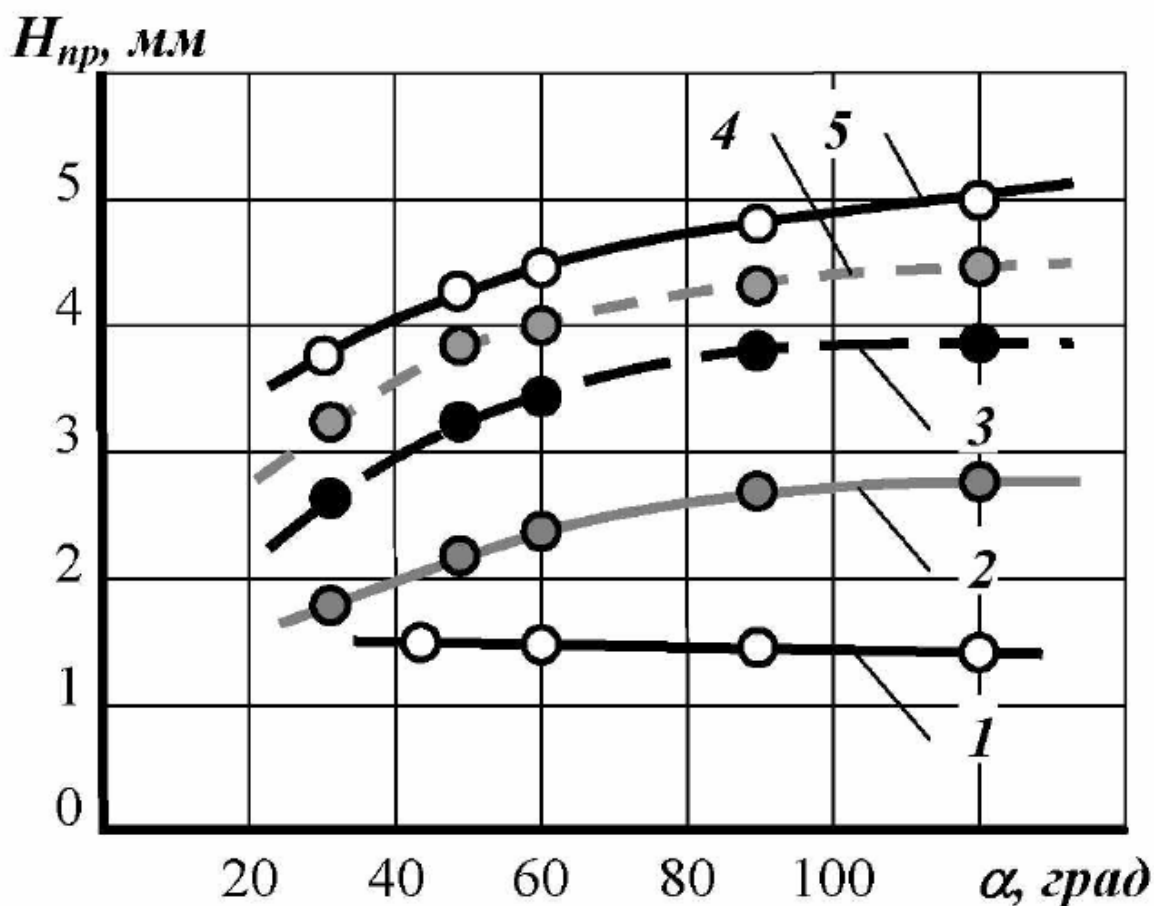


Главный недостаток указанного метода для создания магнитного поля требуется дополнительное устройство, размещенное на горелке. При этом уменьшается маневренность сварщика, что важно при ремонтной сварке применительно к нашим условиям и увеличивается вес горелки.

Много работ посвящено влиянию заточки неплавящегося электрода на формирование сварного шва. Значительное влияние на распределение давления дуги оказывает угол заточки [9]. Увеличение угла заточки с 10 до 90° увеличивает коэффициент сосредоточенности. На рисунке 1.4 приведен график влияния угла заточки электрода на глубину проплавления [10]. Данный график построен для скорости сварки 4,6 м/час и диаметра электрода 2,5 мм.

В некоторых исследованиях показано, что применяя ультразвуковые колебания можно увеличить концентрацию энергии сварочной дуги и, соответственно, увеличить глубину проплавления [11]. Ультразвуковые излучатели, применяемые в данном случае, выглядят так, рисунок 1.5. К недостаткам такого варианта увеличения производительности можно отнести значительные размеры преобразователя и сложность охлаждения пьезоэлементов.

Важным при выполнении сварных соединений методом TIG является выбор неплавящегося электрода [12]. Неплавящиеся вольфрамовые электроды предпочтительно применять с добавками тория, оксида иттрия, лантана. Важным преимуществом для нашего случая является легкость зажигания дуги и стабильность ее горения. Неплавящиеся электроды в нашем случае применяют WL диаметром 2 мм. Лантанированные электроды хорошо работают на низких, средних и больших токах, а также требуют на 10–15% меньшую силу тока для обеспечения поджига дуги [22]. Кроме того, по сравнению с торированными они не радиоактивны. Стойкость лантанированного вольфрамового электрода превосходит торированные и церированные [15, 27]. Лантанированные электроды обозначают ЭВЛ.



Сила тока: 1 – 100А; 2 – 150 А; 3 – 200 А; 4 – 250 А; 5 – 300А.

Рисунок 1.5 – Зависимость глубины проплавления от угла заточки электрода

Диаметр неплавящегося электрода для толщины соединяемого металла 3 мм принимаем 2,0-3,0 мм.

Как было сказано ранее [9] от заточки вольфрамового электрода во многом зависит качество сварного соединения. Согласно требований, заточку будем производить мелкозернистыми твердыми дисками.

Подача присадочной проволоки при сварке методом TIG осуществляется сварщиком вручную. Присадочная проволока при сварке методом TIG применяется диаметром от 1 до 3 мм. Однако увеличение диаметра присадки до 3 мм нежелательно, так как для плавления такой проволоки следует увеличивать силу сварочного тока, как следствие происходит увеличение сварочной ванны и перегрев металла. Кроме того, защита сварочной ванны большого размера от действия окружающего воздуха также ухудшается. Таким

образом, выбираем диаметр присадочной проволоки 1,6 мм. Проволока должна соответствовать требованиям ГОСТ 2246-70. Поскольку не предусмотрена механизированная подача проволоки в зону горения сварочной дуги проволоку применим в виде прутков.



Рисунок 1.4 – Излучатели различного диаметра

К хранению присадочных прутков, применяемых при сварке нержавеющей стали, применяются высокие требования. Прутки должны храниться в чистом помещении в условиях, исключающих загрязнение их поверхности маслом и наждачной пылью. Прутки применяем производства АО "НПО Союзнихром". Компания расположена в Москве. Предприятие изготовитель поставляет прутки в картонных тубусах. Общий вес прутков в тубусе составляет 5 кг. Перед запуском в работу производится входной контроль прутков. Выполняется проверка сертификатов и визуальный осмотр

поверхности прутка. При необходимости поверхность прутков очищают от грязи и смазки и обезжиривают ацетоном или уайт-спиритом [24].

Также тщательно выполняется входной контроль защитного газа. Проверяется наличие сертификатов от поставщика и наличие ярлыков на баллонах. Перед запуском в производство каждого нового баллона на пластину из коррозионно-стойкой стали наплавляется валик длиной 100 - 200 мм с последующим визуальным контролем. Если в процессе визуального контроля выявлена пористость наплавленного валика – данный баллон в производство запускать нельзя.

## **1.2 Анализ применяемых вариантов снижения остаточных деформаций и напряжений**

Наибольшее распространение в промышленности для устранения остаточных деформаций приобрела термическая обработка [7]. Она обеспечивает полное снятие остаточных деформаций. Применяют разные варианты термообработки, характеризующиеся значениями температуры предварительного нагрева. Обязательным условием для всех видов отпуска является низкая скорость охлаждения. Иногда обрабатываемые изделия охлаждают вместе с печью. Во некоторых случаях деталь охлаждают до температуры 300° С с печью, а затем на спокойном воздухе [8].

Высокий отпуск обеспечивает уменьшение величины сварочных деформаций по причине отсутствия сопротивления пластической деформации при нагреве до соответствующих температур. Поэтому в сочетании с остаточными сварочными напряжениями идут процессы релаксации. Однако при температурах высокого отпуска ухудшаются механические характеристики свариваемого металла. Величина порога хладноломкости достигается при более высоких температурах. Особенно ярко этот негативный момент проявляется при термообработке сталей, содержащих ванадий. Устранить данную проблему можно применив отпуск при температурах 550—560° С [8].

Возможности нагревательных устройств в некоторых случаях не обеспечивают возможности выполнить высокий отпуск всей свариваемой металлоконструкции. Поэтому нагреву до температур высокого отпуска подвергают отдельные проблемные места. Например, при сварке сферических резервуаров большой емкости выполняют отпуск лепестков в районе приваренных вспомогательных элементов. Отпуск отдельных узлов применяют также при изготовлении сварных рам тележек вагонов и локомотивов. Такие операции значительно проще, чем отпуск всей конструкции, и, как показал опыт, обеспечивают требуемую эксплуатационную надежность [8].

Высокий отпуск является дорогой операцией, удлиняющей технологический процесс изготовления конструкции, и его следует применять в действительно необходимых случаях. Если механическая обработка проводится на детали, не прошедшей отпуска, то в связи с перераспределением напряжений может произойти изменение ее размеров. В большинстве случаев при сварке изделий из стали с повышенным содержанием углерода и легирующих элементов можно ограничиться только предварительным местным или общим подогревом и не проводить последующей термообработки.

Альтернативой высокому отпуску может быть вибрационная обработка.

Например, выполняли изучение вибрационной обработки на величину остаточных напряжений [2] при сварке обечайки диаметром 1000 мм, толщиной стенки 10 мм и длиной 800 мм. Данная обечайка являлась элементом корпуса химического реактора. Изготовлена она была из низкоуглеродистой конструкционной стали ВСтЗсп. Для возбуждения вибрационных колебаний применяли промышленный электрический вибратор с круговыми колебаниями типа ИВ-99А-2 ТУ 22-4666-80, скорость вращения вала  $n = 2775$  об./мин. Вибрационное устройство имеет возможность изменять величину возмущающей силы на 4000 Н, 6300 Н, 8000 Н.

Схема обработки показана на рисунке 1.7

Время обработки принимали 20 минут. Увеличение времени сверх указанного не является целесообразным, согласно ранее проводимым исследованиям.

Для количественной оценки эффективности вибрационного метода снятия остаточных напряжений, на внутренней поверхности образцов были наклеены тензорезисторы I-VIII. Помимо определения величины остаточных напряжений во внутренних слоях по окружности образцов при различных режимах вибрационной обработки, также исследовалось и распределение этих напряжений.

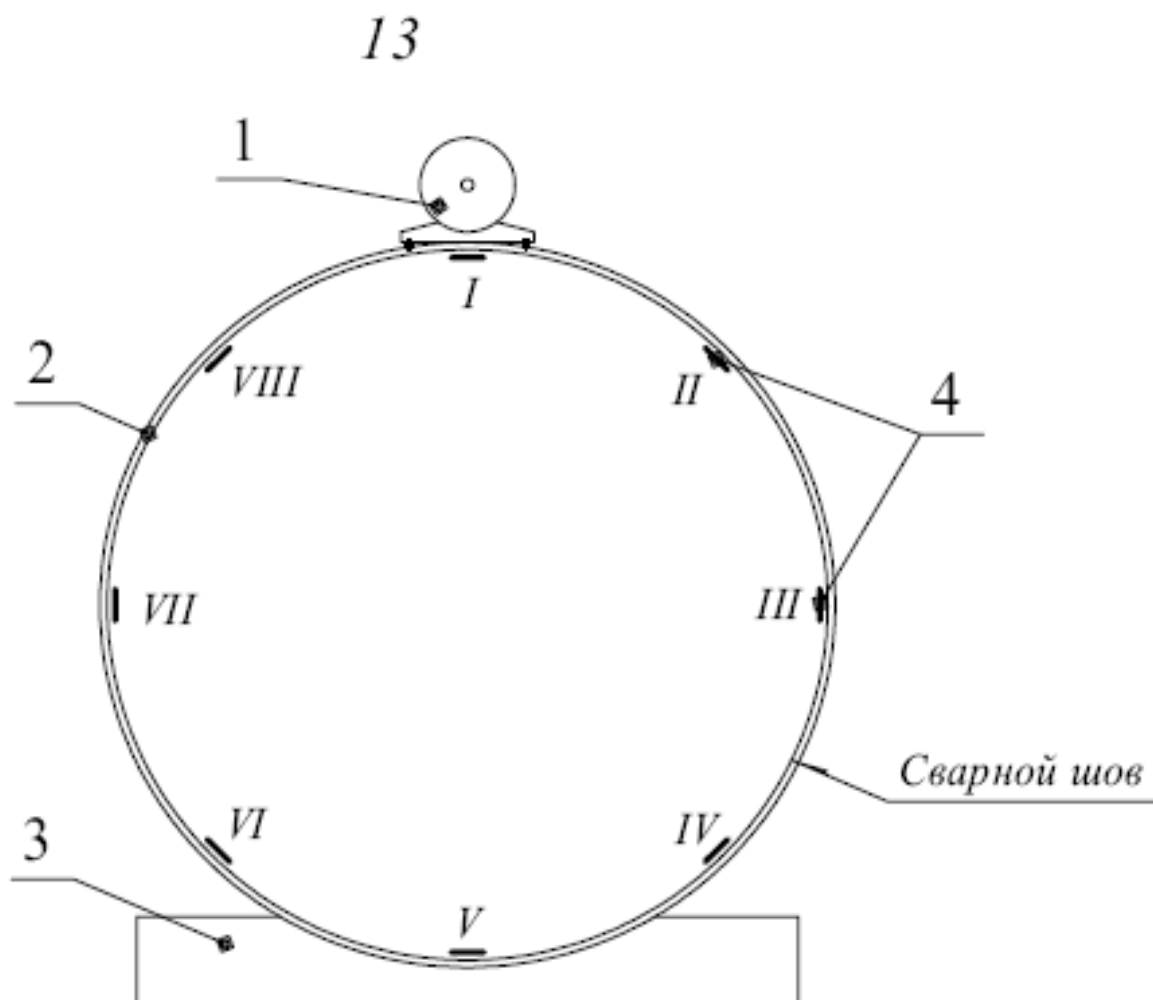


Рисунок 1.7 – Схема виброобработки образца.

