

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический

Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Кафедра Электроэнергетических систем (ЭЭС)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Использование электрических разрядов для снятия внутренних напряжений в сварных трубах УДК 621.774.2:539.3:537.52

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ5А	Покопцев Антон Олегович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭЭС	Филатов Г.П.	к.т.н		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры Менеджмента	Грахова Е.А.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Дашковский А.Г.	к.т.н		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭЭС	Сулайманов А.О.	к.т.н		

Томск – 2017 г.

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Универсальные компетенции</i>	
P1	<i>Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.</i>
P2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.</i>
P3	<i>Использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.</i>
P4	<i>Использовать представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.</i>
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P5	<i>Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.</i>
P6	<i>Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.</i>

Планируемые результаты обучения

P7	<i>Выполнять инженерные проекты с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.</i>
P8	<i>Проводить инновационные инженерные исследования в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.</i>
P9	<i>Проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.</i>
P10	<i>Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.</i>
P11	<i>Осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.</i>
P12	<i>Разрабатывать рабочую проектную и научно-техническую документацию в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять оперативную документацию, предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.</i>

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический

Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Кафедра Электроэнергетических систем (ЭЭС)

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой ЭЭС

_____ Сулайманов А. О.

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5AM5A	Покопцеву Антону Олеговичу

Тема работы:

Исследование электрической прочности вспененных материалов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№593/с от 03.02.2017 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	27.05.17
--	----------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Материалы преддипломной практики. Физические свойства исследуемых материалов.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Выявление зависимости снятия внутренних напряжений в сварных трубах от количества поданных высоковольтных импульсов; 2. Определение путей повышения эффективности метода.
Перечень графического материала	Демонстрационный материал (презентация в MS Power Point)

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Грахова Е.А.
Социальная ответственность	Дашковский А.Г.
Приложение А	Воробьева В. В.

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Introduction
1. Experimental
1.1. Fundamental Physical Process
1.2. Experimental Equipment
1.3. Experimental Scheme
2. Pulse Discharge Characteristics in Water
3. Pressure Characteristics and Attenuation Law of Shock Waves
3.1 Pressure Characteristics of Shock Waves
3.1.1 Influence of Breakdown Energy (E_b) on Shock-Wave Pressure Characteristics
3.1.2 Influence of Hydrostatic Pressure (P_w) on Shock-Wave Pressure Characteristics
3.2 Attenuation Law of Shock Waves during Propagation
Conclusions

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.02.2017
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭЭС	Филатов Г.П.	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ5А	Покопцев Антон Олегович		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт – Энергетический

Направление подготовки – 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»

Уровень образования – Магистратура

Кафедра – «Электроэнергетических систем»

Период выполнения осенний / весенний семестр 2016/2017 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

27.05.17

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.02.16	Обзор отечественной литературы	15
10.02.17	Методика проведения исследований	25
01.04.17	Анализ результатов	5
10.05.17	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
05.05.17	Социальная ответственность	20
16.05.17	Заключение	5
19.05.16	Раздел ВКР, выполненный на иностранном языке	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭЭС	Филатов Г.П.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭЭС	Сулайманов А. О.	к.т.н.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ5А	Покопцев Антон Олегович

Институт	ЭНИН	Кафедра	Электроэнергетических систем
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	- Стоимость материальных ресурсов определялась средней стоимости по г. Томску - Оклады в соответствии с окладами сотрудников НТПУ
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	-В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирован расхода материалов» и ГОСТ Р 51541- «Энергосбережение Энергетическая эффективность»
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	-Согласно п.3 п.п.16 ст. 149 НК РФ данный проект подлежит налогообложению - Отчисления во внебюджетные фонды – 27,1 % ФОТ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения исследовательской работы</i>	-Технико-экономическое обоснование научн исследовательской работы - SWOT-анализ
<i>2. Планирование процесса управления НИР: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Планирование работ по проекту: - Определение структуры работ; - Определение трудоёмкости работ; - Разработка линейного графика; Расчет бюджета затрат на НТП - Расчет бюджета затрат на реализацию проекта
<i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Оценка ресурсной эффективности

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

- «Портрет» потребителя проекта
 - Матрица SWOT
- Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности проекта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, зван	Подпись	Дата
Ассистент кафедры менеджмента	Грахова Елена Александровна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ5А	Покопцев Антон Олегович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5AM5A	Покопцев Антон Олегович

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭЭС
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	13.04.02 электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Исследовательская работа проводится в лабораторном кабинете. Работа осуществляется на высоковольтной импульсной установке.
2. Отбор законодательных и нормативных документов по теме.	ГОСТ 12.1.004-91, СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, СН 2.2.4/2.1.8.562–96, СН 2.2.4/2.1.8.556–96, ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" от 22.07.2008 N 123-ФЗ.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности	<ul style="list-style-type: none"> – Освещенность лаборатории; – Шум от установки и ПК; – Микроклимат в лаборатории; – Электромагнитное поле от электроустановок.
2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности	– Электробезопасность
3. Экологическая безопасность:	– Разработка решений по обеспечению экологической безопасности
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– Пожаробезопасность
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	– Социальное страхование работников

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Дашковский Анатолий Григорьевич	Кандидат технических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM5A	Покопцев Антон Олегович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа, состоящая из 90 страниц, 20 рисунков, 13 таблиц, 51 источников, 4 приложения.

Ключевые слова – Электрический разряд, ударная волна, высоковольтный разряд, электрический пробой, внутренние напряжения, сварные трубы.

Объектом исследования является сварная труба.

Цель работы – получение экспериментальных данных по снятию внутренних напряжений в сварных трубах, путём электрогидроимпульсной обработки.

Метод проведения исследования и аппаратура – определение внутренних напряжений в сварной трубе осуществлялось, путём измерения зазора разрезанного, по сварному шву, кольца трубы. Чем выше внутреннее напряжение в трубе, тем больше зазор разреза. В качестве аппаратуры для исследования используется высоковольтная испытательная установка.

Научная или практическая новизна – в данной работе было представлено практическое применение/использование импульсных электрических разрядов для снятия внутренних напряжений в сварных трубах.

Область применения – полученные результаты магистерской диссертации предоставляют возможность применения данной методики на промышленных предприятиях по изготовлению сварных труб. Полученные в работе практические результаты позволяют их использовать для научных и исследовательских целей.

Экономическая эффективность или значимость работы – Определяется в повышении качества продукции выпускаемой промышленными предприятиями, а также долговечности сварных труб.

Введение.....	4
1 Литературный обзор	5
1.1 Остаточные механические напряжения и причины их появления.....	5
1.2 Термические методы снижения остаточных напряжений.....	10
1.3 Вибрационный метод снятия внутренних остаточных напряжений в сварных конструкциях.....	19
1.4 Электрогидроимпульсный метода снятия внутренних напряжений в сварных конструкциях.....	33
1.5 Характеристики канала разряда в жидкости	36
2 Технические средства и методика проведения исследований.....	40
2.1 Устройство и работа установки для электрогидроимпульсного воздействия на трубы.....	40
2.2 Рабочая камера, система электродов для воздействия на трубы, устройство для фиксации труб.....	42
2.3 Объект исследования.....	44
2.4 Методика проведения эксперимента.....	44
2.5 Методика оценки напряженного состояния труб.....	47
2.6 Методика испытания труб на прочность.....	49
3 Результаты экспериментальных исследований.....	50
3.1 Пути повышения эффективности электрогидроимпульсной обработки.....	55
4 Техничко-экономический расчёт.....	58
5 Безопасность жизнедеятельности.....	74
Заключение.....	86
Список литературы.....	88
Приложение А	
Приложение Б	
Приложение В	
Приложение Г	

Введение

В процессе сварки конструкции в ней возникают напряжения в результате неравномерных объемных изменений, вызванных неодинаковым нагревом основного и наплавленного металлов, усадкой расплавленного металла после сварки, структурными изменениями металла из-за быстрого охлаждения, жестким закреплением деталей или изделия в ходе их изготовления. Появление указанных напряжений в сварном соединении может обуславливаться также и изменением растворимости газов, окружающих сварной шов при охлаждении. Эти напряжения в отличие от напряжений, действующих на конструкцию во время ее эксплуатации и вызываемых внешними силами, называют внутренними или остаточными сварочными напряжениями. Внутренние напряжения могут вызвать не только деформацию сварного изделия, но и его разрушение. Величина остаточных сварочных напряжений может достигать предела текучести и даже превосходить его.

Остаточные сварочные напряжения оказывают различное влияние на прочность сварных конструкций в зависимости от вида действующей на них нагрузки, а также от величины и характера распределения этих напряжений. При статической нагрузке остаточные напряжения не оказывают влияния на прочность конструкций только в тех случаях, когда металл сохраняет способность пластически деформироваться. Особенно сильно проявляется действие остаточных напряжений в условиях, способствующих возникновению хрупкого разрушения сварного соединения. Хрупкое разрушение происходит в результате неблагоприятного сочетания трех факторов: концентрации напряжений, остаточных напряжений и температуры.

Целью данного научно-технического исследования является получение экспериментальных данных по снятию внутренних напряжений в сварных трубах, путём электрогидроимпульсной обработки.

1 Литературный обзор

1.1 Остаточные механические напряжения и причины их появления

В результате местного (неравномерного) нагрева металла, обусловленного воздействием концентрированного источника теплоты, в сварной конструкции возникают временные и остаточные сварочные напряжения. Временные сварочные напряжения наблюдаются только в определенный момент сварки в процессе изменения температуры. Напряжения, существующие после окончания сварки конструкции и полного ее остывания, называют остаточными сварочными напряжениями или сварочными напряжениями. Они возникают в результате затруднений расширения и сжатия металла при его нагреве и остывании. Затрудненность расширения и сжатия металла обусловлена тем, что нагретый участок со всех сторон окружен холодным металлом, размеры которого не претерпевают никаких изменений. Реактивные остаточные напряжения возникают в связи с дополнительным закреплением свариваемых деталей (в приспособлении, при жестком закреплении и т. п.), также препятствующим нормальному протеканию процессов расширения и сжатия. Реактивные напряжения характеризуются неуравновешенной эпюрой напряжений.

Структурные напряжения возникают в конструкции вследствие структурных превращений участков металла околошовной зоны, нагретых в процессе сварки до температуры выше критических точек. Значительные по величине структурные напряжения возникают при сварке закаливающих сталей, при охлаждении которых после сварки в околошовной зоне образуются мартенситные, имеющие наибольший удельный объем, структуры.

Различают сварочные напряжения трех родов. В сварных конструкциях из низкоуглеродистых и низколегированных сталей в основном развиваются сварочные напряжения первого рода. Они действуют и уравниваются в значительных, соизмеримых с размерами конструкции или отдельных ее деталей, объемах. При

определенных условиях возможно возникновение сварочных напряжений второго и третьего родов — действующих и уравнивающихся в пределах отдельных зерен металла.

В зависимости от пространственного расположения и взаимодействия различают сварочные напряжения: линейные или одноосные, действующие только по одной оси в одном направлении (рисунок 1, а), плоскостные или двухосные, действующие в двух направлениях (рисунок 1, б), и объемные или трехосные, действующие в трех направлениях (рисунок 1, в). По направлению действия различают продольные и расположенные поперек оси шва линейные сварочные напряжения (рисунок 2).

