

УХТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов»

На правах рукописи



СЕМИТКИНА ЕКАТЕРИНА ВЛАДИМИРОВНА

ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ
ПАРАМЕТРОВ МУФТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ИЗ МАТЕРИАЛА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ
ДЛЯ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов,
баз и хранилищ

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р ф.-м. наук, профессор
Владимир Орович Некучаев

Ухта – 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 НАДЕЖНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ.....	10
1.1 Промысловые трубопроводы.....	10
1.2 Причины отказов на промысловых трубопроводных системах и способы их предотвращения.....	12
1.3 Соединения промысловых трубопроводов.....	18
1.4 Муфтовые соединения трубопроводов.....	22
1.5 Об изучении материалов с ЭПФ.....	24
1.6 Выводы по главе I. Цель и задачи исследования.....	30
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ТН-1 ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ.....	33
2.1 Свойства и характеристики материала с ЭПФ.....	33
2.2 Описание экспериментальной установки.....	35
2.3 Методика проведения эксперимента.....	38
2.3.1 Этап 1 – Определение характеристических температур образцов.....	40
2.3.2 Методика расчета деформационных параметров при проектировании ТМС.....	45
2.3.3 Этап 2 – Определение реактивных напряжений.....	47
2.4 Математическое планирование эксперимента.....	51
2.5 Математическая модель и регрессионный анализ экспериментальных данных.....	59
2.6 Выводы по главе II.....	63
ГЛАВА 3 АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК.....	65

3.1 Аналитический метод решения	65
3.1.1 Цилиндрическая муфта.....	65
3.1.2 Определение напряжений и перемещений в системе «муфта –труба»	67
3.1.3 Расчет на прочность системы «муфта –труба»	70
3.1. 4 Цилиндрическая ступенчатая муфта.....	74
3.1.5 Результаты расчётов цилиндрической муфты	80
3.1.6 Результаты расчётов цилиндрической ступенчатой муфты	84
3.2 Численная методика определения НДС термомеханических соединений. Разработка конечно-элементной модели	90
3.2.1 Моделирование геометрии термомеханического соединения	90
3.2.2 Трёхмерное моделирование конструкций	92
3.2.3 Создание конечно-элементной сетки	96
3.2.4 Задание граничных условий и контактных пар	96
3.2.5 Обработка полученных результатов	98
3.4 Сопоставление аналитических и численных методов решения задач деформирования цилиндрических оболочек. Вывод критерия обжимной жесткости	102
3.5 Вывод по главе III	105
ГЛАВА 4 ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ, СБОРКА И ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ МУФТ ИЗ НИКЕЛИДА ТИТАНА.....	107
4.1 Низкотемпературное деформирование муфтовых конструкций	107
4.1.2 Алгоритм определения тепловой энергии при дорновании ТМС	111
4.1.3 Выбор смазочных материалов для дорнования ТМС.....	114
4.2 Технология монтажа термомеханического соединения из NiTi	116
4.3 Выводы по главе IV.....	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	122
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	124
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	137

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Практика наблюдений за эксплуатацией недавно построенных промысловых трубопроводов показывает, что случаи разливов нефти происходят в большей степени в результате разрывов соединительных стыков, их высокоинтенсивного коррозионного разрушения, вызванного несовершенством изоляции. Значительные материальные и человеческие ресурсы затрачиваются на ликвидацию аварий из-за разливов нефти, связанных с порывами зоны стыков трубопроводов, кроме того, наносится необратимый экологический ущерб окружающей природе.

Для повышения отказоустойчивости магистральных и промысловых трубопроводов и снижения уровня рисков негативных последствий в случае их возникновения применяются различные превентивные методы защиты трубопроводов от коррозии, например, использование коррозионностойких труб. Тем не менее, зона соединения таких трубопроводов, впоследствии, при эксплуатации остается недостаточно защищенной.