1 – вибратор; 2 – образец; 3 – демпфирующая подушка; 4 – тензорезисторы.

Результаты экспериментального исследования влияния вибрационной обработки на величину и распределение остаточных напряжений показали, что с увеличением возмущающей силы происходит выравнивание остаточных напряжений по объёму изделия. Установлено, что при амплитуде вибрационных колебаний от 0,4 до 0,6 мм, получается мелкодисперсная структура металла шва. Чем амплитуда вибрации больше, тем размер зерна меньше. Однако ударная вязкость не меняется при изменении амплитуды вибрации.

Проведены экспериментальные исследования, которые показали, что применение виброобработки при получении сварных соединений базовых деталей позволяет повысить точность корпусов нефтеперерабатывающих аппаратов.

Вибрационная обработка может выполняться в процессе сварки. Это, безусловно, повышает производительность при изготовлении сварной конструкции. Например, для выполнения низкочастотной вибрационной обработки использовали комплекс ВТУ «Вепрь». В состав комплекса входят вибровозбудитель и блок управления. Конструктивно вибровозбудитель выполнен по одновальной схеме. Чтобы была возможность изменения размера возбуждающей силы, эксцентрик вибровозбудителя выполнен в виде дисков с равными дисбалансами. Изменение размера возбуждающей силы осуществляется за счет изменения взаимного расположения дисков. При запуске электродвигателя, эксцентрик вызывает круговые колебания вибровозбудителя, а поскольку вибровозбудитель закреплен на свариваемой конструкции, то вибрация передается конструкции. Если между лепестками эксцентрика выставлен угол  $180^\circ$ , нагрузка составляет 0 %, соответственно при уменьшении угла до  $0^\circ$  происходит увеличение нагрузки до 100 %. Таким образом, данная схема обеспечивает плавную регулировку виброусиления в диапазоне от 0 до 18 кН.

Кроме того, блок управления обеспечивает изменение частоты вращения двигателя и время проведения вибрационной обработки. Электродвигатель при включении на максимальную мощность потребляет ток 3,5 А.

Исследовали остаточные напряжения в сварных конструкциях из стали 10ХСНД ГОСТ 19281-89. В процессе выполнения исследований выполняли сравнение термической и вибрационной обработки на уменьшение внутренних напряжений. Показано, что термическая обработка обеспечивает снижение напряжений с 200 до 70 МПа. В меньшей степени снижались напряжения после вибрационной обработки с 200 до 100 МПа. Речь идет о растягивающих напряжениях.

Результаты проведенных исследований микроструктуры показали что существенных структурных различий между первым и вторым способами снижения остаточных напряжений не выявлено. Комплекс механических свойств стали как после термической обработки, так и после низкочастотной вибрационной обработки полностью соответствует требованиям нормативно-технической документации. Было отмечено, что значения ударной вязкости материала после термической обработки не на много (около 25%) превосходят значения ударной вязкости материала после низкочастотной вибрационной обработки, но значения KCV после обеих обработок превосходили требования нормативно-технической документации при температурах плюс 20°C и минус 60°C.

Были проведены исследования тонкой структуры, результаты которых позволяют предположить, что процесс сварки не оказывает существенного влияния на металл в зоне термического влияния сварного шва, различия в структуре основного металла и в структуре зоны термического влияния без последующей обработки незначительны. Низкочастотная вибрационная обработка не оказывает существенного влияния на структуру металла зоны термического влияния, хотя в структуре присутствуют следы пластической деформации.



Один из вариантов снижения остаточных деформаций и напряжений заключается в том, что термообработка выполняется не всего изделия, а локально. Например, технологией локальной электродуговой термообработки неплавящимся электродом в инертных газах наплавленного металла.

Предварительно была разработана теоретическая модель в которой учитывали потери на излучение и конвективный обмен с окружающей средой, а теплофизические коэффициенты рассматривали как функции от температуры. Модель учитывает взаимосвязь параметров режима горения дуги, свойств защитного газа, конструкции рабочего участка неплавящегося электрода, а также зависимость теплофизических коэффициентов от температуры.

Для того, чтобы проверить модель экспериментально выполняли восстановительную полуавтоматическую импульсно-дуговую наплавку в смеси  $Ar+18\%CO_2$  плит из стали 16ГС толщиной 90 мм. При наплавке заполняли плоскую разделку глубиной 8мм и шириной 30мм узкими продольными валиками, двумя широкими швами с поперечными колебаниями, поперечными колебаниями обратноступенчатым способом наложения слоев.

При механизированной наплавке минимальные остаточные макро- и микронапряжения достигаются при выполнении поперечных швов с обратноступенчатым наложением слоев. Локальная термическая обработка металла наплавки и зоны термического влияния диффузной дугой с катодом, заточенным на обратный конус, в аргоне обеспечивает снижение в 1,5 раза уровня напряжений первого рода, способствуя более равномерному распределению их в сварном соединении.

Помимо уменьшения напряжений, снижалась твердость наплавленного металла, увеличивалась ударная вязкость при отрицательных температурах, увеличивалась пластичность металла.

Применение компьютерного моделирования позволяет уже на стадии проектирования, например, корпуса судна снизить остаточные напряжения после сварки.

Разработана инженерная методика определения остаточных сварочных напряжений при проектировании судовых конструкций и новые решения задач определения остаточных сварочных напряжений в элементах судового корпуса с учетом конструктивных особенностей [5].

Другим вариантом снижения напряжений при локальной обработке выступает ультразвуковая ударная обработка [6]. Данный способ относится к высокоскоростному деформированию сварных соединений. Некоторым аналогом данного процесса является проковка сварных соединений. Известно, что рост частоты ударов при одинаковой скорости проковки, энергии единичного удара и скорости деформирования обеспечивает возможность получения большей степени деформации. Поэтому перспективным направлением является применение ультразвуковых частот [8].

Для проведения ультразвуковой ударной обработки в ИФПМ СО РАН разработали специальный технологический комплекс состоящий из ультразвукового генератора УЗГТ 0.5/27 и оснастки типа «Шмель», рисунок 1.6, 1.7.

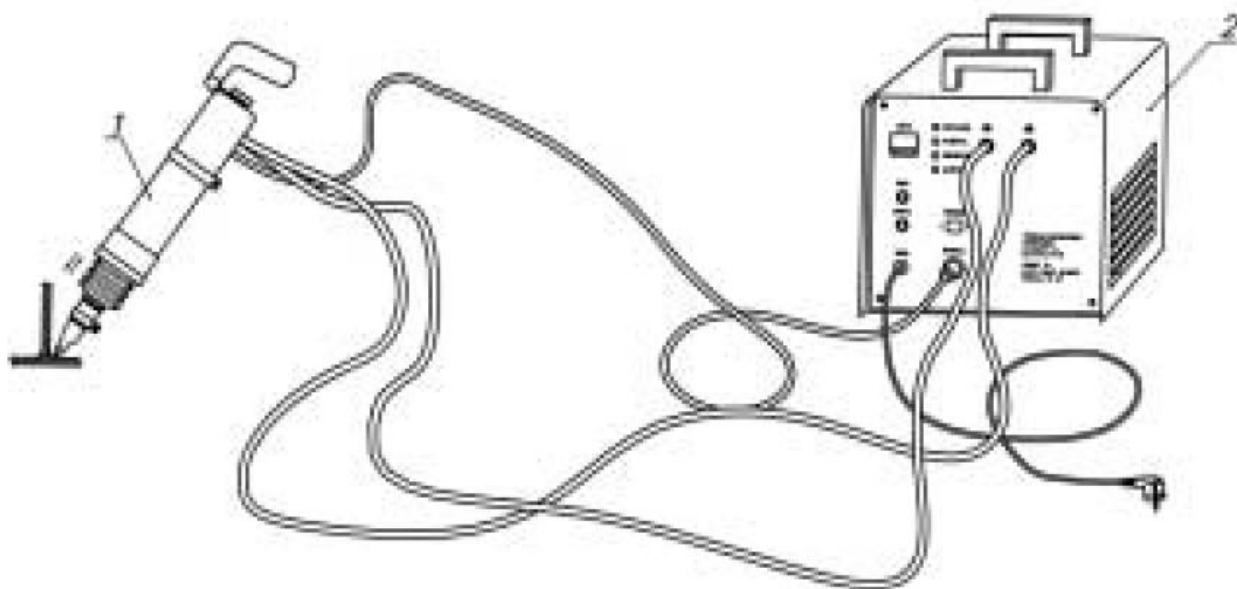


Рисунок 1.8 – Схема устройства для ультразвуковой ударной обработки

Величину остаточных сварочных напряжений определяли с помощью портативного рентгеновского определителя механических напряжений, рисунок 2.

Сварку образцов для исследований проводили по комбинированной технологии. Корень шва дуговой сваркой штучными электродами и второй проход механизированной в аргоне. Толщина металла составляет 2 мм. Ранее, в рамках выполнения бакалаврской работы [14] было доказано, что комбинированная технология позволяет уменьшить остаточные деформации. Причина здесь в том, что при механизированной сварке концентрация энергии выше, чем, если бы оба прохода выполняли штучными электродами.



Рисунок 1.9 - Ультразвуковой генератор УЗГТ 0.5/27 и оснастка «Шмель»

Проведенные исследования позволили установить, что при ультразвуковой ударной обработке сварного соединения стыка трубы из низколегированной стали 13Г1С-У повышается микротвердость в поверхностном слое при каждом шаге увеличения мощности обработки.

Равномерное распределение микротвердости по всем зонам шва наблюдается при мощности генератора технологического комплекса 420 Вт.



Рисунок 1.10 - Портативный рентгеновский определитель напряжений

Выявлено, что при сооружении трубопроводов диаметром 219, 530 и 720 мм в зоне корневого шва с внутренней стороны трубы формируются остаточные напряжения в основном растягивающего типа, достигающие значения 350 МПа. При этом ширина зоны с растягивающими остаточными сварочными напряжениями с внутренней стороны труб с толщиной стенки 8 мм находится в пределах 30 мм, а толщиной 14 мм – может достигать 80 мм.

Установлено, что ультразвуковая ударная обработка кольцевого шва с внешней стороны стенки трубы диаметром 720 мм качественно не меняет поле остаточных сварочных напряжений и даже может повысить их уровень с внутренней стороны. Однако проведение обработки с внутренней стороны стенки трубы способствует изменению средних значений ОСН от 250 до -220

МПа для осевых напряжений и от 420 до -280 МПа для кольцевых напряжений, что обеспечивает формирование напряжений сжатия на внутренней поверхности трубы.

### **1.3 Задачи работы**

Исходя из изложенного и сформулированной цели, в работе поставлены следующие основные задачи, последовательное выполнение которых позволит достичь сформулированной во Введении цели:

– выбрать способ снижения остаточных деформаций при сварке обечаек вытяжных труб

– определить необходимые исследования выбранного способа для повышения его эффективности;

– разработать методику выполнения экспериментальных исследований;

– выполнить эксперименты согласно разработанной методике;

– обработать и проанализировать результаты экспериментальных исследований;

– по результатам выполненных исследований разработать технологические рекомендации для применения их в практике сварки обечаек труб вытяжных.

.  
.