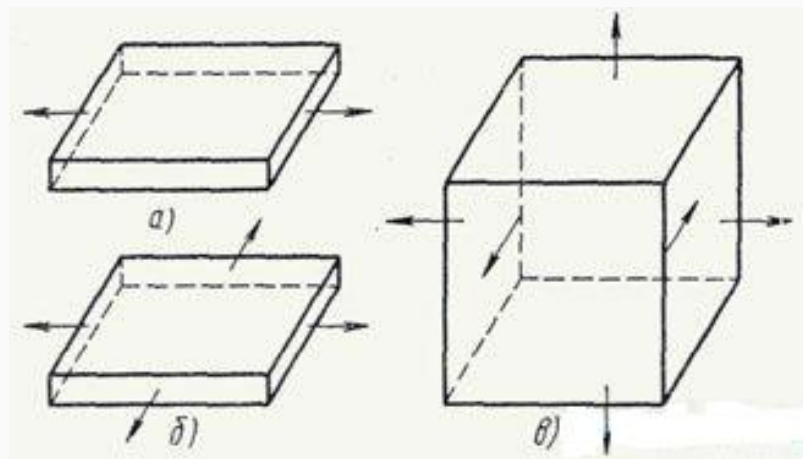


Рисунок 1 – Различные виды напряженного состояния; напряжения: а - линейные; б - плоскостные; в - объемные сварочные [1]

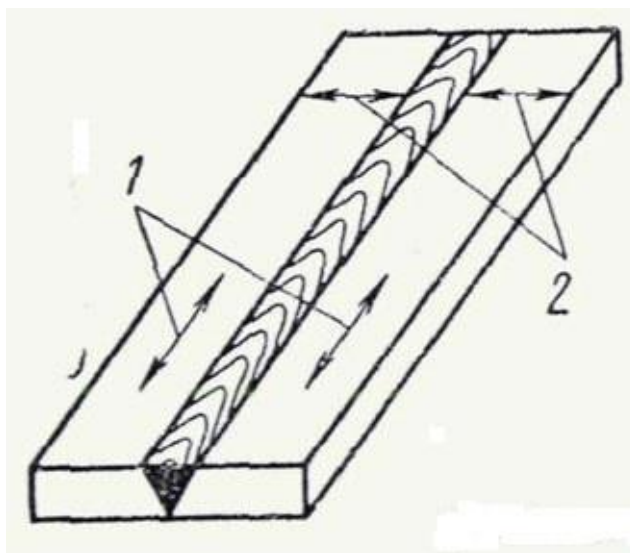


Рисунок – 2. Продольные (1) и поперечные (2) напряжения в сварном соединении [2]

Практика эксплуатации сварных конструкций показывает, что в большинстве случаев сварочные напряжения не снижают несущей способности конструкций. По вопросу о влиянии, оказываемом сварочными напряжениями на работоспособность сварной конструкции, нет единого мнения. Большинство исследователей приходит к выводу о том, что линейные сварочные напряжения не снижают прочности сварных конструкций ни при одном из видов нагрузок (статической, вибрационной, ударной), если металл, из которого изготовлена конструкция, в процессе ее эксплуатации находится в пластическом состоянии. Однако, если металл находится в хрупком состоянии, т. е. не способен к пластическому деформированию, наличие даже линейных сварочных напряжений может привести к снижению несущей способности конструкции.

Даже такой пластичный металл, как низкоуглеродистая сталь, при определенных условиях (низкая температура, резкая концентрация напряжений, наличие дефектов) может находиться в хрупком состоянии. Недостаточно ясно также влияние на прочность конструкции сварочных напряжений с плоскостным и объемным характером распределения. Большинство исследователей считают, что и при этом не происходит снижения прочности конструкции при статической (в чистом виде) нагрузке и пластичном состоянии металла.

Технологию сварки и сборки конструкции следует разрабатывать с учетом обеспечения минимальной величины сварочных напряжений, и там, где это диктуется условиями работы конструкции, предусматривать снятие этих напряжений. При этом следует учитывать, что снятие сварочных напряжений — весьма трудоемкая и сложная операция, и к ней следует прибегать только при действительной, технически обоснованной необходимости. Если значения сварочных напряжений достигнут предела текучести металла, они вызовут его пластическую деформацию, а следовательно, и изменения размеров и формы свариваемой конструкции, т. е. ее деформацию (коробление).

Возникающие при сварке деформации разделяют на временные, существующие только во время сварки конструкции, и остаточные, остающиеся после завершения сварки и остывания конструкции. Важное значение для практики имеют остаточные сварочные деформации. В зависимости от характера, формы и размеров свариваемых деталей различают деформацию в плоскости и деформацию из плоскости соединяемых элементов. Деформация в плоскости проявляется в изменении (уменьшении) размеров конструкции, с чем необходимо считаться при заготовке деталей и сборке под сварку, предусматривая припуск на изменение размеров.

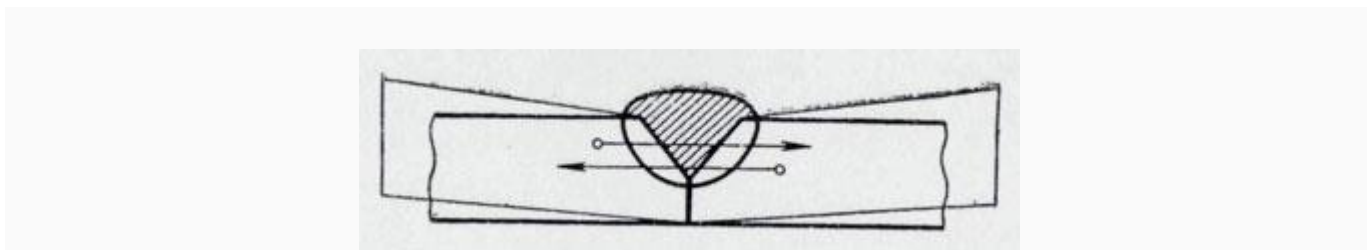


Рисунок – 3. Угловая деформация при сварке стыкового соединения [2]

Деформация из плоскости (угловая деформация) проявляется в образовании выпучин, местном изгибе листов (рисунок 3), в так называемом грибовидном изгибе пояса при сварке элементов тавровых и двутавровых сечений (рисунок 4), а также в других изменениях формы изделий. Величина и характер остаточных деформаций в

значительной степени определяются толщиной и свойствами основного металла, режимом сварки, последовательностью наложения швов, конструктивными формами свариваемых деталей и формой шва. При увеличении толщины свариваемого металла деформации снижаются, что связано с большей жесткостью конструкции.

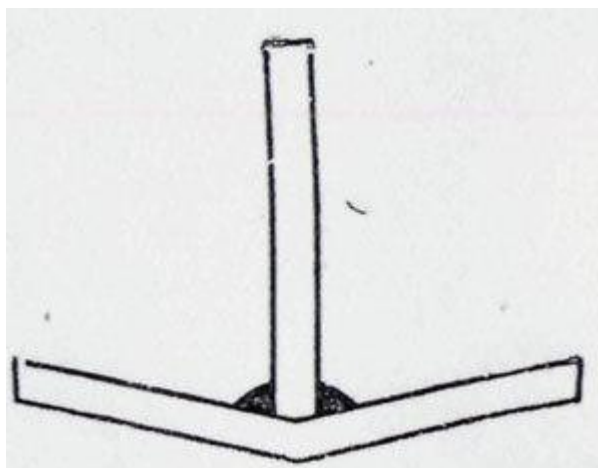


Рисунок – 4. Угловая деформация (грибовидность) при сварке таврового соединения [1]

Существенное влияние на величину деформации оказывает значение коэффициента линейного расширения металла. При повышении коэффициента линейного расширения величина остаточных деформаций увеличивается, например при сварке конструкций из высоколегированных нержавеющей сталей, что значительно затрудняет сварку металлоконструкций и изделий из этого металла. Опыт эксплуатации показал, что в стальных конструкциях, в которых не возникают структурные напряжения, в большинстве случаев величина и характер остаточных деформаций с течением времени почти не изменяется. В конструкциях, изготовленных из сталей, при сварке которых возникают структурные напряжения, размеры и формы элемента могут изменяться с течением времени.

Изменение размеров и формы сварной конструкции в некоторых случаях снижает ее работоспособность и портит ее внешний вид. Если остаточные деформации достигают заметной величины они могут привести к неисправимому браку. При разработке, технологии сборки и сварки конструкции следует учитывать необходимость снижения остаточных деформаций до величины, при которой они не

отражаются на работоспособности и внешнем виде конструкции и не затрудняют сборку отдельных элементов. Если величина остаточных деформаций выходит за допустимые пределы, следует проводить правку конструкции. Правка конструкции является весьма трудоемкой операцией, требует высокой квалификации рабочих, и ее так же, как и снятие сварочных напряжений, следует проводить только в случае действительной необходимости.

1.2 Термические методы снижения остаточных напряжений

Влияние термической обработки, в частности отжига, на уровень остаточных напряжений в холоднодеформированных изделиях подробно описано в работе [1], где под отжигом, уменьшающим остаточные напряжения, понимается термическая обработка, при которой главным процессом является полная или частичная релаксация остаточных напряжений.

Остаточные напряжения при отжиге и отпуске уменьшаются двумя путями: вследствие пластической деформации в условиях, когда эти напряжения превышают сопротивление металла деформации, или в результате ползучести при напряжениях меньше предела текучести.

Остаточные напряжения всегда упругие, пропорциональны модулю упругости и величине упругой деформации. При нагреве модуль упругости и, следовательно, остаточные напряжения изменяются незначительно до тех пор, пока напряжения не достигнут уровня сопротивления деформации, которое снижается с ростом температуры. Выше некоторой температуры предел текучести становится ниже остаточных напряжений, развивается пластическая деформация, в результате которой остаточные напряжения уменьшаются до значения предела текучести. До каких пределов могут при нагреве снизиться остаточные напряжения в реальных деформированных твердых телах определить достаточно сложно из-за существенной неоднородности деформированного состояния и, следовательно, поля остаточных напряжений. Автор работы [1] считает, что степень разгрузки тела по остаточным

напряжениям определяется температурой отжига (отпуска), а не его продолжительностью.

В изделиях, в которых остаточные напряжения меньше предела текучести, упругая деформация также может с течением времени переходить в пластическую деформацию. В этом случае ползучесть является единственно возможным механизмом их уменьшения. Медленное пластическое течение осуществляется перемещением ограниченного числа легкоподвижных дислокаций. Их исчерпание на дислокационных барьерах приводит к затуханию ползучести, а уменьшение остаточных напряжений еще более усиливает это затухание. С увеличением продолжительности термической обработки в скольжение вовлекаются менее благоприятно расположенные дислокации.

Таким образом, если нагревать изделие до температуры, при которой предел текучести становится меньше остаточных напряжений, то вначале происходит быстрая разрядка напряжений до предела текучести вследствие массового размножения и скольжения дислокаций, а затем этот механизм пластической деформации сменяется ползучестью, приводящей к постепенной и затухающей во времени релаксации напряжений.

Быстрая разгрузка тела по остаточным напряжениям при повышенных температурах может представлять опасность, поскольку из-за неоднородности напряженного состояния в объеме разгрузка часто приводит к нарушению равновесия внутренних сил и моментов, сопровождающемуся короблением. Рационально проводить отжиг (отпуск) таким образом, когда медленная пластическая деформация нарастает при одновременном и равном уменьшении упругой деформации. При этом линейные размеры в направлении действия сил не изменяются. Чем выше уровень исходных напряжений, тем быстрее в первый период происходит их разрядка и тем больше опасность коробления.

Что касается продолжительности термической обработки, то следует отметить, что определенной температуре в каждом конкретном изделии

соответствует свой конечный уровень остаточных напряжений, по достижению которого увеличивать продолжительность отжига (отпуска) практически бесполезно [1].

На практике уменьшение уровня и перераспределения остаточных напряжений является побочным явлением, сопровождающим разнообразные операции термообработки. Снятие остаточных напряжений проходит одновременно с основными структурными и фазовыми изменениями. Например, при высоком отпуске стали, наряду с основным процессом превращения мартенсита в сорбит, уменьшаются закалочные напряжения. Остаточные напряжения, возникающие при холодной и теплой деформации, уменьшаются при рекристаллизационном отжиге, основной целью которого является снятие наклепа.