В тоже время проблема прочного, герметичного и конструктивно не сложного соединения труб, плетей, отдельных участков трубопроводов с эффективной защитой зон их соединений требует своего решения. В связи с этим задача разработки научно обоснованного технического решения по созданию технологичных и эффективных соединений для промысловых трубопроводных систем является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Существенный вклад в обеспечение противокоррозионной защиты промысловых трубопроводов, работающих на территории установок подготовки нефти и пунктов сдачи-приема нефти, внесли многие отечественные и зарубежные ученые и исследователи, среди которых: Г. Л. Агафонова, А. А. Бекбаулиева, Д. А. Болотов, Д. Н. Воронин, С. А. Гуров, П. Ю. Денисов, В. Ф. Зараев, Н. Ю. Сильницкая, С. Г. Низьев, И. А. Щербинин, Фам Хоанг Вьет и др. В частности, в диссертации Н. Ю. Сильницкой приводится методика оценки конструктивной надежности

муфтовых соединений полиэтиленовых трубопроводов, однако в настоящее время большинство промышленных трубопроводов выполнены из металла, поэтому применение данной методики для этих трубопроводов ограничено.

В СП 34-116-97 и ВСН 006-89 имеются требования о проведении мероприятий, обеспечивающих защиту трубопроводов от коррозионного воздействия или сероводородного растрескивания, а также применении труб с внутренним антикоррозионным покрытием, однако рекомендации по проведению антикоррозионных мероприятий по защите сварного шва на стадии проектирования, проведению пусконаладочных работ и последующей эксплуатации, устраняющей влияние высокоагрессивной среды в частности для обеспечения сохранности сварного шва, в полной мере не разработаны.

Однако, вопросам обоснования и выбора рациональных параметров муфтовых соединений из материала с эффектом памяти формы применительно к нефтепромышленным трубопроводам не уделено достаточного внимания, а реализация таких соединений требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Целью исследования является обоснование и выбор рациональных величин основных конструктивных параметров муфтовых соединений из материала с ЭПФ, обеспечивающих их прочность и герметичность для нефтепромышленных трубопроводов, на основе установления закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния как функции изменения температуры.

Задачи исследования:

1. Провести сбор и анализ статистических данных причин отказов на нефтепромышленных трубопроводных системах и обобщить результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученных ранее по рассматриваемой тематике.

2. Выполнить экспериментальные исследования функциональной зависимости деформации, обусловленной ЭПФ, от задаваемой температуры для оценки влияния соотношения концентраций титана и никеля на выбор

рациональных величин параметров муфтового соединения в эксплуатационном интервале температур.

3. Выявить рациональные значения основных параметров обжимного соединения муфты из материала с памятью: технологического зазора между стальной трубой и муфтой из ТН-1 и деформации, вызванной ЭПФ, для обеспечения герметичности термомеханического соединения (ТМС).

4. Разработать конечно-элементную модель предлагаемых конструкций обжимных муфт на основе программного комплекса ANSYS, определить предельно допустимые величины эквивалентных напряжений для заданных значений пределов текучести и прочности материала.

5. Разработать способ создания термомеханического соединения путем низкотемпературного деформирования и предложить рекомендации по технологическому процессу монтажа обжимных муфт для нефтепромысловых систем.

Соответствие паспорту специальности. Тема диссертационного исследования соответствует п.1 «Напряженное состояние и взаимодействие с окружающей средой трубопроводов, резервуаров и оборудования при различных условиях эксплуатации с целью разработки научных основ и методов прочностного, гидравлического и теплового расчетов нефтегазопроводов и газонефтехранилищ», п.3 «Разработка научных основ и усовершенствование технологии трубопроводного транспорта газа, нефти и нефтепродуктов, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта», п.7 «Исследования в области ресурса трубопроводных конструкций, в том числе прогнозируемого при проектировании и остаточного при их эксплуатации» области исследований паспорта специальности 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ».

Научная новизна исследования:

1. Установлены зависимости деформационных откликов ряда образцов из никелида титана от температур фазовых превращений, на основе которых выбран наиболее подходящий сплав для температурных условий эксплуатации ТМС.

2. Получены зависимости изменения коэффициентов загруженности муфтовых соединений из никелида титана от величин проектировочных параметров, которые позволяют выбрать рациональные значения технологического зазора между стальной трубой и муфтой из никелида титана и деформации, вызванной ЭПФ, для обеспечения герметичности ТМС.

3. По результатам численных экспериментов с применением разработанной модели получены зависимости возникающих эквивалентных напряжений в муфте из никелида титана и соединяемых частях от величины деформации, обусловленной эффектом памяти формы, значения которых не превышают предела прочности и текучести материала, что указывает на сохранение целостности и надежности системы «труба-муфта» для эксплуатационного интервала температур.