## 2 Методика исследований

### 2.1 Сварка образцов для проведения исследований

Для проведения исследований использовать пластины из нержавеющей стали 08X18H10T размерами 100x200 мм и толщиной 2 мм. В качестве присадочных материалов применять прутки 08X18H10T диаметром 2 мм. Подготовка поверхности образцов и присадочного материала производить по стандартным методам.

Образец короткой стороной жестко фиксировать в приспособлении на глубину 20 мм. Фиксировать короткой стороной – 100 мм. После жесткой фиксации исследуемого образца приспособление устанавливать на стенд ВЭДС-1500МК. Общий вид стенда показан на рисунке 1. Производитель ООО «Виброприбор», Россия. Стенд помимо источника вибрационных колебаний оснащен аппаратурой для контроля параметров вибрации типа «Базис-001». Аппаратура оснащена обратной связью и обеспечивает постоянство параметров, частота и амплитуда, вибрации. Производитель аппаратуры ООО «Измеритель», Россия.



Рисунок 2.1 - Электродинамический вибрационный стенд ВЭДС-1500МК

Установки испытательные вибрационные электродинамические серии ВЭДС предназначены для проведения испытаний изделий на воздействие

однокомпонентной гармонической вибрации в вертикальном направлении и испытаний на вибропрочность и виброустойчивость.

Установки обеспечивают:

создание вибрационных колебаний в заданном диапазоне частот и амплитуд;

измерение параметров вибрации (виброускорение, виброскорость, виброперемещение);

автоматическое поддержание заданного параметра и изменение его по программе;

контроль спектра вибрации, определение резонансных частот объекта;

контроль, защиту и автоматическое отключение вибростенда при возникновении внештатных ситуаций;

на вибраторе (превышение предельно допустимых токов и напряжений в подвижной катушке и катушке подмагничивания, превышение предельно допустимых значений параметров вибрации в системе «испытываемый груз – технологическая оснастка – вибратор»)

После установки приспособления с зафиксированным образцом на рабочую поверхность стенда ВЭДС-1500МК на образец наплавлять за один проход валик по центру пластины вдоль длинной стороны. Направление наплавки от незакрепленного края к заземлению образца в приспособлении. При этом должна быть включена вибрация согласно методике эксперимента. Способ наплавки валика – как и сварка труб неплавящимся электродом в среде аргона, ТIG. Наплавку валика выполнять с помощью источника питания «Форсаж 315», рисунок 2.2. Известно, что режим сварки, при токе в 90 А, обеспечивает провар по всей толщине пластин 2 мм (для случая сварки без вибрационной обработки).



Рисунок 2.2 - Источник питания «Форсаж 315»

Образцы 1 и 2 выполнять без сопутствующей вибрационной обработки. Образцы 3–9 выполнять на режиме «сварка+вибрационная обработка».

Частота вибрационной обработки для образца 3 - 20 герц, для образца 4 – 30 герц, для образца 5 – 40 герц, для образца 6 – 50 герц, для образца 7 – 60 герц, для образца 8 – 70 герц и для образца 9 – 80 герц. При проведении наплавки образцов амплитуда колебаний неизменна и составляет  $\pm 0,225$  мм



(размах 0,45 мм), направление колебаний задавать вертикально (перпендикулярно лицевой поверхности).

Наплавленные образцы охлаждать под действием воздуха лаборатории и выполнять демонтаж из приспособления после достижения температур 30...50 С. Затем укладывать на плиту поверочную, рисунок 3. Схема выполнения измерений следующая. Отметить 5 точек А–Д вдоль наплавленного валика на расстоянии 20, 55, 90, 125 и 160 мм от незакрепленного края. В каждой точке выполнить измерения с помощью шаблона УШС-3: с лицевой стороны — ширину  $e$  и усиление шва  $g$ , а также длину хвостовой части сварочной ванны  $b$ , а с оборотной стороны — загиб  $f$ , шаг между соседними каплями проплава  $t$ , усиление корня шва  $g_1$ , и длину проплава  $l$ . Измерение загиба  $f$  производить измерительными головками, установленными на штатив измерительный магнитный относительно плоскости заделки, испытавшей минимальные остаточные деформации (из-за высокой жесткости, большого теплоотвода и т.д.).



Рисунок 2.3 – Плита поверочная 1 класса.



Рисунок 2.4 - Штатив измерительный с головкой индикаторной  
 Схема измерения и основные размеры приведена на рисунках 5, 6, 7.

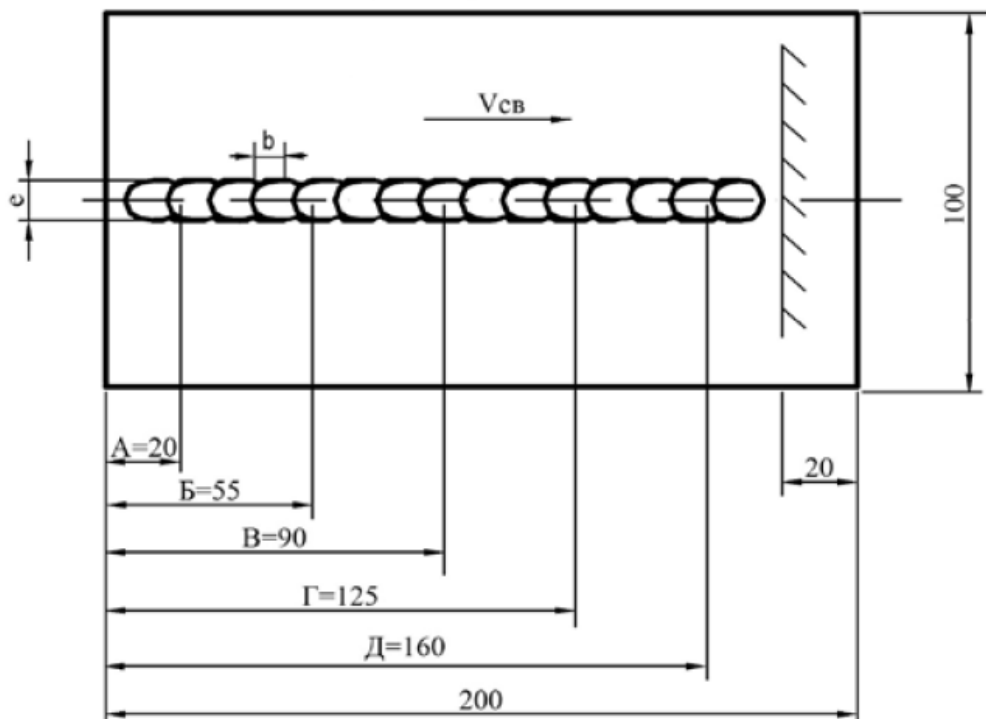


Рисунок 2.5 - Лицевая сторона образца



Рисунок 2.6 – Вид образца сбоку

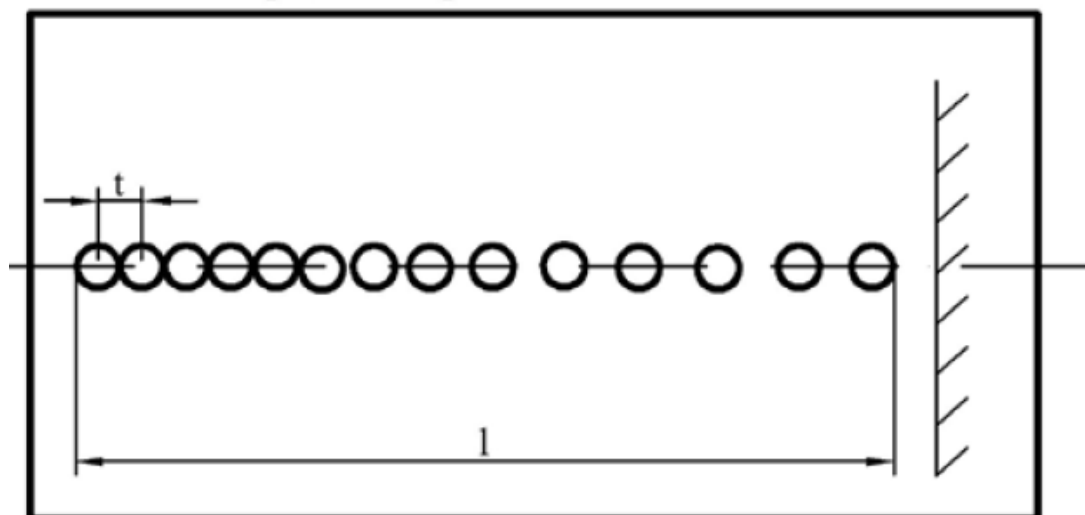


Рисунок 2.7 – Обратная сторона образца.

## 2.2 Сварка и исследования геометрии обечаек

Сварку продольного шва обечаек выполняли методом TIG с присадочными прутками. В качестве источника питания применяли Форсаж 315, см. рис. 2.2. Листовой металлопрокат из нержавеющей стали вальцевали на вальцах, рисунок 2.8.

После вальцовки необходимо проверить величину нестыковки кромок, которая должна не превышать миллиметр на сторону. В зазор необходимо установить зазорники.

Сварка может быть проведена только после оценки отделом технического контроля правильности сборки. При осуществлении сборки должна быть учтена возможность свободной усадки свариваемого металла. Запрещается производить совместную сборку с посадкой с натягом.

Прихватки должны располагаться равномерно по периметру стыка. Необходимо предусмотреть расстояние между прихватками равное 0,15-0,20

метра. Длина каждой прихватки должна быть порядка 1 см.



Рисунок 2.8 - Вальцы

При выполнении прихватки используются электроды с основным покрытием марки ОЗЛ-8 с поперечным сечением диаметром 3 миллиметра. При этом используется обратная полярность постоянного тока - 50-100 ампер.

Сделанные прихватки обрабатывают шлифовальным кругом и подвергают визуальному контролю. Необходимо руководствоваться к качеству прихваток теми же требованиями, которые предъявляются к основному сварному шву.

Если результат контроля прихватки показал на наличие недопустимых дефектов, их удаляют способом механической обработки.

После выполнения прихваток и положительных результатов их контроля производят сварку швов. Используются электроды с основным покрытием марки ОЗЛ-8 диаметром поперечного сечения 4 миллиметра. При этом используется обратная полярность постоянного тока - 100-130 ампер.

Определение внутреннего диаметра получаемых обечаек выполняли при помощи нутромера НМ50-1300 фирмы «Etalon». Данный прибор обладает широкими технологическими возможностями. При диапазоне измерений от 50 до 1300 мм он обеспечивает точность определения размера 0,01 мм. Нутромер представляет собой набор штанг с резьбами фиксированной длины и измерительное устройство, по конструкции аналогичное микрометру, рисунок 2.9, 2.10.



Рисунок 2.9 – Общий вид нутромера НМ50-1300



Рисунок 2.10 – Нутромер подготовлен для измерений

### **2.3 Исследования качества получаемых сварных соединений**

Сварные соединения обечаек труб вытяжных и наплавляемых образцов требуют проведения визуального и измерительного контроля.

ВИК основного металла и сварных соединений проводится невооруженным глазом и с применением оптических приборов (луп, эндоскопов, зеркал, и др.).

По результатам ВИК, определяется размер усиления шва, согласно ГОСТ 14771-76, ширина шва.

В данной исследовательской работе ВИК основного металла и сварных соединений труб и исследуемых образцов выполняли в объеме 100 % невооруженным глазом и с применением оптических приборов:

- лупа измерительная (ГОСТ 25706) с 4-7-кратным увеличением;
- штангенциркуль (ГОСТ 166);
- универсальный шаблон сварщика типа УШС-3.

При проведении ВИК помимо формы сварного шва и размеров сварного шва определяли такие наружные дефекты как внешняя пористость сварного шва; отсутствие сплавления с основным металлом, непровары, трещины.

Сначала производили оценку формы и размеров сварного шва образца или обечайки. Далее оценивали и описывали внешние дефекты.

Ограничиться проведением только ВИК недостаточно, поскольку он не позволяет выявить внутренние дефекты и структуру получаемого шва.

Поэтому образцы разрезали на две половинки перпендикулярно оси сварного соединения отрезным станком Erple KKS 315 L (фирма Remet, Италия) с водяным охлаждением, рисунок 2.11. После выполнения разрезания оценивали и описывали внутренние дефекты и исследовали структуру.