Использование отжига для уменьшения напряжений лимитируется теми нежелательными структурными и фазовыми изменениями, которые могут произойти при нагреве. Например, чтобы достаточно полно снять закалочные напряжения в изделиях из термически упрочняемых алюминиевых сплавов, необходимо нагревать их до температур около 230...260 °С. Но при таких температурах в алюминиевых сплавах происходит перестаривание, сопровождающееся снижением прочности. Для полного снятия остаточных макронапряжений после холодной обработки давлением желательно проводить отжиг при таких температурах, при которых протекает рекристаллизация. Но при этом снимается упрочнение от холодной обработки давлением, что во многих случаях недопустимо. Поэтому приходится либо мириться с недостаточно полным снятием остаточных напряжений при низких температурах, либо идти на компромисс, достигая более полного снятия напряжений при некотором ухудшении механических и других свойств.

Скорости нагрева и особенно охлаждения при отжиге должны быть небольшими, чтобы не возникли новые внутренние термические напряжения.

Отжиг для уменьшения остаточных напряжений широко применяют в технике. Он уменьшает вредные остаточные растягивающие напряжения, особенно

опасные при объемном напряженном состоянии, позволяет повысить допустимые внешние нагрузки, повышает сопротивляемость усталости и ударным нагрузкам, снижает склонность к хрупкому разрушению, межкристаллитной коррозии и коррозионную усталость, стабилизирует размеры и предотвращает коробление изделий.

О применении термической обработки для снижения уровня остаточных напряжений говорится в работе [2]. По мнению авторов, для большинства металлов и сплавов остаточные напряжения снимаются при температурах нагрева до 600 °С. Однако полное снятие остаточных напряжений происходит только при температурах рекристаллизации. Режимы термической обработки широко варьируют в зависимости от марки сплава и желаемого результата. Применяют отжиг, нормализацию, закалку с отпуском, либо закалку и нормализацию с последующим отпуском, либо отжиг по сложному температурному режиму.

При выборе режимов термической обработки, с целью снижения или перераспределения остаточных напряжений, следует учитывать, что любые способы охлаждения при термообработке характеризуются новой схемой распределения напряжений, отличной от исходной, после завершения холодной или теплой пластической обработки. Новое распределение остаточных напряжений может благоприятно сказываться на эксплуатационных свойствах металлоизделий. Однако может быть и обратный эффект, что связано с общим разупрочнением металла или со сменой знака остаточных напряжений на поверхности изделия даже при снижении их уровня. Автор книги [3] отмечает важную особенность в образовании остаточных напряжений после интенсивного нагрева. В процессе нагрева создаются температурные напряжения сжатия, превосходящие предел текучести материала. В результате в материале образуется остаточная пластическая деформация сжатия. После охлаждения (тепловой разгрузки) размеры тела возвращаются к прежним, но наличие остаточной деформации сжатия вызывает появление растягивающих остаточных напряжений. Во многих случаях оказывается необходимым учесть специфические объемные изменения в материале, связанные с фазовыми и

структурными превращениями, которые определяются не только температурой, но и другими параметрами процесса, например, временем.

При расчете реальных процессов нагрева и охлаждения следует также иметь в виду, что распределение температуры и температурных напряжений сильно изменяется во времени [3].

В некоторых случаях технологический процесс включает специальную термическую обработку для создания благоприятных остаточных напряжений. Как правило, она заключается в нагреве до невысокой температуры (300...600 °С) с последующим быстрым охлаждением. В процессе охлаждения в поверхностных слоях возникает пластическая деформация растяжения и после выравнивания температурного поля появляются остаточные напряжения сжатия. Сжимающие поверхностные остаточные напряжения возникают при закалке токами высокой частоты.

Аналогичная технология применительно к термической обработке труб (пример насосно-компрессорных по ГОСТ 633–80) предлагается в материалах патента [4]. При термической обработке нагрев труб осуществляется токами высокой плотности (до 15 А/мм²) и охлаждение ее поверхностей охлаждающим агентом. Нагрев стальных труб выполняется до температуры, не превышающей АС1, после этого делается выдержка при этой температуре в течение не более 20 минут, а затем осуществляется охлаждение со скоростью 75...100 °С/с. Для создания регламентированных остаточных напряжений сжатия на внешней поверхности трубы осуществляется охлаждение внутренней поверхности. Для создания таких напряжений на внутренней поверхности охлаждению подвергается наружная поверхность. Подобный режим термической обработки позволяет достичь необходимых температурных перепадов и соответствующих пластических деформаций в макрообъемах по толщине стенок трубы.

При этом, поскольку максимальная температура нагрева не превышает температуру предшествующего отпуска, то обеспечивается сохранение основных

механических свойств. Увеличение плотности тока выше 15 А/мм^2 нецелесообразно с точки зрения энергозатрат при термообработке труб нефтяного сортамента, имеющих фиксированные длину и площадь сечения. Увеличение времени выдержки свыше 20 минут не приводит к существенному возрастанию сжимающих напряжений, но увеличивает энергозатраты. При осуществлении охлаждения со скоростью менее $75 \text{ }^\circ\text{C/с}$ уровень остаточных напряжений изменяется недостаточно и не дает существенного улучшения эксплуатационных свойств труб. Увеличение скорости охлаждения выше 100°C/с не приводит к значительному увеличению уровня остаточных сжимающих напряжений, но может привести к короблению и разрушению труб.

В плане совершенствования технологии термической обработки труб из углеродистых сталей представляет интерес запатентованный способ повышения стойкости труб против коррозионно-механического разрушения путем нагрева электроконтактным способом и охлаждения обеих поверхностей трубы, причем нагрев осуществляется одновременно с охлаждением ее поверхностей [5].

В качестве примера авторы в работе рассмотрели процесс термообработки стальных насосно-компрессорных труб [5]. Трубу, предназначенную для снижения на ее поверхностях остаточных растягивающих напряжений и формирования сжимающих, оснащают на торцах токосъемниками, через которые пропускают ток для нагрева трубы. Охлаждение поверхностей стенок трубы может осуществляться одновременно с нагревом естественной конвекцией окружающей среды или принудительной (искусственной) конвекцией жидкого или газообразного охлаждающего агента. Таким образом, осуществляется нагрев трубы и одновременное охлаждение со стороны поверхностей.

Труба разогревается из внутреннего объема стенок в направлениях к внутренней и наружной поверхностям. При этом возникающие температурные поля по толщине стенки трубы характеризуются более высокой температурой внутренних объемов (не имеющих возможности конвективного теплообмена с окружающей средой) по сравнению с приповерхностными объемами. Различия в температурах по

толщине стенок приводит к различным продольным и тангенциальным температурным удлинениям в объемах по толщине стенок трубы.

Это обстоятельство и является причиной возникновения различных по знаку и величине напряжений, вызывающих деформации в микрообъемах. Для сохранения неизменными основных прочностных характеристик (предел прочности и предел текучести) максимальная температура нагрева трубы не должна вызывать изменений в кристаллической решетке стали, т. е. не должна превышать максимально возможной температуры высокого отпуска для материала конкретных труб.

Другими обстоятельствами, оказывающими влияние на величину и знаки остаточных напряжений, являются интенсивность нагрева за счёт протекания электрического тока и интенсивность охлаждения. После охлаждения труб, т. е. после выравнивания температур по толщине стенок, произошедшие во время нагрева с одновременным охлаждением поверхностей остаточные деформации в микрообъемах вызовут снижение величины остаточных растягивающих и появление остаточных сжимающих напряжений со стороны поверхностей стенок труб. При этом во внутренних объемах по толщине стенок труб для уравнивания приповерхностных сжимающих напряжений появятся остаточные напряжения растяжения.

Формирование благоприятного распределения остаточных напряжений в стенке трубы термической обработкой описано в работе [6]. Рассматривается метод термической обработки трубы, при котором охлаждающая вода прокачивается через трубу при нагреве наружной поверхности трубы индукционным или электроконтактным способом с целью создания разности температур между наружной и внутренней поверхностями таким образом, чтобы внутренняя поверхность трубы могла быть пластичной при растяжении или наружная поверхность могла быть пластичной при сжатии, создавая таким образом остаточные сжимающие напряжения и остаточные растягивающие напряжения на внутренней и наружной поверхностях трубы соответственно. В патенте дается следующее объяснение результата [6].

Однако в этих традиционных методах термической обработки на внутренней поверхности трубы сохраняется остаточное растягивающее напряжение, связанное с разницей в скорости охлаждения на наружной и внутренней поверхностях трубы во время обработки.

В частности, в случае с трубой из нержавеющей стали термообработка проводилась таким образом, что вначале осуществлялся нагрев целой трубы до высокой температуры, а затем она погружалась в резервуар, наполненный охлаждающей водой. Тем не менее, поскольку внутренняя поверхность трубы не остывает до тех пор, пока в нее не попадет через концы охлаждающая вода, то начало охлаждения внутренней поверхности трубы идет после охлаждения наружной поверхности трубы, которое начинается сразу после того, как она погружается и вступает в прямой контакт с охлаждающей водой. Кроме того, внутренняя поверхность трубы не может контактировать с достаточно холодной водой для охлаждения, при этом на наружной поверхности трубы повышение температуры охлаждающей воды происходит не так быстро, поэтому на внутренней поверхности скорость охлаждения медленней по сравнению с наружной поверхностью, что вызывает, тем самым, возникновение остаточного растягивающего напряжения на внутренней поверхности трубы. Помимо этого, ввиду того, что на практике существует ограничение по размеру трубы, только основная часть трубы может быть охлаждена в достаточной степени.

Создание остаточного сжимающего напряжения на внутренней поверхности трубы возможно не только для вышеописанного типа нержавеющей стали 304, но также и для других материалов, таких как низколегированная сталь, в том числе хром-молибденовая сталь, высоколегированная сталь, в том числе хром-никелевая высокопрочная сталь, углеродистая сталь или медь, чтобы улучшить стойкость трубы, произведенной из этих материалов, к коррозионной усталости. Данный метод основан, главным образом, на разнице температур между наружной и внутренней поверхностью трубы, которая является достаточно значительной для создания напряжения, превышающего предел текучести при сжатии на наружной поверхности

трубы. Следовательно, не всегда требуется, чтобы охлаждающая среда циркулировала, она может находиться в трубе в ходе нагрева наружной поверхности. Однако, подобный метод не может применяться для обработки тонкостенных труб, поскольку чрезвычайно сложно добиться достаточно большой разницы температур между наружной и внутренней поверхностью трубы. Таким образом, в отличие от методики с циркулирующей охлаждающей средой, обработка с внутренней не циркулирующей жидкостью эффективна только в применении для тех труб, которые сделаны из материала с плохой теплопроводностью или труб с толстыми стенками.

К специфическим видам термической обработки металлоизделий, используемым для снижения уровня остаточных напряжений, относят способы термоциклирования и термоударов [7].

Термоциклирование наиболее целесообразно использовать для обработки многофазных сплавов, когда фазы существенно различаются коэффициентами линейного расширения (силумины, α + β -сплавы титана, двухфазные латуни и др.). Его целесообразно применять к изделиям, к которым предъявляются особо жесткие требования по стабильности размеров. Например, детали из силуминов типа АЛ2 и АЛ9 охлаждают до температур $-40\dots-196$ °С, затем отогревают до комнатной температуры, а потом нагревают до 150 °С. Затем детали охлаждают и вновь обрабатывают холодом. В течение нескольких циклов такой обработки (последней операцией является нагрев) остаточные напряжения уменьшаются на 30...70 %. Обычный даже длительный отпуск при 150 °С несравненно слабее уменьшает остаточные напряжения. Из-за большой разницы в термических коэффициентах линейного расширения алюминиевой и кремниевой фаз на межфазных границах возникают микронапряжения. При обработке холодом эти напряжения усиливаются и, складываясь с остаточными напряжениями, вызывают при нагреве значительные пластические деформации. Таким образом, чередование захлаживания до отрицательных температур и последующего нагрева усиливает пластическое течение в микроучастках и этим способствует более полному уменьшению остаточных напряжений.