4. Обоснован критерий обжимной жесткости системы «муфта – труба», характеризующий функциональное состояние контактной зоны элементов системы, позволяющий оценить степень обжатия термомеханического соединения на трубопроводе.

Теоретическая и практическая значимость работы. Установлены зависимости деформационных откликов и реактивных напряжений сплава ТН-1 для различных концентраций титана и никеля, позволяющие выбрать оптимальный состав сплава для заданного интервала температур эксплуатации муфтового соединения.

Получены уравнения для расчета технологических параметров двух вариантов соединения обжимных муфт из материала с памятью для промышленного трубопровода и запорной арматуры.

Представлены результаты моделирования распределения возникающих напряжений в муфте из материала с памятью и соединяемых частях в зависимости от величины деформации, обусловленной эффектом памяти формы (ЭПФ).

Предложен и обоснован зависящий от конструкционных параметров коэффициент для определения степени обжатия термомеханического соединения «муфта-труба».

Результаты диссертационного исследования внедрены в образовательный процесс обучающихся по направлению подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело» (бакалавриат) в рамках дисциплин «Технология трубопроводостроительных материалов» и «Технологии сварки трубопроводов и резервуаров».

Предложены мероприятия по технологическому процессу монтажа термомеханического соединения – муфты из никелида титана, обеспечивающие повышение качества соединения и упрощение процесса сборки.

Разработано новое технологическое решение, защищенное патентом № 2619578. Способ тренировки материала с памятью (способ задания деформации памяти применительно к ТМС).

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач диссертационного исследования используется комплексный подход, включающий научный анализ и обобщение ранее опубликованных исследований, планирование и проведение экспериментальных исследований, измерение, сравнение, компьютерное моделирование.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная модель оценки эквивалентных напряжений и осевых деформаций обжимных муфт трубопроводов позволяет выявлять область рациональных значений основных параметров муфт из материала с эффектом памяти формы как конструктивных элементов промышленных трубопроводных систем, для которых будет обеспечена герметичность и прочность соединения.

2. Предложенный критерий обжимной жесткости системы «муфта – труба», равный произведению отношения модуля Юнга материала с ЭПФ в аустенитном состоянии к модулю Юнга стали на отношение произведения величины деформации, вызванной ЭПФ и величины внешнего радиуса трубы к величине технологического зазора элементов системы «муфта – труба», позволяет оценить степень обжатия термомеханического соединения для различных значений конструктивных параметров с достаточной для инженерных расчетов точностью.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность результатов работы подтверждается корректностью постановки задач исследований; удовлетворительной сходимостью результатов математического планирования с реальными значениями экспериментальных исследований, описанными в научной литературе.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались в рамках международной научной конференции «Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы» (г. Витебск, Беларусь, 2014 г.), международной конференции «Рассохинские чтения» (г. Ухта, 2015-2018 гг.), международной конференции ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ «Материалы для технических устройств и конструкций, применяемых в Арктике» (г. Москва, 2015 г.), XVIII международном семинаре (г. Воронеж, 2017 г.), XVIII международной молодежной научной конференции «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ» (г. Ухта, 2015-2018 г.), межрегиональных вебинарах «Актуальные вопросы нефтегазотранспортной отрасли» (г. Ухта, 2014-2019 гг.).

Сведения о публикациях автора: по теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, из них 3 - в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Министерства науки и высшего образования России.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, одного приложения. Основные материалы работы содержат 137 страниц машинописного текста с учетом приложений, в том числе включают 55 рисунков, 34 таблицы. Список цитируемой литературы состоит из 110 наименований.

Личный вклад соискателя заключается в постановке цели и задачи исследования, изучение отечественных и зарубежных источников соответствующей области науки, проведение теоретических и экспериментальных исследований, анализе полученных результатов, их апробации, подготовки публикаций по выполненной работе.

ГЛАВА 1 НАДЕЖНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Российская Федерация является одним из ведущих игроков на рынке нефтегазового сырья. Перекачиваемый продукт поступает за тысячи километров к потребителю по линиям магистральных и промысловых трубопроводов, которые являются основными рабочими «артериями» в нефтяной промышленности. Они работают непрерывно, обеспечивая энергетические потребности мира.