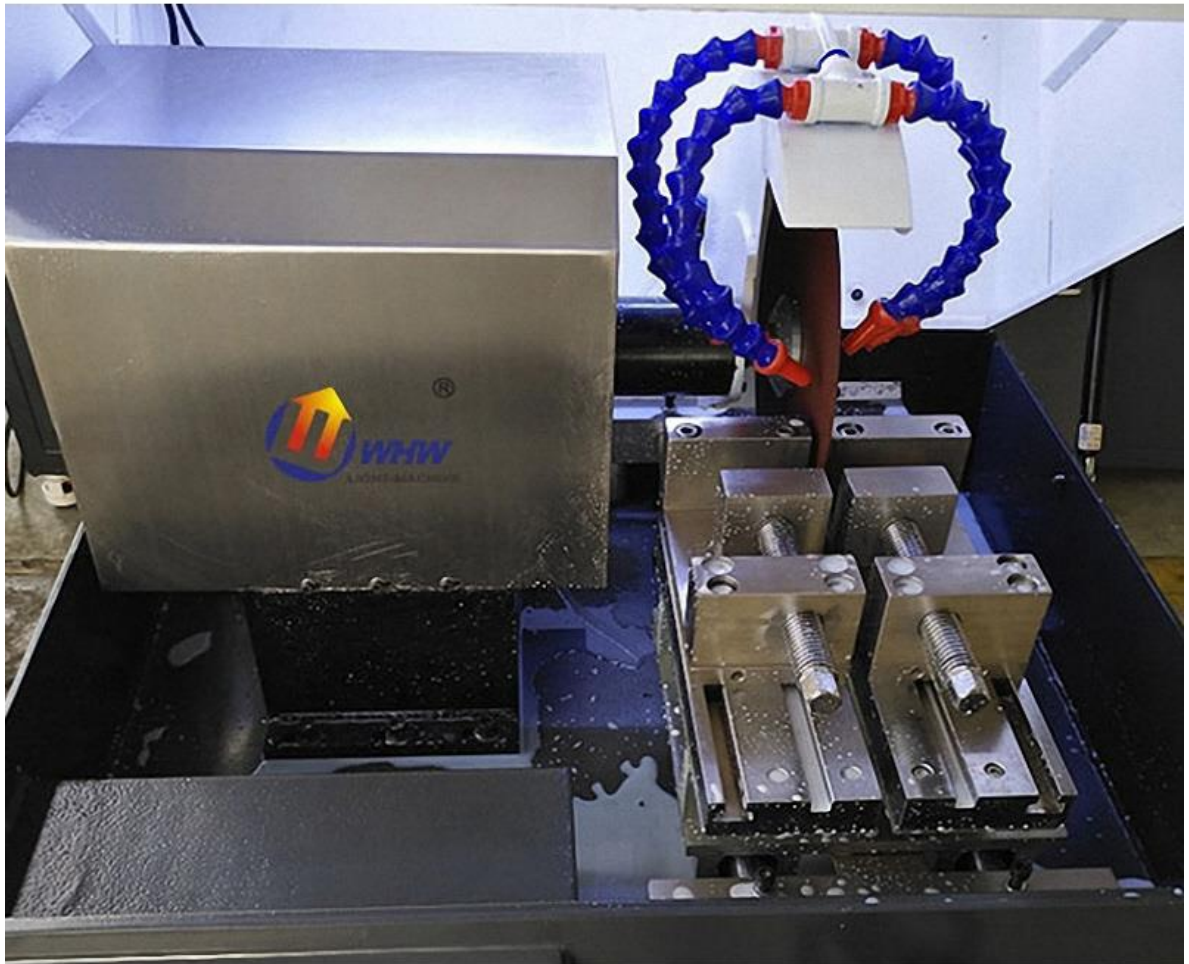


Рисунок 2.11 – Станок Erple KKS 315 L

После разрезания образцы имеют аналогичные обозначения, только с добавлением индекса «1» для левой половинки и индекса «2» для правой половинки.

Поэтому помимо перечисленных методов контроля, контроль был расширен другими методами, которые позволят обнаруживать и идентифицировать внутренние дефекты сварного шва обечайки, а именно:

- радиографический контроль;
- микроскопическое исследование поперечного сечения сварного шва;
- измерения микротвердости твердости на соответствующих участках поперечного сечения сварного шва.

При радиографическом контроле необходимо использовать маркировочные знаки, поэтому серия образцов для проведения радиографического контроля обозначали следующим образом: P2, M2, K2, C2.

Радиографический контроль проводили с использованием рентгеновского аппарата [89] Арина 9, рисунок 2.12, который включает: рентгеновскую трубку; высоковольтный трансформатор; термореле; манометр; низковольтный кабель; вентилятор охлаждения.

Дополнительно рентгеновский аппарат комплектуется пультом управления, соединительным кабелем, силовым кабелем длиной 10 м, заземляющим кабелем длиной 5 м и руководством по эксплуатации.

Основные характеристики рентгеновского аппарата Арина 9 приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристики аппарата Арина 9

Рентгеновская чувствительность	$\leq 2\%$ (А3 сталь)
Рентгеновское излучение	в заданных пределах
Максимальное проникновение по стали на пленку	24 мм
Диапазон регулирования напряжения	100 - 200 кВ
Защита от перенапряжения	260 В
Защита от перегрузки по току	7,5 мА
Заключение калибровки	соответствует

Аппарат Арина 9 можно эксплуатировать при температурах от +40 до -50 С.

При РК используются источники ионизирующих излучений, энергия и анодное напряжение на рентгеновской трубке, которых зависит от толщины металла просвечиваемых изделий и типа применяемой рентгеновской пленки и при всем этом обеспечивать требуемая чувствительность контроля 0,3 – 0,5 мм. На контролируемых участках устанавливаются эталоны чувствительности. При просвечивании разнотолщинного сварного соединения чувствительность контроля выбирают по наиболее толстой детали, а максимальный допустимый размер дефекта выбирают по меньшей толщине.





Рисунок 2.12 – Общий вид аппарата рентгеновского Арина 9

При РК сварных соединений МГ применяются высококонтрастные технические пленки отечественного или импортного производства в данном случае пленка INDUSTREX AA400 Film шириной 70 мм. Величина оптической плотности рентгеновского снимка не менее 1,5 единиц оптической плотности.

Режим проведения РК: напряжение 190 В, сила тока 5 мА, фокусное расстояние 400 мм, время экспозиции 30 сек.

После просвечивания выполняли проявочный процесс и расшифровку снимков [39].

## 2.4 Исследования деформаций образцов

Измерение деформаций образцов выполняется индикаторами часового типа, см. рис. 2.4. Для трех образцов, наплавка валика на которые производилась методом TIG по режимам: сила сварочного тока 90 ампер на прямой полярности, диаметр присадочной проволоки 1,6 мм. Проволока должна соответствовать требованиям ГОСТ 2246-70. Поскольку не предусмотрена механизированная подача проволоки в зону горения сварочной дуги проволоку применим в виде прутков.

При общности режимов наплавки валика варьируемым фактором принимали частоту приложенных к вибростенду колебаний.

На каждое измерение параметра принимали 3 образца. Суммировали показания в одних и тех же точках образцов, определяли среднее значение и затем для каждой точки определяли среднеквадратичное отклонение.

Расчетное значение среднеквадратичного отклонения индикаторов определять по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (w_i - w_{i_{расч}})^2}$$

где  $w_i$ , - первоначальное показание стрелочного индикатора

$w_{расч}$  – фактическое радиальное перемещение стрелки индикатора, мм

По результатам обработки показаний стрелочных индикаторов можно будет сделать вывод, насколько частота оказывает влияние на уменьшение величины деформации.

## **2.4 Металлографические исследования**

Для оценки микроструктуры зоны сварки сечение образцов, полученных в результате их распила на отрезном станком Epplle KKS 315 L изучали металлографическим методом.

Вырезанные образцы из сваренных пластин шлифовали, грубое и тонкое полирование проводили на станке EMPD-2D, рисунок

Внешний вид станка для изготовления металлографических шлифов представлен на рисунке 2.13.



Рисунок 2.13 – Внешний вид станка EMPD-2D.

Затем протравленную поверхность образцов исследовали с использованием оптического микроскопа и программного обеспечения для анализа изображений.

Исследование структуры проводили методом оптической микроскопии на универсальном металлографическом микроскопе «Альтами МЕТ 1Д» (фирма ООО «Альтами») на поперечных срезах всех вариантов образцов при различных увеличениях. Внешний вид металлографического микроскопа «Альтами МЕТ 1Д» представлен на рисунке 2.14.



Рисунок 2.14 - Металлографический микроскоп «Альтами МЕТ 1Д»

Микротвердость исследовали на твердомере-микроскопе НХ1000ТМ (Remet, Италия), рисунок 2.15 с использованием индентора Виккерса (ГОСТ 9450-76) [23], рисунок 2.16.

В данной модели твердомера нагружение, выдержка груза и подъем индентора осуществляется автоматически. Это позволяет создавать одинаковые условия измерения микротвердости и уменьшает погрешность измерений.



Рисунок 2.15 – Твердомер-микроскоп NH1000TM:

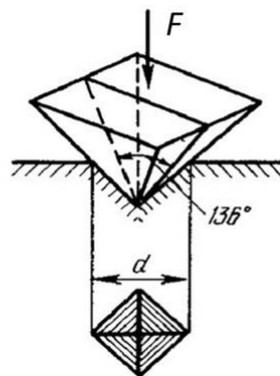


Рисунок 2.16 – Схема определения микротвердости

Число микротвердости для индентора Виккерса (HV, МПа) определялась по формуле:

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{0,102 \cdot 2F \cdot \sin \alpha / 2}{d^2} = 0,189 \frac{F}{d^2} \quad (15)$$

где  $F$  – нагрузка на индентор, Н;

$d$  – среднее значение диагонали отпечатка индентора, мкм (рисунок 47, б).

Микротвердость определяли на образцах с тщательно отшлифованной и полированной поверхностью в соответствии с [14] при нагрузке 100 г и времени нагружения 10 с. Измерение номер 3 выполняли по центру наплавленного валика, измерение номер 2 и 4 выполняли по околошовной зоне образца, измерение номер 1, 5 выполняли в основном металле.

Измерения микротвердости выполняли на трех образцах, и в качестве значения принимали среднеарифметическое значение по 3 измерениям. Обработку результатов исследований микротвердости выполняли по стандартным методикам.

## **2.5 Исследования прочности получаемых сварных соединений**

Для определения прочностных свойств полученных образцов необходимо произвести испытание на разрывной машине. Для этого этапа эксперимента была выбрана разрывная машина Р-10, как имеющаяся в наличии. После оценки ее технических характеристик стало ясно, что она полностью удовлетворяет требованиям и пригодна для проведения испытаний образцов на разрыв. Технические характеристики разрывной машины приведены в таблице 2.1 Внешний вид машины представлен на рисунке 2.17. Испытания сварных соединений регламентируется ГОСТ 6996-66 и ГОСТ Р ИСО 15614-12-2009 [28], [29].

Таблица 4.2 - Технические характеристики разрывной машины Р-10

Технические характеристики	Значение
1	2
Наибольшая предельная нагрузка, кН	100
Диапазоны измерения нагрузки, кН	0-20; 0-50; 0-100
Максимальная высота рабочего пространства, мм, при испытании на - растяжение - сжатие	800 210
Рабочий ход активного захвата, мм	280
Диапазон скоростей перемещения активного захвата без нагрузки, мм/мин	8-300
Скорость установочного хода пассивного захвата, не менее, мм/мин	200
Предел допускаемой погрешности при измерении нагрузки, начиная с 20% наибольшего значения каждого диапазона, %	$\pm 1$
Масштаб диаграммной записи перемещения активного захвата	5:1; 50:1
Размеры испытываемых образцов: - диаметр цилиндрических образцов, мм; - толщина x ширина плоских образцов, мм; - диаметр образцов с головками, мм	5-20 0,5-20x40 <20
Габаритные размеры, не более, мм: - длина - ширина - высота - углубление (прямоук)	1410 940 2485 350
Параметры питания	380 В, 50 Гц
Масса, не более, кг	1250

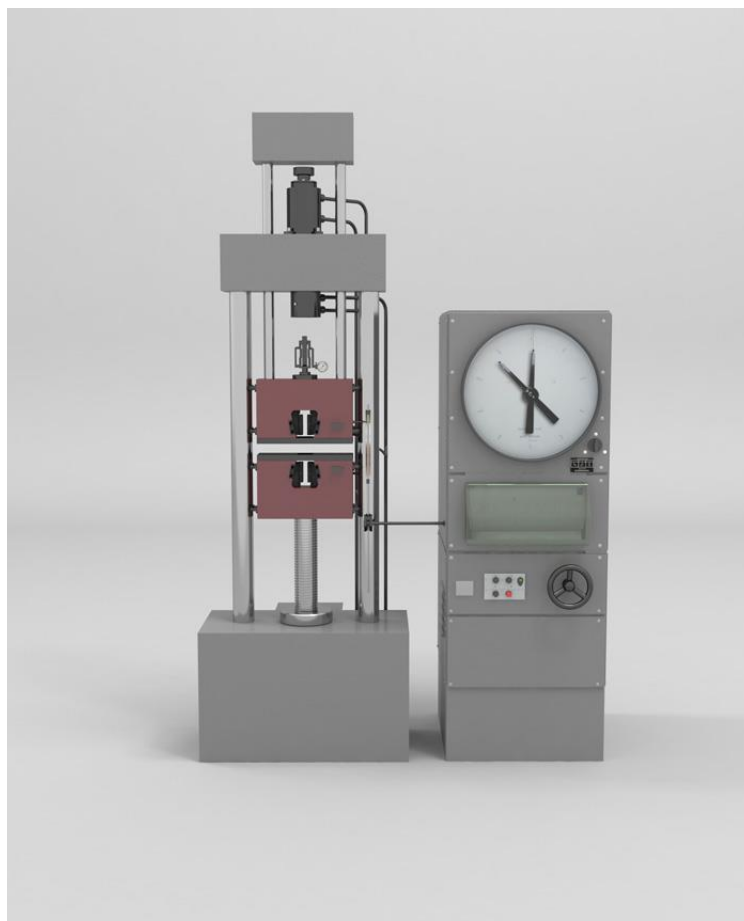


Рисунок 4.4 – Разрывная машина Р-10

Исследования прочности получаемых соединений выполняли согласно ГОСТ следующим образом. Применяли плоские образцы. Образцы вырезали из образцов для исследования деформаций.