Метод термоударов состоит в создании при быстром нагреве изделия термических напряжений, которые способствуют релаксации остаточных напряжений. Например, чтобы снизить закалочные напряжения в плитах, штамповках и других деталях из алюминиевых сплавов, которые нельзя отжигать из-за недопустимости разупрочнения, предлагается применять обработку холодом с последующим термоударом. Закаленное изделие помещают в жидкий азот (-196 °С), а затем быстро нагревают до невысоких температур в кипящей воде или струе пара. Предварительное охлаждение в жидком азоте позволяет увеличить термические напряжения во время термоудара при невысокой температуре нагрева.

1.3 Вибрационный метод снятия остаточных напряжений в сварных конструкциях

В последние десятилетия получил распространение малоэнергоёмкий способ стабилизации геометрических размеров металлоконструкций под названием “вибрационная обработка”.

Вибрационную обработку осуществляют посредством возбуждения в сварной конструкции низкочастотных механических колебаний.

По энергоёмкости вибростабилизация в десятки раз ниже термической обработки, а по производительности значительно ее превосходит. Примерно на порядок снижаются и капитальные затраты.

Вибрационной обработке подвергают сварные конструкции не только из углеродистых сталей, но и изготовленные из алюминиевых и титановых сплавов. Широко используют виброобработку чугунных и стальных отливок.

Малая энергоёмкость систем виброобработки, относительно низкая стоимость технологического оборудования и простота его обслуживания позволяют эффективно применять вибростабилизацию не только на крупных предприятиях, но и в условиях мелких и средних производств.

Несмотря на наличие многих разрозненных публикаций по проблеме вибрационной обработки обобщающая литература по этой тематике практически отсутствует.

Стабилизацию геометрических размеров металлоконструкций осуществляют термической обработкой (отпуск, обжиг) либо механическим нагружением (статическим, вибрационным).

При вибронагружении суммируют переменные напряжения σ_A с остаточными напряжениями σ_0 в металлоконструкции (рисунок 5)

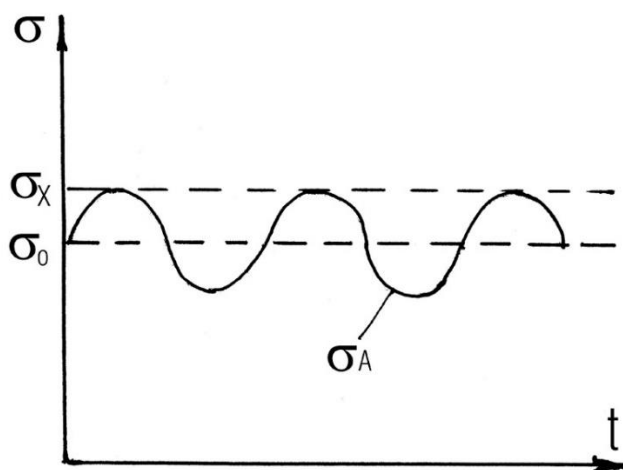


Рисунок – 5 Схема суммирования остаточных и вибрационных напряжений в металлоконструкции

Под действием суммарных напряжений σ_x может происходить пластическая деформация, способствующая стабилизации геометрических размеров, перераспределению и снижению остаточных напряжений.

Если напряжения σ_x малы, то макропластические деформации металла сварного соединения не происходят, а следовательно не может происходить существенное перераспределение и снижение остаточных напряжений первого рода. После обработки на таких режимах в результате аннигиляций снижается общая плотность подвижных дислокаций, а оставшиеся дислокации оказываются настолько

закрепленными, что для их сдвига с места необходимо значительное усилие [8]. В целом это повышает сопротивляемость металла сварного соединения последующему самопроизвольному деформированию.

Установлено, что вибрация сварных конструкций при низких уровнях создаваемых напряжений ($> 0,05 \sigma_T$) незначительно влияет на изменение остаточных напряжений первого рода [9, 10, 11, 13, 14]. В то же время экспериментально подтверждено существенное повышение стабильности геометрических размеров благодаря перераспределению плотности дислокаций и изменению напряжений второго рода.

При высоких значениях напряжений σ_A в металле наблюдают лавинообразное возникновение новых дислокаций, даже незначительное перемещение которых приводит к резкому увеличению необратимого деформирования [8]. Вследствие этого суммарные напряжения σ_x существенно превышают предел текучести металла σ_T , следовательно, основным процессом, происходящим в металле сварного соединения, будет макропластическое деформирование, приводящее как к перераспределению и уменьшению остаточных напряжений, так и к его упрочнению. Виброобработка сварных образцов из низкоуглеродистой стали на режимах, обеспечивающих протекание упруго–пластических деформаций, уменьшает напряжения первого рода, измеренные тензотермическим методом, на 50–60%, а отпуск — на 70% и более [14]. Напряжения второго рода в зоне сплавления, определенные рентгеновским методом, после виброобработки снижаются на 45%, а после отпуска — на 65%. Уменьшение плотности дислокаций при виброобработке и отпуске практически одинаково.

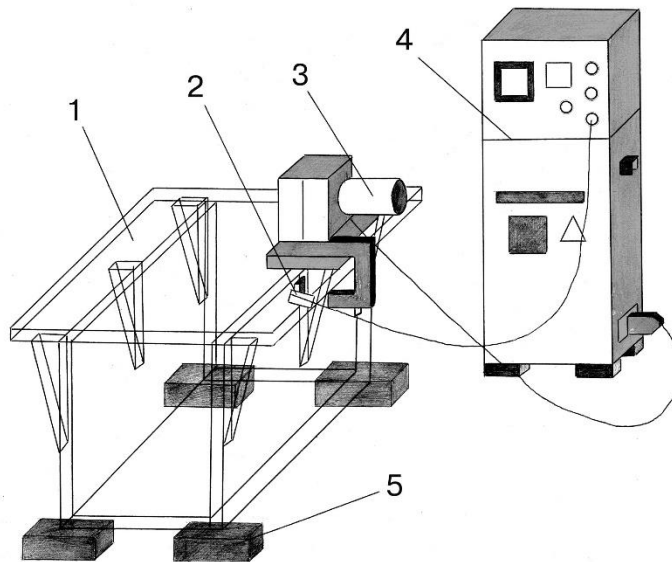


Рисунок – 6 Схема вибрационной обработки сварных конструкций [14]

На рисунке 6 показана наиболее распространенная схема виброобработки сварных конструкций [15]. Сварная конструкция 1 установлена на виброизолирующих опорах 5, к ней прикреплен струбцинами или болтами вибровозбудитель 3 с регулируемой частотой колебаний. На пульте управления 4 виброустановки расположены приборы, регистрирующие частоту и амплитуду колебаний с помощью датчика 2, прикрепленного к сварной конструкции. Плавным изменением частоты колебаний от минимальной до максимальной регистрируют резонансные частоты системы “сварная конструкция–вибровозбудитель”. Затем производят виброобработку на выбранных резонансных частотах. На рисунке 3, приведена структурная схема рассмотренного базового технологического процесса виброобработки [16]. Получаемая от сети электрическая энергия, преобразованная в источнике питания V1, поступает к электродвигателю вибровозбудителя V2, где превращается в механическую энергию, которая передается изделию V3.

Вибрационную обработку сварных конструкций различной жесткости, как правило, осуществляют приложением изгибных колебаний, которые создают вибровозбудители преимущественно инерционного типа. В таких вибровозбудителях возмущающее усилие получают за счет вращения одной или нескольких

неуравновешенных масс. Возникающая при вращении вала центробежная сила Q_0 постоянна по величине, но непрерывно изменяет свое направление:

$$Q_0 = m r \omega^2 \quad (1.1)$$

где m — масса дебаланса; r — расстояние от оси вращения до центра тяжести дебаланса; ω — угловая скорость вращения дебаланса.

При анализе процессов виброобработки сварную конструкцию V3 рассматривают как колебательную систему с распределенными параметрами и сосредоточенной массой.

Эффективность виброобработки зависит от величины амплитуды переменных напряжений и времени вибронагружения [17, 18, 19, 20]. Увеличение возмущающего усилия возможно за счет изменения частоты вращения либо массы дебаланса. В случае использования вибровозбудителей инерционного типа с ростом частоты вращения заметно увеличивается нагрузка на подшипники, что резко снижает их надежность. Аналогично влияет и масса дебаланса. Поэтому возмущающее усилие большинства инерционных вибровозбудителей обычно ограничивается 15–17 кН.

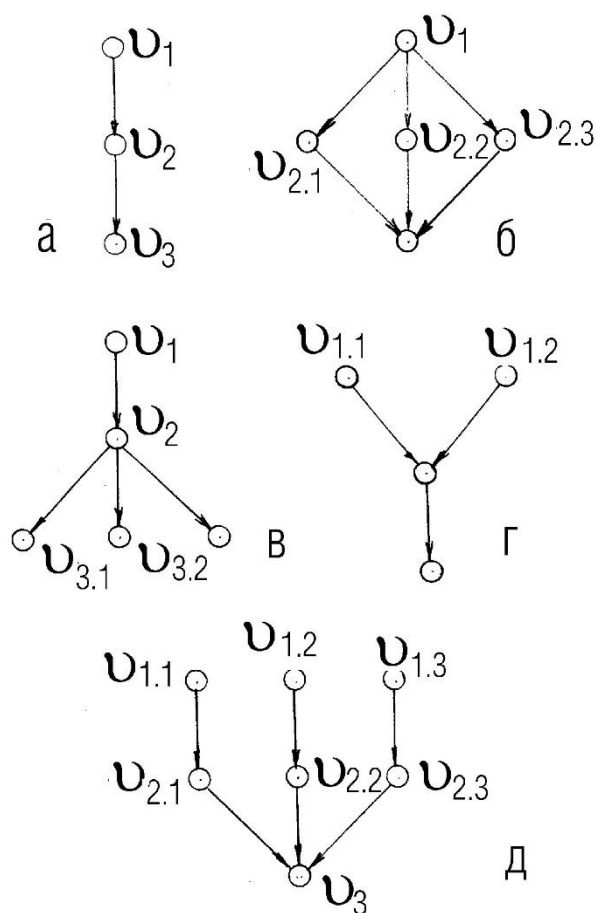


Рисунок – 7 Структурные схемы технологических процессов виброобработки [2] ($V_1, V_{1.1}, V_{1.2}, V_{1.3}$ - источники энергии; $V_2, V_{2.1}, V_{2.2}, V_{2.3}$ - вибровозбудители и другие типы инструментов; $V_3, V_{3.1}, V_{3.2}, V_{3.3}$ - предметы обработки)

Увеличение амплитуды переменных напряжений может быть осуществлено за счет установки на одном изделии нескольких вибровозбудителей, питающихся от одного источника (рисунок 8, б). При этом возбудители располагают как в одной плоскости, так и в разных плоскостях сварной конструкции. В последнем случае одновременную работу вибровозбудителей в резонансном режиме трудно осуществить, так как жесткость при изгибе в плоскости колебаний может быть различной. Поэтому расположенные в различных плоскостях вибровозбудители могут быть включены последовательно. Естественно, что цикл обработки по такой схеме удлиняется. На Рисунке 7, в представлена структурная схема вибронагружения нескольких деталей ($V_{3.1}, V_{3.2}, V_{3.3}$) с использованием одного вибровозбудителя V_2 . Наиболее известным реализованным вариантом обработки по этой схеме является

одновременная обработка нескольких одинаковых деталей на вибростоле. Обычно так обрабатывают небольшие сварные детали массой до десятков килограмм.

Сюда же может быть отнесена и виброобработка симметрично закрепленных через прокладки деталей (А.с. СССР № 637233).