Образцы поочередно закреплялись в разрывной машине, прикладывалось усилие, а после разрыва записывался результат показанный на шкале машины. Концы пластин были согнуты, для увеличения толщины листа, чтобы обеспечить лучший зажим в разрывной машине и снизить вероятность выскальзывания образца.



### 3 Результаты исследований

#### 3.1 Результаты исследований геометрии образцов

Выполнялась сварка образцов согласно методике, раздел 2. После охлаждения в спокойных условиях, без движения воздушных масс, образцы устанавливали на поверочную плиту 1 класса, рисунок 2.3. Затем выполняли настройку головки индикаторной и определяли величину деформаций. Усредненные, после обработки результаты измерений для образцов, сварка которых выполнялась без приложения виброколебаний, показаны на рисунке 3.1.

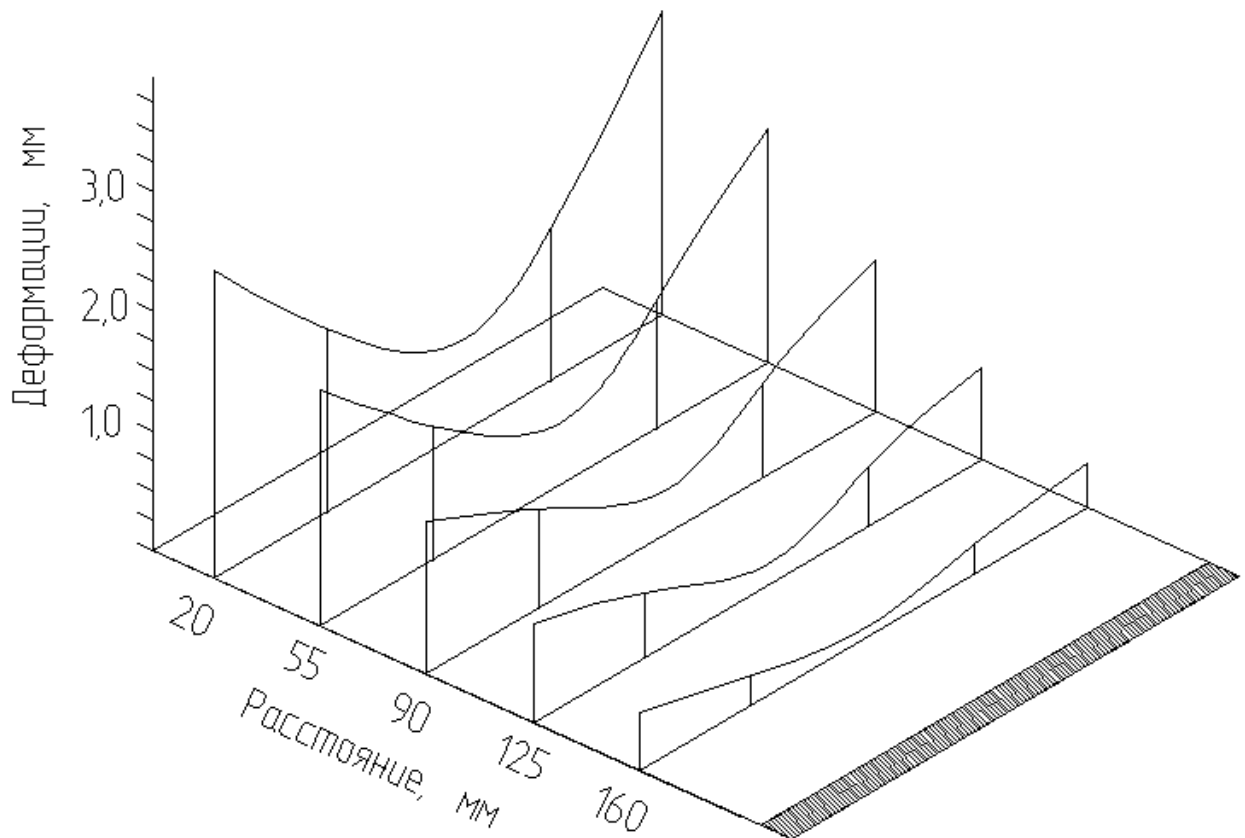


Рисунок 3.1 – Деформации пластин, на которые наложен валик без приложения виброколебаний.

Как следует из рисунка, величина деформаций максимальна у незакрепленного края и составляет, по краю образца параллельного нанесенному валику 2,4 мм.

Образец сваренный с приложением вибрационных колебаний частотой 20 герц после исследования деформаций имеет следующее их распределение, рисунок 3.2. Отмечено незначительное снижение величины деформаций. Так максимальные деформации составляют 2,2 мм.

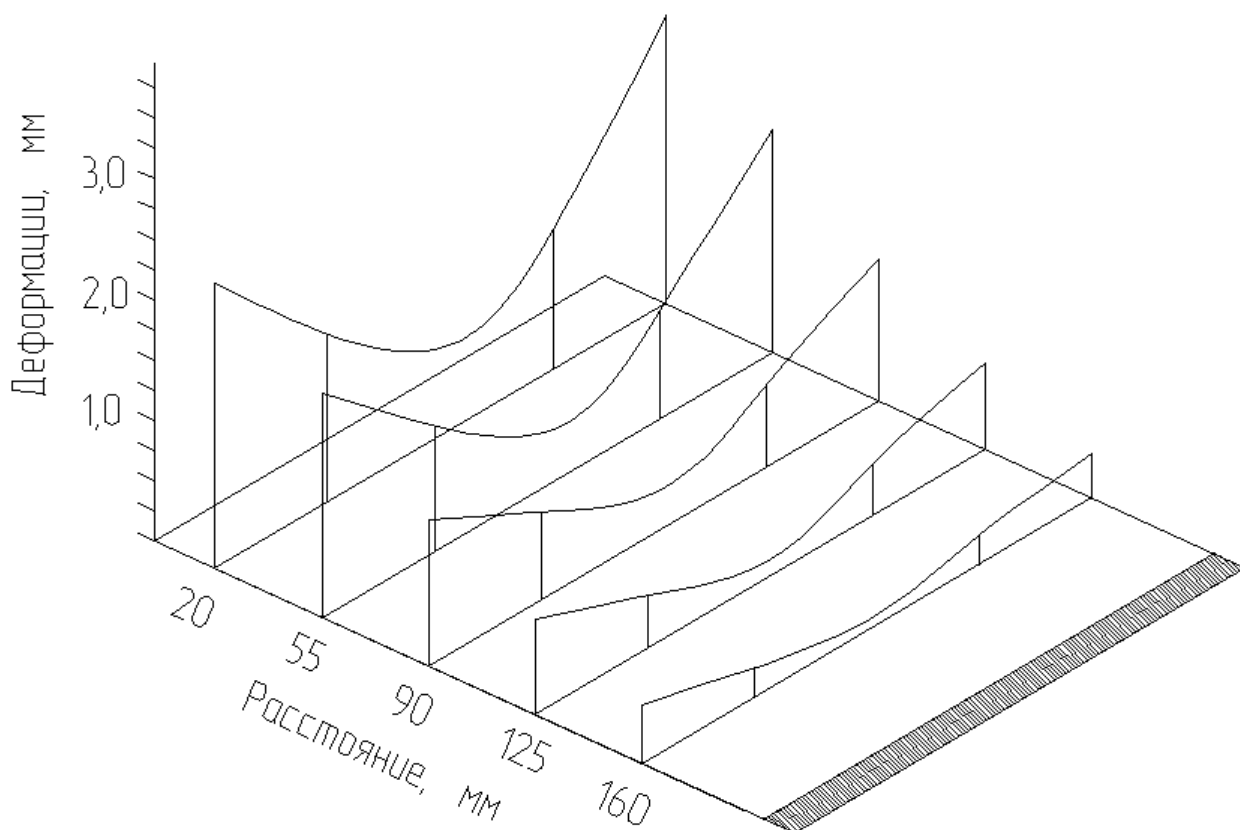


Рисунок 3.2 – Деформации пластин, на которые наложен валик с приложением виброколебаний частотой 20 герц

Дальнейшее увеличение частоты виброколебаний приводит к снижению деформаций. Так при частоте виброколебаний 40 герц максимальный размер деформаций составляет 2,0 мм.

Увеличение частоты виброколебаний до 60 герц приводило к дальнейшему снижению до 1,8 мм деформаций. И при частоте виброколебаний 80 герц величина деформаций составила 1,5 мм.

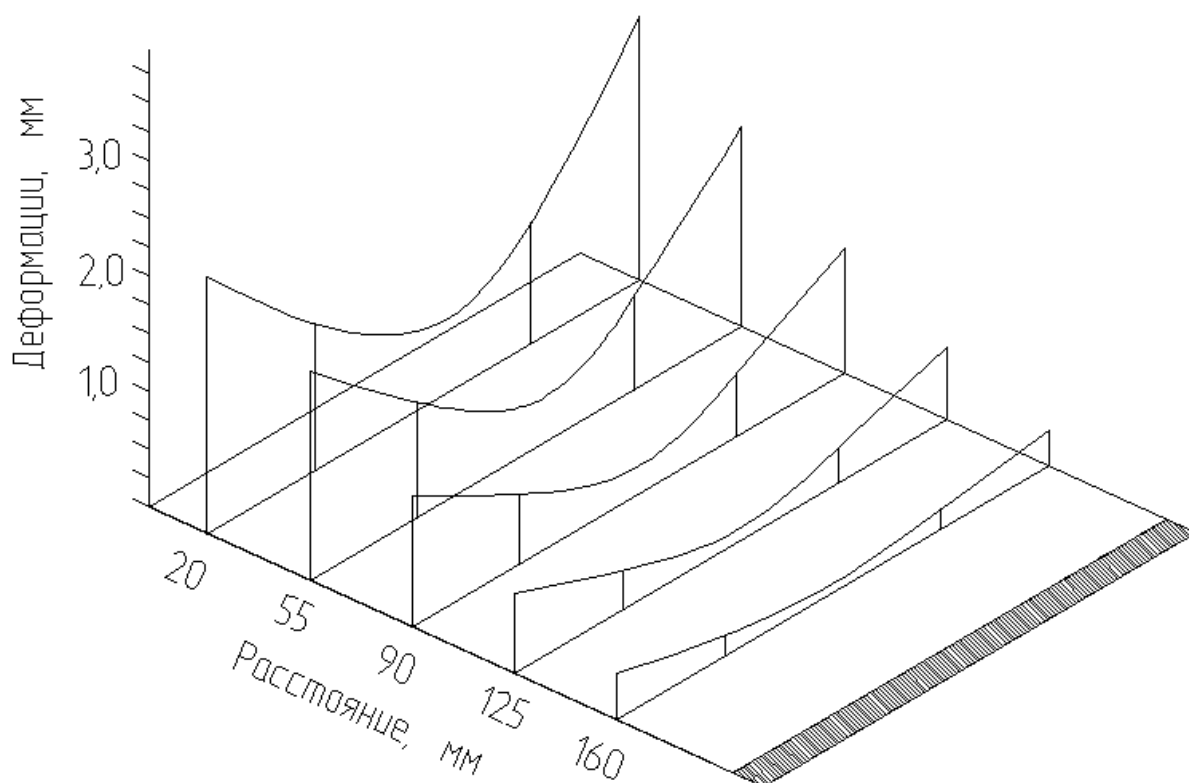


Рисунок 3.3 – Деформации пластин, на которые наложен валик с приложением виброколебаний частотой 40 герц

Однако дальнейшее увеличение частоты виброобработки до 100 и более герц приводило к тому, что нарушалась стабильность горения сварочной дуги. Таким образом наплавку валиков удалось выполнить при частоте виброколебаний не превышающей 80 герц.