Был разработан способ снижения остаточных напряжений и деформаций, при котором однотипные балочные сварные конструкции предварительно жестко соединяются между собой в систему, частота собственных колебаний которой ниже частоты собственных колебаний каждой из этих сварных конструкций (А.с. СССР № 897441). Резонансную частоту колебаний таких систем для случая объединения одинаковых балок определяют по формуле

$$f_n = f_1/n^2 \quad (1.2)$$

где f_n — собственная (резонансная) частота колебаний системы длиной L_n ; f_1 — собственная частота колебаний балки длиной L , n — количество балок, объединенных в систему.

После завершения обработки систему разъединяют на отдельные сварные конструкции.

Предложенный способ позволяет производить стабилизирующую виброобработку на более низких резонансных частотах, улучшает условия эксплуатации применяемого оборудования и повышает производительность за счет группового вибронагружения. Указанный способ можно реализовать и при обработке одной детали с установленным на ней вибровозбудителем. Деталь удлиняют за счет специальной оснастки.

Отличительной особенностью структурной схемы виброобработки, приведенной на Рисунке 3, г, является наличие двух источников энергии $V_{1.1}$, $V_{1.2}$, взаимодействующих с одним инструментом (вибровозбудителем) V_2 и изделием V_3 .

Одним из направлений повышения эффективности виброобработки является дополнительное нагружение конструкции сосредоточенной нагрузкой. Структурная

схема, предусматривающая вибрационное и статическое нагружение, была реализована применительно к устранению деформаций сварных балочных конструкций [21]. При этом статическое усилие передавали на балку в зоне приложения возмущающего вибрационного усилия через упругий элемент, характеристики которого выбирали из условия отсутствия демпфирования резонансных вынужденных колебаний.

Проведенные исследования показали, что благодаря рациональному сочетанию вибрационного нагружения и статических нагрузок можно полностью скомпенсировать остаточные деформации, образовавшиеся при сварке балок [21]. Однако громоздкость оборудования, сложность его настройки не позволили широко применить эту технологию для обработки сварных конструкций.

Структурная схема, приведенная на Рисунке 3, д, предусматривает использование нескольких источников энергии V1.1, V1.2, V1.3 со своими инструментами V2.1, V2.2, V2.3, которые взаимодействуют с одним изделием V3. Сюда можно отнести виброобработку одновременно несколькими вибровозбудителями [15], комбинации вибронагружения и крутильных колебаний вокруг оси, перпендикулярной к главной составляющей остаточных напряжений (А. с. СССР № 1403530), вибронагружения и статического нагружения растяжением [20]. По этой же схеме осуществляют процесс виброобработки в сочетании с местным нагревом зоны сварного шва (А. с. СССР № 505543), виброобработку в процессе сварки и др. [22].

Проверен способ комбинированной обработки сварной конструкции, подпадающий под схему на Рисунке 3, д, при котором вибронагружение осуществляют одновременно с аргонодуговой обработкой границ швов. Максимальные напряжения после аргонодуговой обработки снижаются на 25%. Снижение напряжений происходит потому, что при расплавлении участка перехода от шва к основному металлу нарушается равновесие внутренних сил поля напряжения в результате перехода части металла в пластическое состояние [23].

Проверку эффективности совмещения вибронагружения и аргодуговой обработки осуществляли следующим образом. На пластину из стали ВСт3сп размером 800x400x10 мм по оси производили наплавку под флюсом АН–348 электродной проволокой диаметром 4 марки Св–08А на режиме $I_{св} = 650 \dots 700$ А, $U_d = 32 \dots 34$ В, $V_{св} = 25$ м/ч. После наплавки и полного остывания часть образцов закрепили консольно и подвергли аргодуговой обработке в соответствии с технологическими рекомендациями, и одновременному вибронагружению с частотой 50 Гц при возмущающем усилии 5 кН [22]. Резистивные датчики на пластину наклеили со стороны, противоположной шву.

После завершения технологической операции датчики вырезали. Из эпюры распределения остаточных напряжений после сварки 1 и после аргодуговой обработки с вибронагружением 2 видно, что во втором случае остаточные напряжения снизились примерно на 60% (Рисунок 8).

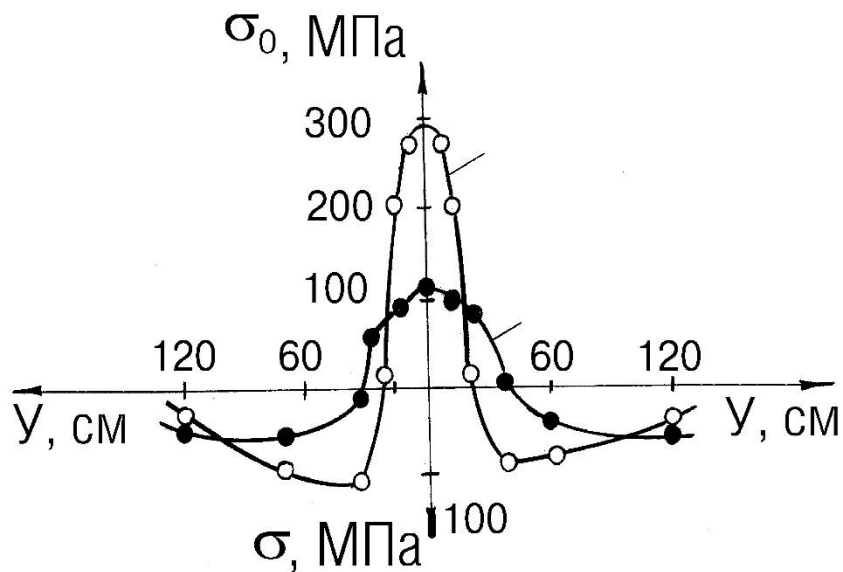


Рисунок – 8 Остаточные напряжения в пластинах после сварки (1) и после аргоннодуговой обработки сварных швов с вибронагружением (2) [2]

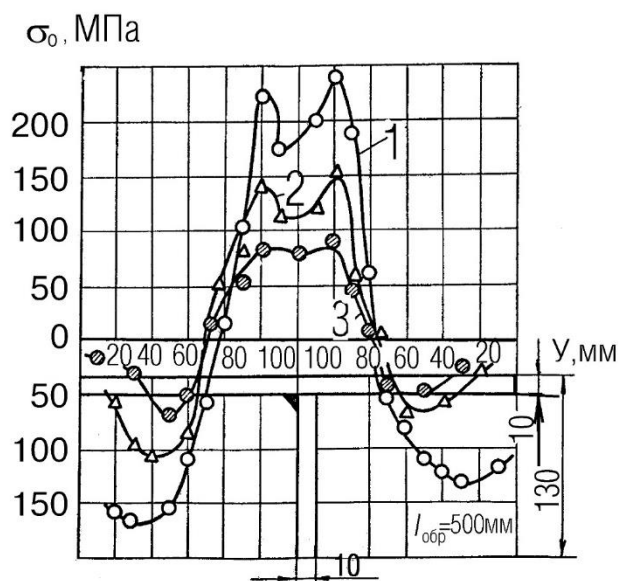


Рисунок – 9 Влияние различных способов обработки на остаточные напряжения в сварных образцах [1]

1- после сварки без вибронагружения; 2 - после вибронагружения в процессе сварки и в течении 10 мин после обрыва дуги; 3 - после отпуска при температуре 600 с выдержкой в печи 2 ч

Вибронагружение в процессе сварки является весьма эффективным средством снижения остаточных напряжений и деформаций в сварных конструкциях [22, 24, 25].

В опытах по определению влияния вибронагружения остаточные напряжения использовали тавровые образцы из стали ВСтЗсп толщиной 10 мм [22]. Изготовили три серии образцов по три образца в каждой. Первую серию сваренных образцов не подвергали обработке с целью снижения остаточных напряжений. Вторая серия была подвергнута высокому отпуску при температуре 600 °С. Образцы третьей серии обрабатывали вибронагружением с частотой 50 Гц и амплитудой 1–1,2 мм в процессе сварки и в течение 10 минут после обрыва дуги. Полученные результаты замеров (Рисунок 9) показывают, что вибронагружение в процессе сварки и после сварки до практически полного остывания образцов по эффективности снижения остаточных напряжений приближается к высокому отпуску.

С помощью вибрации в процессе сварки улучшают формирование швов, повышают их стойкость против образования пор и кристаллизационных трещин [22, 25, 26], а также механические свойства и другие служебные характеристики сварных соединений [22, 25, 27].

Основными параметрами вибрационной обработки являются амплитуда и время вибронагружения [10]. Чем выше амплитуда переменных напряжений, тем интенсивнее происходит релаксация остаточных напряжений [10].

Максимальная релаксация напряжений получена на сварных образцах из низкоуглеродистой стали при $S_{\text{вibr}} = 120$ МПа в течение 20 мин [17]. Уравнение регрессии второго порядка для определения изменения остаточных сварочных напряжений первого рода в зависимости от числа циклов N и амплитуды знакопеременных напряжений $S_{\text{пер}}$ при вибрационной обработке имеет следующий вид:

При первом цикле нагружения напряжения снижаются на 50–70%, в течение последующих десяти циклов — на 25–30% и при дальнейшем нагружении до 104 циклов — на 10–25%.

Относительное снижение остаточных напряжений при виброобработке на первой резонансной частоте составило 40–45%, на второй — дополнительно 10–12%, на третьей, четвертой и пятой — 5–8%. От правильного выбора амплитуды напряжений и числа циклов нагружения зависят качество виброобработки и долговечность изделий, поскольку вибронагружение осуществляют на резонансных частотах, которые могут вызвать повреждение конструкции. Рассмотрен механизм релаксации остаточных напряжений при виброобработке с использованием обобщенной диаграммы усталости (Рисунок 10).

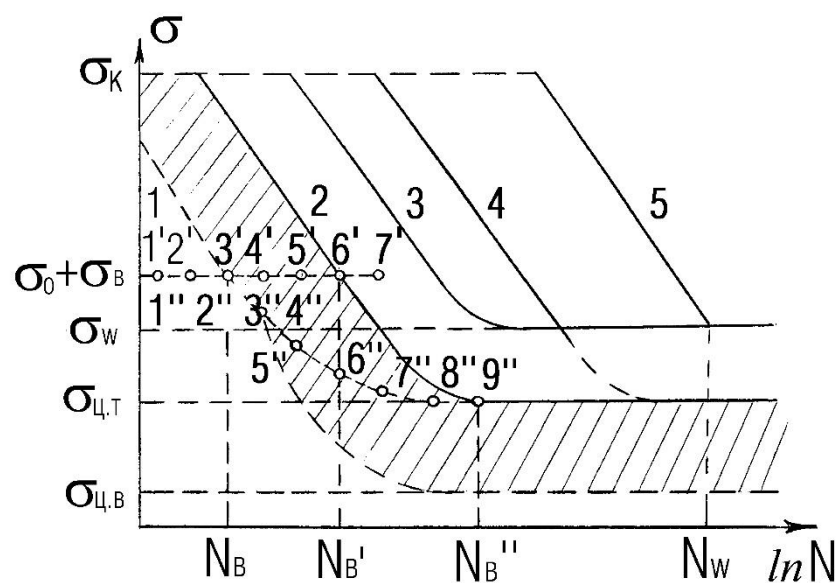


Рисунок –10.а Схема обобщенной диаграммы усталости [15]

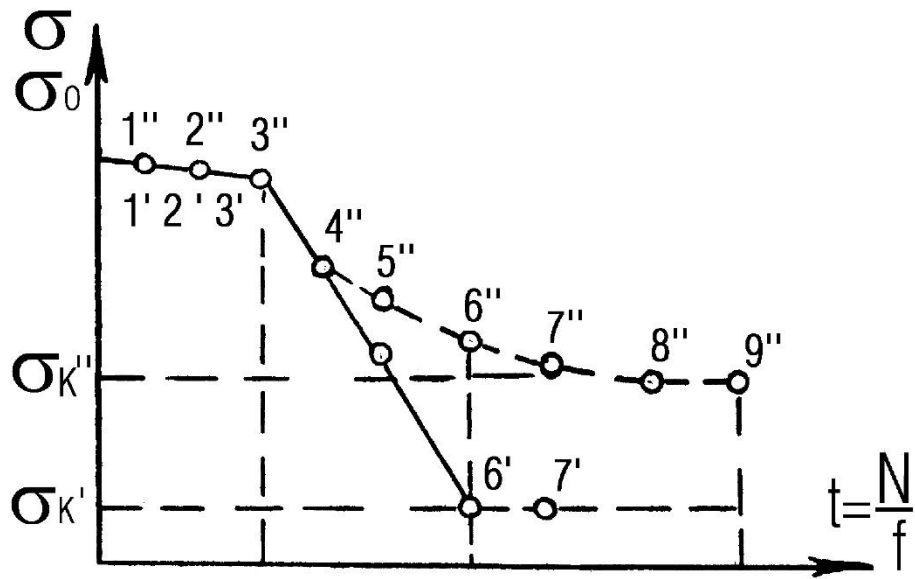


Рисунок – 10.6 Кинетика уменьшения остаточных процессов [15]

1- начало микроскопического течения; 2-макроскопическое течение; 3- линия окончания макроскопического течения; 4- линия начала субмикроскопических трещин; 5- кривая усталостного разрушения; $\sigma_{к}$ -критическое напряжение усталости; $\sigma_{ц.т.}$ - предел усталости; σ - циклический предел усталости.

При виброобработке на стадии циклической микротекучести до линии 2 (Рисунок 10, а) обычные механические свойства (предел текучести, микротвердость и др.) не изменяются и к ее окончанию; при циклическом напряжении, равном пределу усталости, все сечение материала претерпевает небольшую деформацию. Экспериментально установлено, что при длительности N виброобработки не более 10^4 циклов фиксируется относительная деформация порядка 10^{-6} – 10^{-4} .

Начало интенсивного микропластического течения устанавливается по изменению характеристики внутреннего трения и обозначено на Рисунок 10, а линией 1; области микротекучести разграничены линией 2; линии 3, 4 и 5 отражают соответственно стадии циклического упрочнения, образования субмикроскопических трещин и усталостного разрушения.

В малоуглеродистой стали стадия циклического течения связана с протеканием по всему объему материала макроскопической пластической деформации, характеризуемой резким увеличением плотности дислокаций по

границам зерен в перлите и вокруг включений, протеканием поперечного скольжения и началом формирования ячеистой дислокационной структуры. Кроме того, изменяются некоторые физико–механические свойства: повышается микротвердость, снижается предел пропорциональности, происходит изменение характеристик внутреннего трения и др. Процесс уменьшения остаточных напряжений в поле суммарных остаточных и вибрационных напряжений начинается с линии 1 (начало микроскопического течения) и заканчивается линией 2 (начало макроскопического течения). Суммарные значения остаточных и вибрационных напряжений ($\sigma_o + \sigma_v$) должны быть меньше критических напряжений усталости σ_k .

Наличие построенных для определенного материала линий 1, 2 и 3 на диаграмме усталости позволяет обоснованно выбирать режимы виброобработки [28]. Протекание процесса вибрационного уменьшения напряжений при суммарном значении остаточных и вибрационных напряжений, меньшем статического предела микротекучести, рассматривают следующим образом [28]. Как правило, виброобработку проводят при приложении вибрационных напряжений $\sigma_v = \text{const}$. На обобщенной диаграмме усталости (Рисунок 10, а) откладывают суммарное значение остаточных и вибрационных напряжений $\sigma_o + \sigma_v$. До начала микроскопического течения (линия 1) уменьшение остаточных напряжений почти не происходит. Через N_v циклов, число которых зависит от суммарного значения остаточных и вибрационных напряжений, начинается пластическая деформация, вследствие чего остаточные напряжения уменьшаются, что соответствует точкам 4"–8" (Рисунок 10). При достижении линии начала макроскопического течения (точка 9") виброобработку необходимо прекратить. Точка 9" соответствует N''_v циклам. Время виброобработки определяют делением числа циклов N''_v на частоту f вибрационного воздействия:

$$f_{\text{обр}} = N''_v / f \quad (1.3)$$

Определив по оси ординат значение $\sigma_B + \sigma_o$, соответствующее точке 9" (например, $\sigma_B + \sigma_c$), находят значение σ_k ", до которого удастся снизить виброобработкой остаточные напряжения σ_k ".

Таким образом, благодаря неравномерному распределению остаточных напряжений в сварных конструкциях, степень уменьшения остаточных напряжений в различных точках изделия будет различной ввиду непостоянства суммарного значения остаточных и вибрационных напряжений $\sigma_o + \sigma_B$.

Возможен случай, когда в процессе виброобработки для уменьшения остаточных напряжений увеличивают σ_B , чтобы сумма остаточных и вибрационных напряжений оставалась постоянной ($\sigma_B + \sigma_o = \text{const}$). При этом скорость уменьшения остаточных напряжений поддерживается также постоянной (точки 3'–6'), вследствие чего достигается наиболее полное снижение остаточных напряжений. На практике подбор режимов виброобработки осуществляют экспериментальным путем.

Изменения физико–механических свойств материала сварных соединений под воздействием вибронагружения рассмотрены в ряде работ [29].

1.4 Электрогидроимпульсный метода снятия внутренних напряжений в сварных конструкциях

Опишем основные явления, характерные для электрических разрядов в жидкости. Вначале рассматривается так называемая предразрядная стадия, в течение которой образуется канал разряда, замыкающий межэлектродный промежуток, затем явления, протекающие при выделении энергии конденсатора в канале разряда, и, наконец, - пульсации газового пузыря после разряда.

Типичным процессом инициирования разряда является пробой межэлектродного промежутка в жидкости под действием электрического напряжения, возникающего на электродах при подключении к ним заряженного конденсатора. В диапазоне напряжений, применяемых на практике от 1 до 100кВ, известны два механизма пробоя: стримерный, или лидерный, соответствующий высоким напряжениям, и тепловой, протекающий при низких напряжениях. Наиболее благоприятные условия для возникновения лидерного пробоя имеют место в случае

высоковольтных неоднородных полей между положительным остриём и отрицательной плоскостью. В результате срыва электронных лавин, устремляющихся к острию образуются лидеры, прорастающие в направлении центров ионизации, на которых образовались электронные лавины. Этот процесс напоминает пробой газов. Совокупность лидеров на положительном острие имеет вид кистевой короны. Замыкание межэлектродного промежутка одним из лидеров приводит к завершению процесса образования канала разряда. Этот механизм обеспечивает пробой межэлектродных промежутков длиной в несколько сантиметров при напряжении в несколько десятков киловольт. Задержка пробоя, т.е. время между моментами пробоя практически не зависит от величины гидростатического давления, по крайней мере до 1000 атм.

При низких напряжениях лидерный механизм сменяется тепловым. Под воздействием тока проводимости происходит нагрев и испарение воды у электродов. В результате между электродами образуется газовый «мостик», по которому далее происходит пробой межэлектродного промежутка. Отличительными чертами этого механизма инициирования разряда являются большая задержка пробоя, достигающая величины нескольких миллисекунд, небольшая длина пробиваемых промежутков и сильное возрастание задержки пробоя с ростом гидростатического давления.

После образования канала сильный разрядный ток, достигающий десятков и сотен килоампер, разогревает плазму уже на начальной стадии разряда до температуры порядка 10^4 К. в процессе разряда, во время протекания тока, температура плазмы меняется незначительно, спадая после окончания разряда.

Разогрев плазмы вызывает повышение давления в канале разряда. Под действием повышенного давления канал расширяется и давление в канале процесса разряда проходит через минимум: на начальной стадии разряда давление в канале возрастает, несмотря на увеличение его объема, и спадает лишь к концу разряда. Давление в канале в максимуме достигает величины порядка 10^3 атм., при умеренной плотности энергии в канале.

Плотность плазмы в процессе разряда меняется незначительной и поддерживается на уровне 10^{20} частиц на см^{-3} . Происходит это потому, что

уменьшение плотности плазмы из-за расширения канала компенсируется поступлением новых частиц в результате испарения воды со стенок канала.

Сопротивление канала в начальной стадии разряда падает благодаря увеличению сечения канала и некоторому возрастанию удельной проводимости плазмы. К концу разряда сопротивление канала возрастает, несмотря на продолжающееся расширение канал. Это происходит из-за охлаждения плазмы и вызванного этим процесса её деионизации.

Расширение канала продолжается и после окончания выделения энергии, сначала под действием давления, повышенного по сравнению с гидростатическим давлением, а затем благодаря инерции растекающегося потока жидкости. На послеразрядной стадии канал превращается в газовый пузырь. Расширение пузыря происходит до тех пор, пока кинетическая энергия растекающегося потока не перейдет полностью в потенциальную энергию пузыря, давление в котором значительно меньше гидростатического. Затем под действием гидростатического давления происходит обратное движение жидкости. Потенциальная энергия снова переходит в кинетическую энергию сходящегося потока. При захлопывании полости давление газа в ней резко возрастает. Под действием этого давления жидкость отбрасывается назад, и процесс повторяется в виде нескольких последовательных затухающих пульсаций. Период пульсаций и величина максимального радиуса пузыря определяются количеством энергии, выделившейся в канале.

Расширение канала на стадии разряда и последующие пульсации пузыря сопровождаются излучением волн сжатия и растяжения. Волны сжатия излучаются на стадии разряда и при последующих захлопываниях пузыря, когда высокое давление в канале и затем в сжатом пузыре вызывает уплотнение прилегающих слоев жидкости. Волны сжатия чередуются с относительно длинными волнами разрежения, которые излучаются на стадиях, когда давление в пузыре ниже гидростатического.

При интенсивном выделении энергии скорость расширения канала может стать сравнимой со скоростью звука в жидкости и даже превзойти ее. В этих случаях волна сжатия, распространяющаяся в жидкости, превращается в ударную уже в

непосредственной близости от канала или даже сразу же излучается в виде ударной волны.

Энергия, выделяющаяся в канале разряда, расходуется в основном на работу, совершаемую каналом при расширении (около 50%), и на нагрев вещества в канале разряда.

Работа, совершаемая каналом, подразделяется на энергию волн сжатия, излучаемую на стадии разряда (до 20%), и на энергию пульсаций газового пузыря, равную потенциальной энергии пузыря в момент максимального объема (до 30%). Энергия пульсаций постепенно расходуется на излучение волн сжатия и разряднения и на другие потери [30].

1.5 Характеристики канала разряда в жидкости

Известно, что развитие электрического разряда в любой среде характеризуется тремя стадиями: предпробивной стадией, электрическим пробоем, послеразрядными явлениями.

Рассмотрим эти стадии. Предпробивная стадия начинается с момента подачи напряжения от высоковольтного источника импульсных напряжений на электрод. На этой стадии от электрода вглубь промежутка со скоростью $(10^3 - 10^6)$ м/с, развиваются первичные каналы диаметром $(1 \div 5)$ мкм, что сопровождается протеканием тока $(10^{-3} \div 10^{-5})$ А с плотностями $(1 \div 8) \cdot 10^3$ А/см. в процессе развития первичного канала в его основании создаются критические условия, приводящие к ударному расширению до $(50 \div 100)$ мкм со скоростью $(1 \div 6) \cdot 10^3$ м/с, увеличению тока на $3 \div 4$ порядка, яркой вспышке в канале, то есть происходит преобразование первичного канала в лидерный, обеспечивающий вынос потенциала высоковольтного электрода вглубь промежутка и дальнейшее толчкообразное движение до противоположного электрода. В момент замыкания электродов лидером начинается главная стадия разряда, которая завершается образованием высокопроводящего канала в жидкости.