Можно сделать вывод о снижении послесварочных деформаций, ориентировочно, на 30%. Применение других технологических приемов, таких как сварка в смеси газов, при которой происходит увеличение погонной энергии сварки и уменьшение тепловложения в свариваемые образцы показало незначительное уменьшение сварочных деформаций. Так сварка с применением газовой смеси М1, в сравнении с чистым аргоном, позволила снизить величину сварочных деформаций на 10%. Без применения виброобработки.

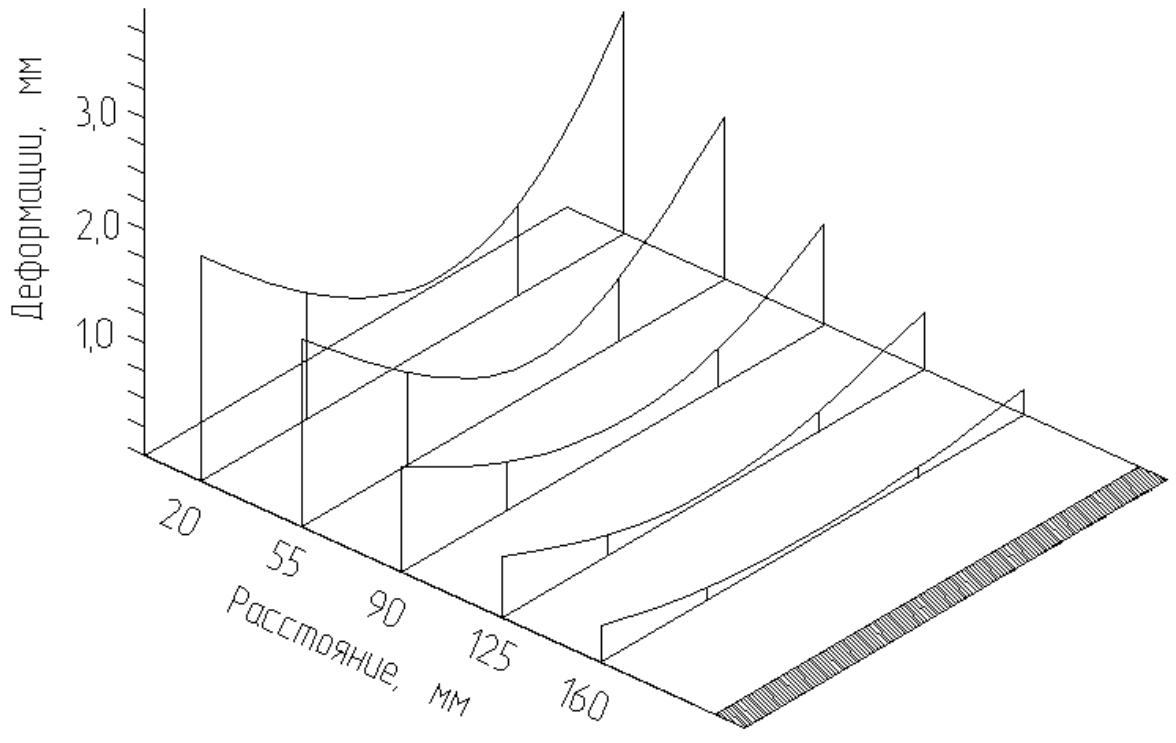


Рисунок 3.4 – Деформации пластин, на которые наложен валик с приложением виброколебаний частотой 60 герц

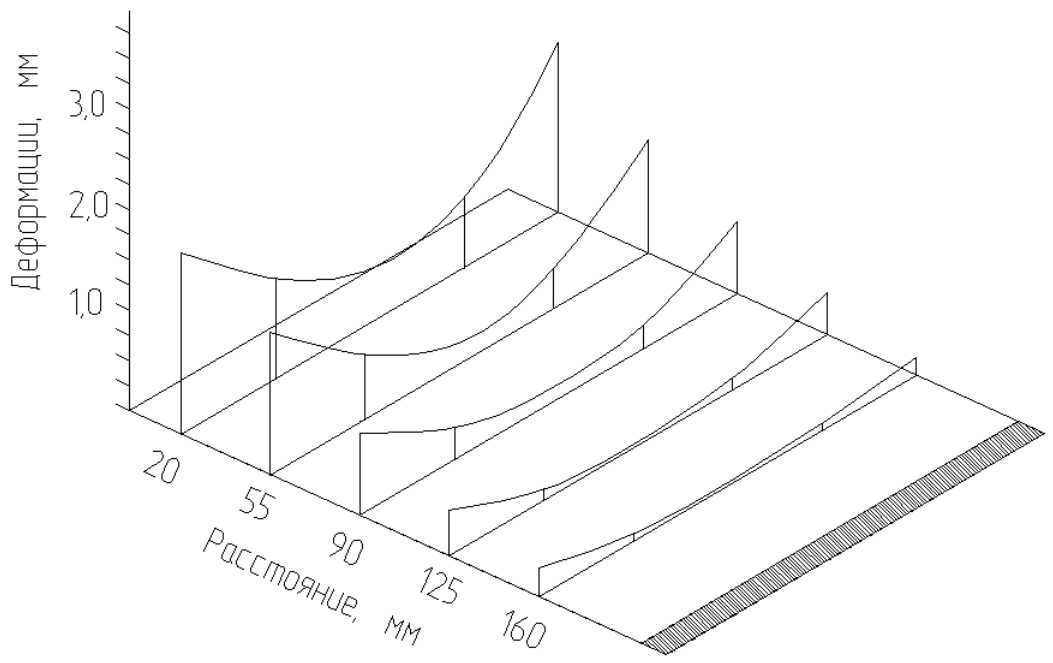


Рисунок 3.5 – Деформации пластин, на которые наложен валик с приложением виброколебаний частотой 80 герц

Результаты выполнения визуально-измерительного контроля показали, что геометрические параметры образцов соответствуют требованиям ГОСТ. Дефектов, выявляемых методами визуально-измерительного контроля выявлено не было

### 3.2 Результаты исследований геометрии труб

Выполнялась сварка образцов согласно методике, раздел 2. После охлаждения в спокойных условиях сваренные обечайки измеряли нутромером на предмет отклонения от номинального диаметра. Для выполнения измерений применяли разметку труб по схеме: разделяли обечайки на кольца и каждое кольцо на 16 секторов. Сварено было 4 обечайки. Одна была сварена без применения вибрационной обработки, 3 обечайки сварены с применением вибрационной обработки.

Отклонение диаметра от номинального значения обечайки сваренной без применения вибрационной обработки показано на рисунке 3.6. Отклонения диаметра от номинального значения достигают 1%.

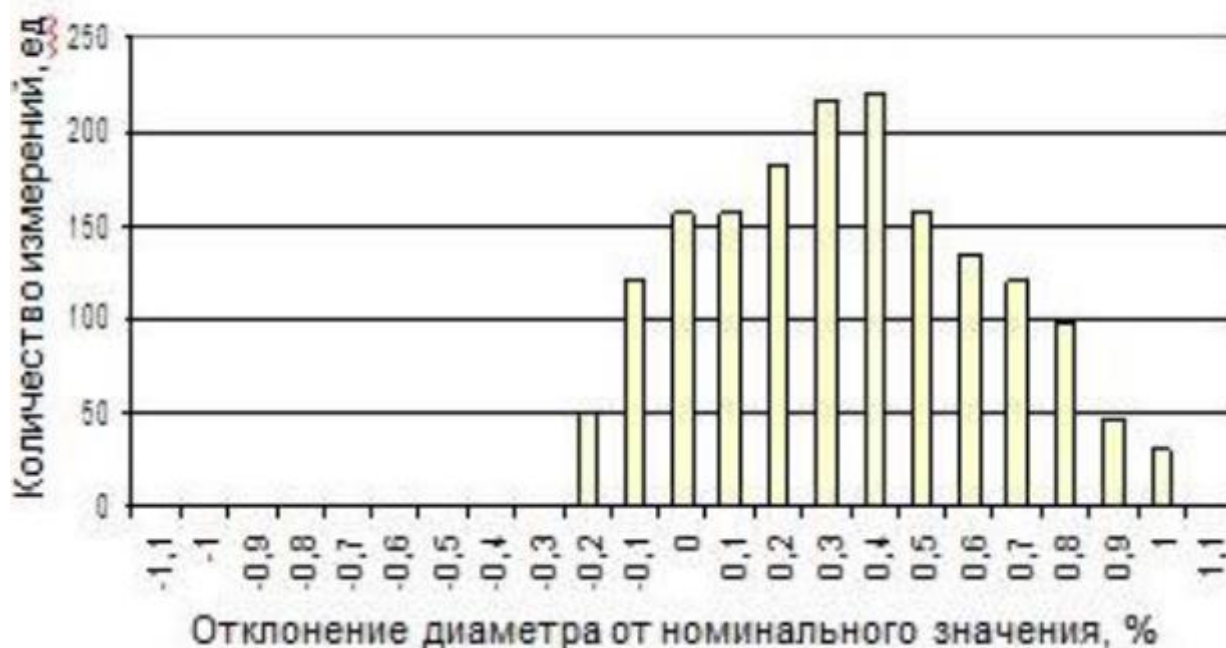


Рисунок 3.6 – Отклонения внутренних диаметров от номинального значения для обечаек, сваренных без применения вибрационной обработки.

Сварные швы данной обечайки по своим геометрическим характеристикам соответствуют требованиям ГОСТ. Недопустимых дефектов данной обечайки при визуальном осмотре выявлено не было.

Результаты измерений отклонений внутренних диаметров от номинального значения при приложении вибрационной обработки показаны на рисунке 3.7. Частота вибрационной обработки составляет 20 герц. Показано, что максимальное отклонение при этом достигает 0,7%.

Дальнейшее увеличение частоты до 40 герц приводит к тому, что при сохранении отклонений в размере 0,7% большая часть измерений группируется вокруг значения  $+0,1 -0,1$  %.

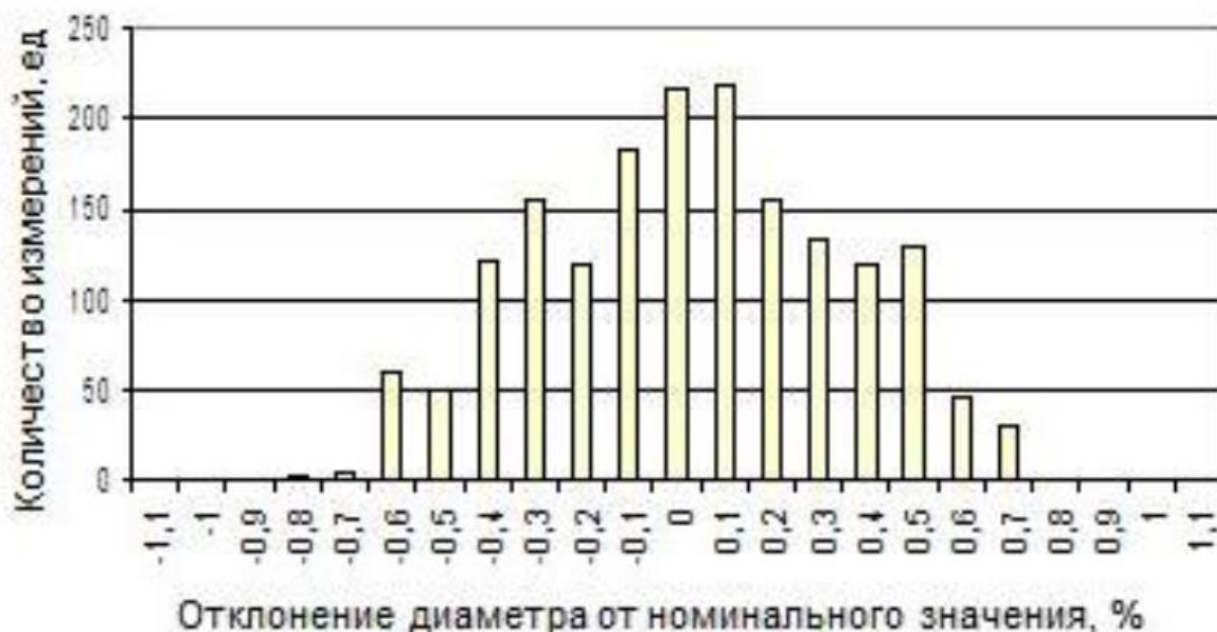


Рисунок 3.7 – Отклонения внутренних диаметров от номинального значения для обечаек, сваренных с применением вибрационной обработки частотой 20 герц.

Сварные швы данной обечайки по своим геометрическим характеристикам соответствуют требованиям ГОСТ. Недопустимых дефектов данной обечайки при визуальном осмотре выявлено не было.



Рисунок 3.8 – Отклонения внутренних диаметров от номинального значения для обечаек, сваренных с применением вибрационной обработки частотой 40 герц.

Сварные швы данной обечайки по своим геометрическим характеристикам соответствуют требованиям ГОСТ. Недопустимых дефектов данной обечайки при визуальном осмотре выявлено не было.

При частоте обработки 80 герц общее количество измерений с отклонениями уменьшается.

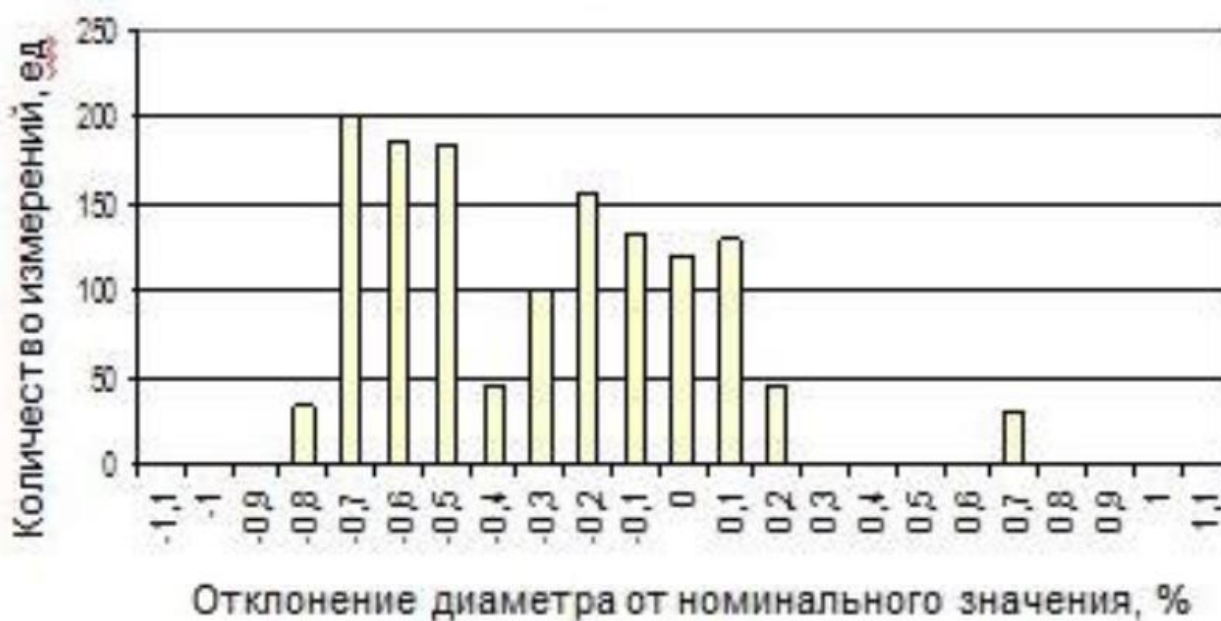


Рисунок 3.9 – Отклонения внутренних диаметров от номинального значения для обечаек, сваренных с применением вибрационной обработки частотой 80 герц.

### 3.3 Результаты исследования микротвердости

Результаты измерения микротвердости в пяти зонах сварного соединения представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Статистическая обработка результатов измерения микротвердости

Зона измерения	$X_d = X_{cp} \pm \Delta X$ , МПа	$S_n$	W	$S(X_{cp})$
Образец без вибрационной обработки				
1	949 ± 8	1130	14	377
2	2157 ± 15	1976	16	659
3	881 ± 7	1680	15	970
4	810 ± 4	315	8	105
5	4458 ± 3	301	7	100
Частота вибрационной обработки 20 герц				
1	607 ± 4	630	7	210
2	1791 ± 7	987	8	329
3	1375 ± 6	1081	10	624
4	368 ± 9	1227	19	409
5	819 ± 7	764	13	255
Частота вибрационной обработки 40 герц				
1	8147 ± 7	944	12	315
2	451 ± 17	2220	21	740
3	190 ± 9	3240	40	1871
4	172 ± 7	244	6	81
5	487 ± 4	561	12	187
Частота вибрационной обработки 80 герц.				
1	607 ± 8	630	7	210
2	1002 ± 9	1038	9	346
3	879 ± 7	1499	19	866
4	887 ± 4	426	9	174
5	439 ± 4	573	13	191



### **3.4 Результаты исследования прочности**

По результатам исследований прочности образцов, вырезанных из пластин с наплавленным валиком можно сделать вывод, что разрушение происходило с равной долей вероятности по основному и наплавленному металлу. Таким образом, существенного разупрочнения мест сварки не происходит. Данная тенденция прослеживается при всех вариантах частоты приложения вибрационных колебаний.

## **4 Технологические рекомендации по сварке обечаек**

Анализ результатов показывает, что применяемый метод сварки TIG, обеспечивает высокое качество сварных соединений. В сочетании с вибрационной обработкой данный способ сварки позволяет обеспечить высокое качество обечайки.

Вибрационную обработку применять частотой 80 герц. По сравнению с образцами, выполненными без вибрационной обработки уменьшение деформаций достигает 30%. При этом обеспечивается собираемость при монтаже без применения дополнительных воздействий.

При сварке нержавеющей сталей по предложенному методу TIG присадочные прутки должны храниться в чистом помещении в условиях, исключающих загрязнение их поверхности маслом и наждачной пылью. Прутки применять производства АО "НПО Союзнихром". Компания расположена в Москве. Предприятие изготовитель поставляет прутки в картонных тубусах. Общий вес прутков в тубусе составляет 5 кг. Перед запуском в работу производится входной контроль прутков. Выполняется проверка сертификатов и визуальный осмотр поверхности прутка. При необходимости поверхность прутков очищать от грязи и смазки и обезжиривать ацетоном или уайт-спиритом.

Следует выполнять входной контроль защитного газа. Проверять наличие сертификаты от поставщика и наличие ярлыков на баллонах. Перед запуском в производство каждого нового баллона на пластину из коррозионно-стойкой стали наплавляется валик длиной 100 - 200 мм с последующим визуальным контролем. Если в процессе визуального контроля выявлена пористость наплавленного валика – данный баллон в производство запускать нельзя.

При сборке следует обращать внимание на зазоры между свариваемыми кромками и на смещение кромок. Эти величины обычно оговариваются в технологической документации. Уменьшение зазора может привести к

непровару. Смещение одной кромки относительно другой не должно превышать 10% от толщины соединяемых деталей.

Выполнение прихватки является ответственной операцией, влияющей на качество шва. Прихватки распределять равномерно по длине продольного шва обечайки. После выполнения прихватки зачищаются и выполняется их визуальный контроль на наличие дефектов. При наличии дефектов прихватку удаляют механическим способом. При выполнении прихваток сила тока берется меньшей на 10% относительно значений, при сварке продольного шва – 125 А.

При выполнении сварного шва сварочную горелку перемещать справа налево. Подачу присадочной проволоки в сварочную ванну выполнять навстречу движению горелки. Конец присадочной проволоки должен находиться под защитой аргона.

Кратер после окончания выполнения шва следует заварить. Если в применяемом источнике питания нет специальной функции «заварка кратера» то для заварки кратера в него перемещают каплю расплавившейся присадочной проволоки при одновременном удалении горелки до момента погашения дуги.

Нельзя сразу после погашения дуги выключать защитный газ, так как разогретый вольфрам мгновенно окислится, и на его поверхности могут образоваться раковины.

По окончании сварки выполняется 100% визуально-измерительный контроль шва. При необходимости возможно применение лупы 4-7-кратного увеличения и переносного источника света.

С учетом ответственности выполняемых сварных соединений и необходимости герметичности получаемого сварного шва применяется еще и капиллярный контроль согласно ГОСТ 18442-80, 100%.

Предложенный способ сварки нержавеющей стали – неплавящимся электродом в защитном газе (TIG) предусматривает, что сварочная дуга горит между изделием и неплавящимся электродом. Одно из требований к неплавящемуся

электроду – исключение попадания материала электрода в сварной шов. Поэтому материал, из которого изготовлен неплавящийся электрод, должен обладать высокой температурой кипения. Температура плавления вольфрама составляет 3422°C. По температуре плавления уступает лишь углероду, с той поправкой, что углерод не плавится, а возгоняется. Температура кипения 5555°C самая высокая среди исследованных элементов таблицы Менделеева. Попытки замены вольфрама другим, более дешевым материалом пока не увенчались успехом.

Поэтому, в основном, неплавящиеся электроды изготавливают из вольфрама. Реже применяют графит.

Неплавящиеся вольфрамовые электроды предпочтительно применять с добавками тория, оксида иттрия, лантана. Важным преимуществом для нашего случая является легкость зажигания дуги и стабильность ее горения. Неплавящиеся электроды применим WL диаметром 2 мм. Лантанированные электроды хорошо работают на низких, средних и больших токах, а также требуют на 10–15% меньшую силу тока для обеспечения поджига дуги. Кроме того, по сравнению с торированными они не радиоактивны. Стойкость лантанированного вольфрамового электрода превосходит торированные и церированные. Лантанированные электроды обозначают ЭВЛ.

Диаметр неплавящегося электрода для толщины соединяемого металла 3 мм принимаем 2,0-3,0 мм.

## Заключение

Цель магистерской диссертации - повышение качества вытяжных труб путем снижения деформаций на этапе сварки обечаек. В процессе выполнения работы была изучена литература касающаяся сварки нержавеющей сталей и способов уменьшения остаточных деформаций сварных соединений. Изучены научные статьи отечественных и зарубежных авторов, касающиеся способам уменьшения остаточных деформаций и в особенности связанные с исследованиями в области таких способов снижения остаточных деформаций как ударная ультразвуковая обработка сварных швов и вибрационная обработка в процессе сварки и после сварки. Также произведен поиск патентов в России и за рубежом по теме уменьшения сварочных деформаций и напряжений.

По результатам анализа литературных и патентных источников выявлены варианты снижения величины остаточных деформаций, хотя и обеспечивающие величину снижения меньшую, чем при термообработке, но в плане технико-экономических показателей значительно более эффективные.

Разработана методика определения эффективности снижения величины остаточных напряжений при вибрационной обработке. В результате выполненных исследований были получены данные, что наибольшая величина снижения напряжений обеспечивается при частоте виброколебаний 80 герц.

Таким образом, результаты данной магистерской диссертации могут использоваться на сварочных производствах для повышения точности изготавливаемых сварных узлов. Это безусловно окажет положительный экономический эффект, что немаловажно в нынешней непростой экономической ситуации. Также данное исследование позволит в некоторых случаях сократить количество сварных точек на изделие без потери итоговой прочности, что ускорит производительность труда, увеличит объем выпускаемой продукции, а также снизит энергозатраты. Для автомобильной промышленности это имеет особое значение, так как при сварке кузова производится несколько тысяч сварных точек.

Задачи, поставленные в начале обучения по программе магистратуры при планировании магистерской диссертации выполнены. Литература (книги, учебники, научные статьи, патенты) по уменьшению величины остаточных напряжений изучены, спланирован и впоследствии проведен эксперимент, данные, полученные в ходе эксперимента проанализированы. Выводы представлены в магистерской диссертации.

Цель достигнута.

.

### Список используемых источников

1. Сагалевич, В. М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений / В.М. Сагалевич. – М.: Машиностроение, 1974. – 248 с.
2. Вагапов, И.К. Исследование влияния ультразвуковой ударной обработки на значение и распределение напряжений в сварной заготовке / И.К. Вагапов, М.М. Ганиев, А.С. Шинкарев // Авиационная техника. – 2005. – №2. – С. 56-59.
3. Васильев, Д.М. Методика рентгенографического измерения напряжения / Д.М. Васильев // Заводская лаборатория. – 1965. – № 8. – С. 972-978.
4. Винокуров, В.А. Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений / В.А. Винокуров // –М. : Машиностроение, 1973. – 213 с.
5. Казаков, Ю.В. Магистерская диссертация: учебно-методическое пособие по выполнению выпускной квалификационной работы / Ю.В. Казаков. – Тольятти, ТГУ, 2017. – 60 с.
6. Винокуров, В.А. Григорьянц, А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений / Винокуров В.А. Григорьянц А.Г. // –М. : Машиностроение, 1984. – 284 с.
7. Махненко, В.И. Остаточные сварочные напряжения в зоне кольцевых сварных стыков трубопроводов из аустенитной стали / В.И. Махненко, Е.А. Великоиваненко, В.М. Шекер В.М. // Автоматическая сварка. –1998. –№11. –С.32-39.
8. Корольков, П.М. Термическая обработка сварных соединений трубопроводов и аппаратов, работающих под давлением / П.М. Корольков. – М. : Стройиздат, 1982. – 136 с.
9. Каменская, Н.И. Антонов, А.А. Влияние технологии монтажной сварки на уровень остаточных напряжений в сварных соединениях труб из стали 12Х1МФ / Н.И. Каменская, А.А. Антонов // Автоматическая сварка. – 1992. – № 7-8. – С.10-12.