За время $(10^{-5} \div 10^{-6})$ с в канал электрического разряда вводится энергия от единиц Джоулей до десятков килоДжоулей в зависимости от параметров источников

импульсных напряжений. Вещество в канале электрического разряда разогревается до температур $(20 \div 40) \cdot 10^3$ К, давление поднимается до $(3 \div 10) \cdot 10^2$ Мпа, что приводит к взрывному характеру движения стенки канала со скоростью $9 \cdot 10^2$ м/с и формированию ударной волны, скорость фронта которой составляет в воде $2,2 \cdot 10^3$ м/с. Ударная волна, имея скорость большую чем канал электрического разряда, удаляется от него уже к моменту времени $(0,5 \div 1,5) \cdot 10^{-6}$ с и движется самостоятельно. После окончания энерговыделения канал электрического разряда вырождается в парогазовую полость, претерпевающую серию последовательных пульсаций и перемещающуюся в среде.

Пульсации парогазовой полости приводят к возникновению радиального перемещения жидкости и вторичных волн сжатия с амплитудой $(10^5 \div 10^6)$ Па.

Электрический разряд в жидкости характеризуется энергией, выделяемой при разряде, изменением мгновенной мощности и длительностью разряда. Эти величины зависят от напряжения источника U_0 , величиной разрядного промежутка L_p , проводимости жидкости δ , индуктивности L и ёмкости C разрядного контура. В работе [], установлено, что при увеличении индуктивности разрядного контура величина мощности, развиваемой в канале электрического разряда, резко падает, при этом снижается давление в канале разряда и на фронте ударной волны. Однако, величина полной энергии, выделяемой в канале электрического разряда из контура источника, практически не зависит от индуктивности и близка к энергии, запасённой в нём.

При заданных величинах индуктивности и ёмкости разрядного контура, напряжения источника питания имеется оптимальная длина промежутка, при которой достигается наибольшая мгновенная мощность:

$$l_p = 0,4 \cdot \frac{U_0}{\sqrt{A}} \cdot \sqrt[4]{L \cdot C} \quad (1.4)$$

Где A – искровая постоянная, равная $\approx 0,25 \cdot 10^5$ В·с/м²

В работе [] предложены следующие зависимости для оценки начальных параметров расширяющейся плазмы в воде:

а) для начальной скорости расширения канала разряда, (м/с):

$$U = 7,9 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{N'}{L_p}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (1.5)$$

б) для начальной температуры плазмы, (к):

$$T = 56 \cdot \left(\frac{N'}{L_p}\right)^{\frac{1}{6}} \quad (1.6)$$

в) для начального давления на фронте ударной волны, (кг/см²):

$$P_{\phi} = 0,64 \cdot \left(\frac{N'}{L_p}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.7)$$

г) для начальной скорости фронта ударной волны, (м/с):

$$U_{\phi} = 7,5 \cdot 10^2 \cdot \left\{ 1 + \left[1 + 4,4 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{N'}{L_p}\right) \right] \right\} \quad (1.8)$$

д) К.П.Д. при преобразовании подведённой электрической энергии ударной волны:

$$\eta = \frac{1,6 \cdot 10^{-21} \cdot \left(\frac{N'}{L_p}\right)^{\frac{1}{6}}}{4,3 \cdot 10^{-19} + 3,9 \cdot 10^{-21} \cdot \left(\frac{N'}{L_p}\right)^{\frac{1}{6}}} \quad (1.9)$$

где N' и L_p – скорость выделения мощности и длина разрядного промежутка, соответственно.

С точностью, достаточной для практических целей, основные характеристики парагазовой полости можно определить по следующим выражениям.

Максимальный радиус:

$$R_{max} \approx 0,62 \cdot \left(\frac{W_{п}}{\rho_0}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.10)$$

Период пульсации:

$$T_p = 1,13 \cdot \sqrt{\rho_0} \cdot \left(\frac{W_{II}^{\frac{1}{3}}}{\rho_0^{\frac{5}{6}}} \right) \quad (1.11)$$

Давление на фронте вторичных волн:

$$p \approx 0,3 \cdot \rho_0 \cdot \left(\frac{R_{max}}{R_{min}} \right)^3 \quad (1.12)$$

Где W_{II} – энергия, запасённая полостью в момент достижения максимального объёма;

ρ_0 – гидростатическое давление;

R_{max} и R_{min} – максимальный и минимальный радиус при пульсации, соответственно;

В зависимости от технических требований, представляемых к электрическому разряду в жидкости, варьированием параметрами разрядной цепи можно в широком интервале изменять его характеристики и регулировать интенсивность гидродинамических процессов.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Разработка проекта производится группой квалифицированных работников, состоящей из двух человек – руководителя и студента.

Темой проекта является анализ использование электрических разрядов для снятия внутренних механических напряжений в сварных трубах.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности НТИ, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Оценить коммерческий потенциал и перспективность проекта;
2. Осуществить планирование этапов выполнения проекта;
3. Рассчитать бюджет затрат на проект;
4. Произвести оценку ресурсной и экономической эффективности проекта.

4.1 Инициализация исследования и его потенциальные потребители

Данный проект посвящён исследованию использования технологии электрогидроимпульсной обработки сварных труб для снятия внутренних механических напряжений. При изготовлении труб, путём изгиба плоского металлического листа и сваривания его концов. Из-за неравномерного нагрева участков трубы, во время сварки, образуются внутренние механические напряжения, которые снижают прочность и долговечность готовых изделий. Ввиду данной проблемы возникает необходимость снятия внутренних механических напряжений.

Целью проекта является получение экспериментальных данных по уровню снятия внутренних напряжений при электрогидроимпульсной обработке сварных труб. Так же существует необходимость разработки устройства автоматизации перемещения высоковольтного электрода.

Потенциальными потребителями данного проекта, являются предприятия по производству сварных труб. На базе этих предприятий возможно создания цеха по снятию внутренних механических напряжений. Что в свою очередь позволит повысить конкурентоспособность предприятия, и открывает новый рынок сбыта продукции, так как возможна замена бесшовных труб.

Примером предприятия, заинтересованным в данном проекте, является ПАО «Газпромтрубинвест» Волгореченский трубный завод [33]. Основными видами деятельности предприятия является:

- производство стальных электросварных газонефтепроводных, насосно-компрессорных и обсадных труб диаметром 60-426 мм, для обустройства газовых, газоконденсатных, нефтяных месторождений и газификации.
- производство наружного изоляционного полиэтиленового двухслойного и трехслойного покрытия на трубы диаметром 42-530 мм, для обустройства газовых, газоконденсатных, нефтяных месторождений и газификации.
- производство круглых и профильных труб для строительства.

Данный проект имеет коммерческий потенциал, в связи с тем, что существуют заинтересованные предприятия в его разработке и внедрению в производство. Так же существует возможность продажи научно-технического проекта иностранным фирмам.

4.1.1 SWOT анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

SWOT – анализ проекта позволяет оценить факторы и явления способствующие или препятствующие продвижению проекта на рынок. [34] Для анализа проекта составлена таблица 4.1.

Сперва описываются сильные и слабые стороны проекта, для выявления возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Таблица 4.1 – SWOT анализ

Strengths (Сильные стороны)	Weaknesses (Слабые стороны)
<p>С1. Ускорение процесса снятия внутренних механических напряжений в сварных трубах.</p> <p>С2. Внедрение технологии в действующие производства.</p> <p>С3. Уменьшение требований производственных площадей для процесса снятия внутренних механических напряжений в сварных трубах.</p> <p>С4. Увеличение эффективности снятия внутренних механических напряжений в сварных трубах.</p>	<p>Сл1. Необходимость в переобучение обслуживающего персонала</p> <p>Сл2. Потенциальная опасность попадания рабочих под высоко напряжение.</p> <p>Сл3. Неопределённость по срокам внедрения технологии.</p> <p>Сл4. Отсутствие договорённостей с производственными предприятиями.</p>
Opportunities (Возможности)	Threats (Угрозы)
<p>В1. Потребность на рынке в более качественных сварных трубах.</p> <p>В2. Наличие потенциальных покупателей технологии.</p> <p>В3. Возможность продажи технологии иностранным предприятиям.</p> <p>В4. Повышение эффективности метода.</p>	<p>У1. Спад экономики РФ, снижение потребности в сварных трубах.</p> <p>У2. Появление более эффективного метода снятия внутренних механических напряжений в сварных трубах.</p> <p>У3. Снижение затрат на изготовление бесшовных труб.</p> <p>У4. Отсутствие заинтересованности предприятий России в модернизации производства.</p>

Анализ Таблицы 4.1 позволил выявить слабые стороны проекта, в частности пункты Сл3 и Сл4 должны быть устранены. Так как проект нацелен именно на внедрение в производство, то необходимо искать предприятия готовые спонсировать разработку проекта и внедрять его на базе своих производственных мощностей.

Со стороны угроз, которые могут отрицательно сказаться на внедрение проекта, основными являются У1 и У4. Но как видно из возможностей проекта, в случае появления данных угроз, необходимо искать возможности продать проект иностранным компаниям, которые в свою очередь более заинтересованы в новых технологиях и имеют возможности её приобретения.

4.2 Планирование работ по выполнению проекта

Для правильного планирования, а также финансирования и определения трудоемкости выполнения проекта необходимо его разбить на этапы. Под этапом понимается крупная часть работы, которая имеет самостоятельное значение и является объемом планирования и финансирования. Проект имеет:

1. Подготовительный этап. Сбор, изучение и анализ, имеющийся информации. Определение состава исполнителей и соисполнителей, согласование с ними частных задач. Разработка и утверждение задания.

2. Разработка теоретической части.

3. Подготовка экспериментальной установки. Проведение эксперимента.

4. Выводы и предложения по теме, обобщение результатов разработки.

5. Завершающий этап. Рассмотрение результатов исследования. Утверждение результатов работы. Подготовка отчетной документации.

Данный проект можно разделить на следующие этапы:

а) Разработка задания;

б) Выбор направления исследования;

в) Теоретические и экспериментальные исследования;

г) Обобщение и оценка результатов;

д) Оформление отчета.

Работу выполняло 2 человека: руководитель (Р), студент (С).

Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 4.2.

4.2.1 Определение трудоемкости работ

Расчет трудоемкости осуществляется опытно-статистическим методом, основанным на определении ожидаемого времени выполнения работ в человеко-днях по формуле

$$t_{ож\ i} = \frac{3 \cdot t_{\min\ i} + 2 \cdot t_{\max\ i}}{5}, \quad (4.1)$$

Где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, чел.-дн.;

$t_{min\ i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{max\ i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Рассчитаем значение ожидаемой трудоёмкости работы:

Для установления продолжительности работы в рабочих днях используем формулу:

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i}, \quad (4.2)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k, \quad (4.3)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения одной работы, календ. дн.;

T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

k – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{T_{кГ}}{T_{кГ} - T_{вд} - T_{пд}}, \quad (4.4)$$

где $T_{кГ}$ – количество календарных дней в году;

$T_{вд}$ – количество выходных дней в году;

$T_{пд}$ – количество праздничных дней в году.

Определим длительность этапов в рабочих днях и коэффициент календарности:

$$k = \frac{T_{кГ}}{T_{кГ} - T_{вд} - T_{пд}} = \frac{365}{365 - 104 - 10} = 1,45,$$

тогда длительность этапов в рабочих днях, следует учесть, что расчетную величину продолжительности работ T_k нужно округлить до целых чисел. [34]

Результаты расчетов приведены в таблице 4.2.

Для начала следует определить удельное значение каждой работы в общей продолжительности работ:

$$U_i = \frac{T_{pi}}{T_p} \cdot 100\%, \quad (4.5)$$

где U_i – удельное значение каждой работы в %;

T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.;

T_p – суммарная продолжительность темы, раб.дн.

Тогда техническую готовность темы Γ_i , можно рассчитать по формуле:

$$\Gamma_i = \frac{\sum_{i=1} T_{pi}}{T_p} \cdot 100\%, \quad (4.6)$$

где ΣT_{pi} – нарастающая продолжительность на момент выполнения i -той работы. [34]

Результаты расчетов приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Исполнители		Продолжительность работ						
	Р	С	t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	T_p	T_k	$U_i, \%$	$\Gamma_i, \%$
			чел- дн.	чел-дн	чел- дн	раб.дн	кал.дн		
I Постановка целей и задач, получение ИД	+	-	2	3	2,4	2,4	3	4,7	4,7
1. Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	+	-	1	2	1,4	1,4	2	2,74	7,44
2. Научно технической подбор и изучение материалов по тематике исследования	+	+	7	11	8,6	4,3	6	8,41	15,9
3. Календарное планирование работ по проекту	+	+	2	5	3,2	1,6	2	3,13	19
4. Подбор научно-технической литературы/документации по проекту	+	+	11	17	13,4	6,7	10	13,1	32,1
II Подготовка к исследованию	+	-	2	4	2,8	1,4	2	2,74	34,8
5. Разработка по перемещению высоковольтного электрода	-	+	5	10	7	7	10	13,7	48,5
6. Сбор испытательной установки									
7. Проведение лаб испытательной части исследования	+	+	4	8	5,6	2,8	4	5,48	54
8. Обработка данных									
9. Анализ результатов исследования	+	+	10	13	11,2	5,6	8	11	65
10. Формирование отчета по НТП.	+	+	15	20	17	8,5	12	16,6	81,6
11. Расчет стоимости реализации проекта	-	+	5	10	7	7	10	13,7	95,3
12. Сдача проекта	-	+	2	3	2,4	2,4	3	4,7	100
Итого:			66	106	82	51	74	100	

Наиболее удобным и наглядным видом календарного плана работ является построение ленточного графика проведения ВКР в форме диаграмм Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. [35]

Таблица 4.3 – диаграмма Гранта

Вид работы	Исполнители		T _k	Март			Апрель			Май			Июнь		
	Р	С													
I Постановка целей и задач, получение ИД	+	-	3												
1. Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	+	-	2												
2. Научно-технической Подбор и изучение материалов по тематике исследования	+	+	6												
3. Календарное планирование работ по проекту	+	+	2												
4. Подбор научно-технической литературы/документации по проекту	+	+	10												
II Подготовка к исследованию	+	-	2												
5. Разработка по перемещению высоковольтного электрода	-	+	10												
6. Сбор испытательной установки 7. Проведение лаб. испытательной части исследования 8. Обработка данных	+	+	4												
9. Анализ результатов исследования	+	+	8												
10. Формирование отчета по НТП.	+	+	12												
11. Расчет стоимости реализации проекта	-	+	10												
12. Сдача проекта	-	+	3												

-Руководитель
 -Студент

График строится в рамках Таблицы 4.3 с разбивкой по месяцам и неделям (7 дней) за период времени выполнения магистерской диссертации. При этом работы на графике выделяются различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Календарный план разработки проекта составлен с учетом всех выходных и праздничных дней. На разработку данного проекта потребуется 74 календарных дней.

4.2.3 Расчет бюджета затрат на проект

При планировании бюджета проекта должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета проекта используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты проекта;
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- накладные расходы.

4.2.4 Расчет материальных затрат на проект

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

- приобретение со стороны сырья и материалов, необходимых для создания научно-технической продукции;
- покупные материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции для обеспечения нормального технологического процесса и для упаковки продукции или расходуемые на другие производственные и хозяйственные;

- покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, подвергающиеся в дальнейшем монтажу или дополнительной обработке;
- сырье и материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, используемые в качестве объектов исследований и для эксплуатации технического обслуживания – объектов испытаний;

В материальные затраты, помимо вышеуказанных, включаются дополнительно затраты на канцелярские принадлежности, диски, картриджи и т.п. В первом случае на них определяются соответствующие нормы расхода от установленной базы. Во втором случае их величина учитывается как некая доля в коэффициенте накладных расходов.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) + \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхи}, \quad (4.7)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхи}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы (15-20% от стоимости материалов).

Величина коэффициента (k_T), отражающего соотношение затрат по доставке материальных ресурсов и цен на их приобретение, зависит от условий договоров поставки, видов материальных ресурсов, территориальной удаленности поставщиков и т.д. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на расходные материалы, (3м) руб.
Электросварная труба	метр	12	253	3339
Полотно для ножовки	шт.	2	40	88
Бумага (формат А4)	Лист	140	2	308
Бумага (формат А3)	Лист	10	5	55
Шариковая ручка	шт.	1	50	55
Autodesk AutoCAD 2016	Лицензия	1	5444	5444
Ноутбук HP 15-ba093ur	шт.	1	29299	29299
Принтер лазерный Pantum P2500W	шт	1	4599	4599
Итого				43187

Цена программного обеспечения (AutoCAD 2016), сроком на 1 месяц, принята согласно каталогу [35]. Цены для ноутбука и принтера взяты с использованием каталога [36].

Стоимость оборудования входящего в состав электроразрядной установки представлена в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Стоимость компонентов электроразрядной установки

Наименование компонента	Цена компонента
Зарядное устройство	48000
Регулирующее устройство	270000
Блок накопления энергии	2100000
Устройство защитного заземления	60000
Коммутатор ГИТ	210000
Пульт управления	240000
Контейнер	180000
Общая стоимость электроустановки	3108000

Данная установка находится в высоковольтной лаборатории Томского политехнического университета, и в связи с этим затраты на её приобретение можно не учитывать.

4.2.5 Основная и дополнительная заработная плата исполнителей

Проведем расчет такой статьи расходов как оплата труда. В данную статью расходов входит основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) работников занятых выполнением НИИ (+премии, доплаты, если таковые имеются) и дополнительная заработная плата ($Z_{\text{доп}}$ - 12-20% от $Z_{\text{осн}}$).

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} \quad (4.8)$$

Расчет величины основной заработной платы работника производится по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (4.9)$$

Где $Z_{\text{осн}}$ - основная заработная плата одного исполнителя; T_p - продолжительность выполнения работ исполнителем, раб.дн.; $Z_{\text{дн}}$ - среднедневная заработная плата

Месячный должностной оклад исполнителя работ:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (4.10)$$

Где $Z_{\text{тс}}$ - заработная плата по тарифной ставке, руб; $k_{\text{пр}}$ - премиальный коэффициент (0,3 от $Z_{\text{тс}}$); $k_{\text{д}}$ - коэффициент доплат и надбавок (в НИИ и на предприятиях – 15-20 % от от $Z_{\text{тс}}$); $k_{\text{р}}$ - районный коэффициент (1,3 – Томск).

Расчет дополнительной заработной платы производится исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{доп}} = Z_{\text{осн}} \cdot k_{\text{доп}}, \quad (4.11)$$

где $k_{\text{доп}}$ - коэффициент дополнительной заработной платы (0,12 – 0,15).

Результаты расчетов основной и дополнительной заработной платы сведены в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 – Расчет основной и дополнительной заработной платы

	Научный руководитель	Студент
Заработная плата по тарифной ставке - $Z_{\text{тс}}$, руб	26300	1484
Премиальный коэффициент, $k_{\text{пр}}$	0,3	-
Коэффициент доплат и надбавок, $k_{\text{д}}$	0,15	-
Районный коэффициент, $k_{\text{р}}$	1,3	1,3
Месячная заработная плата - $Z_{\text{м}}$, руб	49575,5	1929,2

Продолжение таблицы 4.6

Среднедневная заработная плата исполнителя	2253,43	87,69
Продолжительность выполнения работы T_p , раб.дн.	11	40
Основная заработная плата исполнителя, руб.	24787,7	3507,6
Коэффициент дополнительной ЗП, $k_{доп}$	0,15	-
Дополнительная заработная плата исполнителя, руб.	3718,1	-
Итого $Z_{зп}$, руб	28505,9	3507,6
Затраты на заработную плату	32013,5	

Данные об окладе научного руководителя взяты из документа «Должностные оклады ППС и педагогических работников с 01.06.2016» [37]. Данные о стипендии студента [38].

4.3.1 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (4.12)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчисления на уплату во внебюджетные фонды. На 2014 год в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30 %.

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представлять в табличной форме (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнители	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды
Руководитель	24787,7	3718,1	8551,74
Студент	3507,6	-	1052,28
		Итого	9604,02

4.3.2 Накладные расходы

Накладные расходы рассчитываются по формуле

$$Z_{\text{накл}} = (\sum \text{статей}) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (4.13)$$

Где $k_{\text{нр}}$ - коэффициент, учитывающий накладные расходы. Данную величину берем в размере 16 %

Накладные расходы составят

$$Z_{\text{накл}} = (3192804,52) \cdot 0,16 = 510848,72 \text{ руб.}$$

4.3.4 Формирование бюджета затрат научно-исследовательской работы

Смета затрат приведена в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Смета затрат НИИ

№ статьи расходов	Наименование статьи расходов	Сумма, руб	Примечание
1	Материальные затраты НИИ	43187	Пункт 4.3.1
2	Затраты на специальное оборудование	3108000	Пункт 4.3.2
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей	28295,3	Пункт 4.3.3
4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей	3718,1	Пункт 4.3.3
5	Отчисления во внебюджетные фонды	9604,02	Пункт 4.3.4
6	Накладные расходы	510848,72	16 % от суммы ст.1-5
	Бюджет затрат проекта	3192804	Сумма ст.1-6

В связи с тем, что испытательная установка находится в лаборатории ТПУ, статью 4 не учитывать при составлении сметы. Исходя из этого, пересчитаем таблицу 4.8.

Таблица 4.9 – Уточнённый расчёт сметы

№ статьи расходов	Наименование статьи расходов	Сумма, руб	Примечание
1	Материальные затраты НТИ	43187	Пункт 4.3.1
2	Затраты по основной заработной плате исполнителей	28295,3	Пункт 4.3.3
3	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей	3718,1	Пункт 4.3.3
4	Отчисления во внебюджетные фонды	9604,02	Пункт 4.3.4
5	Накладные расходы	510848,72	16 % от суммы ст.1-4
	Суммарная себестоимость проекта	84804,42	Сумма ст.1-5

При выполнении данной части работы был посчитан бюджет на проведения ВКР. Были составлены сметы затрат учитывающие затраты на реализацию данного проекта. Общий бюджет затрат на реализацию проекта составил 3192804 руб. Полученная сумма включает в себя затраты на покупку специального оборудования. Так как данное оборудование располагается в лаборатории нет необходимости его закупки. Исходя из этого, себестоимость проекта без учета стоимости оборудования составляет 84804,42 руб.

4.4 Определение ресурсной эффективности исследования

Под эффективностью научных исследований понимается их результативность, эффект, отдача, т.е. возможность полезного для общества использования полученных при проведении исследований конечных результатов. При этом подразумевается возможность количественной оценки этой результативности, а также соизмерение ожидаемых выгод от использования полученных результатов с затратами на проведение научных исследований. [39]

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. произведем оценку ресурсоэффективности научной разработки.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (14)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Таблица 4.10 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Термический метод	Вибрационный метод	Электрогидроимпульсный метод
Критерии				
Надежность работы	0,139	5	3	4
Габаритные размеры	0,184	3	5	5
Технические характеристики	0,158	4	4	5
Ремонтопригодность	0,186	4	4	4
Простота изготовления	0,222	4	3	3
Простота обслуживания	0,111	3	4	4
ИТОГО	1	3,83	3,83	4,17

Результаты анализа показали, что внедрение и эксплуатация электрогидроимпульсного метода позволит улучшить качественные показатели снятия внутренних механических напряжений в сварных трубах. Тем самым увеличить конкурентоспособность выпускаемой продукции.