10. Зарипов, М.З. Исследование влияния вибрационных и ультразвуковых колебаний в процессе сварки на свойства сварных соединений нефтегазового оборудования из стали 12Х18Н10Т / Зарипов М.З. Ибрагимов И.Г. Ризванов Р.Г. [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2010. – №2.
11. Винокуров, В.А. Сварочные деформации и напряжения. –М. : Машиностроение, 1968. – 236 с.
12. Вишняков, Я.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах / Вишняков, Я.Д. Пискарев, В.Д. // –М.: Металлургия, 1989. –254 с.
13. Андреев, В.В. Ультразвуковая ударная обработка, как метод повышения долговечности сварных соединений / В.В. Андреев // Оборудование. – 2006. – № 3. – С. 32-33.
14. Каспарова, О.В. Новые представления о механизме межкристаллитной коррозии нержавеющей сталей / О.В. Каспарова, Ю.В. Балдохин // Защита металлов. – 2007. – том 43. - №3. – С. 256-261.
15. Ковалев, И.М. Некоторые особенности формирования сварных соединений при сварке с неплавящимся катодом / И.М. Ковалев // Сварочное производство. - 1972.- № 10. - С. 12 - 14.
16. Размышляев, А.Д. Влияние продольного магнитного поля на характеристики дуги при сварке неплавящимся электродом в аргоне / А.Д. Размышляев, М.В. Миронова // Автоматическая сварка. - 2008. - № 3. - С. 21 - 25.
17. Селяненок, В.Н. Зависимость давления сварочной дуги от параметров вольфрамового электрода / В.Н. Селяненок, В.В. Степанов, Р.З. Сайфиев // Сварочное производство. - 1980. - № 5. - С. 5 - 7.
18. Пашков, Ю.И. Остаточные сварочные напряжения и пути снижения стресс-коррозионных разрушений магистральных газопроводов / Пашков, Ю.И. Иванов, М.А. Губайдулин, Р.Г. // Вестник ЮУрГУ. – 2012. – №5. – С. 28-30.
19. Петушков, В.Г. Обработка взрывом сварных соединений металлоконструкций / Петушков, В.Г. Кудинов, В.М. Фадеенко, Ю.И. - М.: Металлургия, 1993. – 160 с.



20. Shaikh S.N. Vibratory Residual Stress Relieving- A Review // Journal of Mechanical & Civil Engineering, 2016. № 3. P. 01–04.
21. Пономарев К.Е. К вопросу применения вибрационной обработки сварных конструкций космических аппаратов для повышения точности и размерной стабильности. Обзор / Пономарев К.Е., Стрельников И.В. // Вестник НПО им. С.А.Лавочкина, 2017. № 4 (38). С. 89–95.
22. Sedec P. Vibration treatment—effective method of improving the dimensional stability of welded structures: investigation and practice // Welding and Surfacing, 1997. Vol. 8. P. 221–228.
23. Jose M.J., Kumar S.S., Sharma A. Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds // Science and Technology of Welding & Joining, August 2015. P. 45–49.
24. Govindarao P. et al. Affect of Vibratory Welding Process to Improve the Mechanical Properties of Butt Welded Joints // International Journal of Modern Engineering Research, 2012. Vol. 2, issue 4. P. 2766–2770.
25. Ризванов Р.Г., Файрушин А.М., Каретников Д.В. Влияние параметров вибрационной обработки в процессе сварки на свойства сварных соединений / Ризванов Р.Г., Файрушин А.М., Каретников Д.В. // Литье и металлургия, 2012. № 3. С. 337–342.
26. Жданов И.М., Дыхно С.Л. и др. Релаксация напряжений в тонколистовых сварных соединениях сплава АМгб / Жданов И.М., Дыхно С.Л. [и др.] // Автоматическая сварка, 1986. № 4. С. 35–38.
27. Колесников, Я.А. Влияние направления приложения вибрационного воздействия в процессе сварки на поле остаточных напряжений в стыковом сварном соединении / Колесников Я.А., Ризванов Р.Г., Файрушин А.М. // Нефтегазовое дело, 2006. С. 72–74.
28. Ризванов Р.Г. Исследование влияния вибрационной обработки на механические свойства и трещиностойкость сварных соединений труб из жаропрочной стали 15Х5М Ризванов Р.Г., Файрушин А.М., Каретников Д.В. // Нефтегазовое дело, 2013. № 1. С. 369–382.

29. Гиренко, В.С. Влияние остаточных напряжений и деформационного старения на сопротивляемость стали образованию хрупких трещин / Гиренко В.С. Котенко Э.В. // Автоматическая сварка. – 1968. – № 2. – С. 34-37.
30. Голиков, Н.И. Перераспределение остаточных сварочных напряжений при ультразвуковой ударной обработке сварных соединений стыков труб / Голиков Н.И. Сидоров М.М. // Сварочное производство. – 2011. – № 5. – С. 3-6.
31. Голиков, Н.И. Влияние ультразвуковой ударной обработки на ударную вязкость сварных соединений стыков труб, изготовленных из сталей 09Г2С и 13Г1С-У / Голиков Н.И. Сидоров М.М. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 7. – С. 3-6.
32. Голиков, Н. И. Исследование перераспределений остаточных напряжений при циклическом нагружении сварных соединений / Голиков Н. И. Сидоров М.М. // Сварочное производство. – 2013. – № 12. – С. 18-20.
33. Антонов, А.А. Исследование технологических остаточных напряжений в сварных соединениях магистральных трубопроводах / А.А. Антонов, О.И. Стеклов [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – № 3. – С.13-19.
34. Косинцев В.И. Основы проектирования химических производств и оборудования / В.И. Косинцев [и др.] – Томск: Томский политехнический университет, 2013. – 395 с.
35. Файрушин А.М. Совершенствование технологического процесса изготовления корпусов аппаратов с применением вибрационной обработки. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Уфа, 2003.
36. Цветков А.С. Повышение надежности крупногабаритных сварных хладостойких конструкций ответственного назначения за счет снижению уровня остаточных напряжений. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербург, 2011.

37. Арефьев И.В. Снижение остаточных напряжений в восстановленных наплавкой конструкциях из низкоуглеродистых сталей электродуговой обработкой. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Волгоград, 2011.
38. Лихобабина Е.А. Прогнозирование остаточных сварочных напряжений и деформаций на стадии проектирования судового корпуса. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Владивосток, 2002.
39. Аммосов, А.П. Яковлева, С.П. Голиков, Н.И. [и др.] Перераспределение остаточных напряжений при взрывной обработке кольцевых сварных соединений магистрального трубопровода / А.П. Аммосов, С.П. Яковлева, Н.И. Голиков [и др.] // Сварочное производство. –1997. – № 1. – С. 13-15.
40. Арафьев, И.В. Влияние параметров ручной дуговой наплавки на остаточные сварочные напряжения, механические свойства наплавленного металла и околошовной зоны / И.В. Арафьев, И.Л. Пермяков [и др.] // Известия ВолгГТУ. – 2008. – № 2. – С. 77-80.
41. Бабаев, А.В. Влияние остаточных напряжений на зарождение и скорость развития усталостных трещин в сварных соединениях с непроварами / А.В. Бабаев // Автоматическая сварка. – 1977. – № 12. – С. 30-32.
42. Безбородов, В.П. Клименов, В.А. Плешанов, В.С. [и др.]. Влияние
43. ультразвуковой ударной обработки на структуру и свойства сварных
44. соединений теплостойкости стали 12Х1МФ / В.П. Безбородов, В.А. Клименов, В.С. Плешанов [и др.]. // Сварочное производство. – 2000. – № 7. – С. 17-21.
45. Степнов, М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник / М. Н.Степнов. М. : Машиностроение, 1985.- 231 с.
46. Тихонов, А. Н. Статистическая обработка результатов экспериментов / А. Н. Тихонов, М. В. Уфимцев. М. : Изд-во МГУ, 1988. - 174 с.

47. Алешин, Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений / Н.П. Алешин. - М.: Машиностроение, 2006. - 368 с.
48. Алешин, Н.П. Контроль качества сварочных работ / Н.П. Алешин, В.Г. Щербинский В.Г. - М.: Высшая школа, 1986. - 167 с.
49. Матвеев, Ю.М. Теоретические основы производства сварных труб / Ю.М. Матвеев. - М.: Metallurgy, 1967. - 169 с.
50. Щербинский, В.Г., Алешин Н.П. Ультразвуковой контроль сварных соединений / В.Г. Щербинский, Н.П. Алешин. - М.: изд. МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. - 496 с.
51. Троицкий, В.А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений / В.А. Троицкий. ИЭС им. Е.О. Патона НАЛ Украины. - 1997. - 224 с.
52. Кирияков, В.Ф. О применении пьезопреобразователя с наклонным дном иммерсионной камеры / В.Ф. Кирияков // Дефектоскопия. 1976. № 4. С. 96 - 104.
53. Гуревич, А.К. Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений / А.К. Гуревич. - Киев: Укртехиздат, 1963. - 152 с.
54. Бирилло, И.Н. Оценка прочностного ресурса газопроводных труб с коррозионными повреждениями / И.Н. Бирилло, А.Я. Яковлев, Ю.А. Теплинский и др. – М. : ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. – 168 с.
- 55.
56. Bruce, W.A., Amend W.E. Advantages of Steel Sleeves over Composite / W.A. Bruce, W.E. Amend. Materials for Pipeline Repair, Evaluation, Rehabilitation & Repair of Pipelines, Clarion Technical Conferences and Tiratsoo Technical. Berlin. October 20–21, 2010.
57. Петров, С.В. Оценка изменений механических характеристик металла длительно эксплуатируемых трубопроводов, работающих в различных условиях прокладки / С.В. Петров, А.В. Комаров, А.С. Кузьбожев // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2009. – № 5. – С. 34–39.
58. Тихонов, А. Н. Статистическая обработка результатов экспериментов / А. Н. Тихонов, М. В. Уфимцев. М. : Изд-во МГУ, 1988. - 174 с.

59. Смирнов, О.В. Применение электронной микроскопии в исследованиях деформационного старения материала трубопроводов / О.В. Смирнов, А.С. Кузьбожев, Р.В. Агинец // Заводская лаборатория. Диагностика материалов – 2007. – №10. – С. 37-41.
60. Смирнов, О.В. Опыт применения рентгеноструктурного анализа в исследованиях металла трубопроводов / О.В. Смирнов, А.С. Кузьбожев, Р.В. Агинец // Заводская лаборатория. Диагностика материалов – 2007. – №11. – С. 41-42.
61. Рудзей, Г. Ф. Особенности статистической обработки результатов усталостных испытаний / Г. Ф. Рудзей // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2004. - Т. 70, №1. - С. 66-70.
62. Платонов, А.Н. Осесимметричная задача напряженно-деформированного состояния восстановленного участка трубопровода // Изв. ву-зов. Нефть и газ. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – №4. – С. 81–85.
63. Зандберг, А. С. Напряжения в сварных соединениях и ремонтных конструкциях магистральных трубопроводов / А.С. Зандберг. М.: НИПКЦ Восход-А, 2008. 216 с.
64. Ильященко Д.П. Влияние энергетических характеристик инверторного источника питания на химический состав и микроструктуру сварного шва из стали 12Х18Н10Т // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013 – №. 4. – С. 178–180.
65. Национальный институт авиационных технологий. Производственная инструкция Дуговая сварка в среде защитных газов конструкционных, нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов – М.:2000-134с.
66. Кусков В.Н., Мамадалиев Р.А., Обухов А.Г. Переход легирующих элементов в наплавленный металл при сварке стали 12Х18Н10Т // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 11 (9). – С. 1794–1797.
67. Чиркин В. С. Теплопроводность промышленных материалов. М., Маш- гиз, 1962. 248 с.

68. Петров А. В., Славин Г. А., Вербицкий В. Г. Исследование тепловой эффективности процесса сварки сжатой дугой тонколистового материала. «Сварочное производство», 1967, № 2, с. 6—8.
69. Д. А. Дудко, Б. И. Шнайдер, Р. Ю. Тухметов, В. Г. Вербицкий, М. И. Ланда, Р. М. Тимашев. Повышение эффективности газовой защиты сварочных горелок. — «Автоматическая сварка», 1974, № 9, с. 47—49.
70. Б. И. Шнайдер, Ю.Е.Сергеев, В. Г. Вербицкий, А. Л. Гецонок, Г. Х. Яковлев. Регулирование процесса автоматической аргодуговой сварки воль-фраммовым электродом тонколистовых изделий с криволинейным контуром.— «Автоматическая сварка», 1970, № 12, с. 15—18.
71. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М., Машгиз, 1951. 296 с.
72. Сергеев Ю. Е., Бабков Г. Г. Система автоматического регулирования длины непрерывно горящей дуги. — В кн.: Разработка и внедрение прогрессивных методов сварки и изготовления сварных изделий на предприятиях машиностроения. Тезисы докладов научно-технической конференции. Омск. 1973, с. 41—44.