Современные промышленные трубопроводы обязаны своим появлением нефтяной промышленности, которая, в сегодняшнем мире, постоянно демонстрирует тенденции к развитию.

Для России, с ее суровым климатом и гигантскими расстояниями, нефте- и газопроводы являются наиболее используемым материально-техническим ресурсом [45].

Магистральные, нефтепромысловые и технологические трубопроводы являются наиболее важным технологическим оборудованием, выход из строя которых может повлечь за собой серьезные последствия экологического, экономического характера, поэтому необходимо предпринимать меры, обеспечивающие надёжность и бесперебойную работу трубопроводного транспорта в процессе эксплуатации [60, 69].

В Российской Федерации, с её обширным многообразием территорий, используемых нефтегазовым хозяйством, пролегает большое количество нефтегазопромысловых трубопроводов, и поэтому, особенно важное значение имеет повышение качества строительства и безопасной эксплуатации данных объектов промышленного сектора.

1.1 Промысловые трубопроводы

На территории РФ существует множество нефтяных промыслов. Обеспечение их бесперебойной и надежной работы зависит от технического

состояния внутренней транспортной сети. Протяженность сетей промысловых трубопроводов превышает протяженность системы магистральных нефтепроводов.

Трубопровод промысловый – это трубопровод, по которому добытая нефть транспортируется от скважины к центру сбора нефти. Данные трубопроводы предназначены для перемещения нефти от скважины к другим объектам в рамках промысла [75].

Промысловые трубопроводы на нефтяных месторождениях (промысловые нефтепроводы) подразделяются на выкидные линии, нефтяные сборные коллекторы, промысловые газопроводы для сбора нефтяного газа, промысловые ингибиторопроводы, промысловые водопроводы [29].

Выкидная линия предназначена для перекачки продукта добычи (нефти с попутной эмульсией и газом), либо для транспортировки ремонтно-замерочного оборудования к устью скважины (применим при разработке морских месторождений). Выкидные линии имеют протяженность в зависимости от плотности разработки месторождения — от нескольких метров до нескольких километров.

Нефтяные сборные коллекторы — (нефтегазосборный трубопровод) промысловый нефтепровод от автоматизированной групповой замерной установке (АГЗУ), групповой замерной установке (ГЗУ) до центрального пункта сбора, дожимной насосной станции, установки по подготовке нефти.

Трубопроводы выкидных линий, а затем нефтяные сборные коллекторы применяются для транспортировки продукта добычи от скважины к центральному пункту сбора нефти насосной перекачивающей станции (НСП) [29].

Прочность является одним из главных требований к трубопроводным соединениям.

Надёжная эксплуатация промысловых трубопроводных систем определяется сочетанием большого количества факторов.

Основными из них являются:

- агрессивность транспортируемой среды;

- наличие напряжений в стенках трубопровода (циклические нагрузки любого происхождения (давление внешних нагрузок в осевом и поперечном направлениях));
- присутствие заводских дефектов;
- воздействие природно-климатических факторов и т.д.

1.2 Причины отказов на промышленных трубопроводных системах и способы их предотвращения

Сравнительно небольшой срок безаварийной службы стальных нефтепромысловых трубопроводов является одной из важнейших проблем при их эксплуатации, это обусловлено коррозионной агрессивностью перекачиваемых продуктов.

По данным Всероссийского научно-исследовательского института по строительству и эксплуатации трубопроводов, объектов ТЭК, на промыслах происходит до 40-70 тысяч отказов трубопроводов ежегодно, и 77% отказов промышленных трубопроводов происходит из-за коррозии материала труб, в то числе в местах сварного шва [14].

На рисунке 1.1 показаны дефекты сварных соединений промышленных трубопроводов.



Рисунок 1.1 – Коррозионное разрушение металла в местах сварных швов на трубопроводе

По данным технических отчетов отказов промышленных систем ООО «Самарский ИТЦ» выявлено, что при агрессивных условиях эксплуатации основным фактором, оказывающим влияние на образование дефектов и дальнейших отказов, является либо некачественный материал трубопровода и запорной арматуры, либо, нарушение или несовершенство технологического процесса сборки трубопроводной сети, которое обуславливает наличие крупных включений, а также пор, инициирующих развитие локальной коррозии [19].

Низкая коррозионная надежность материалов, применяемых для изготовления труб, является основной причиной отказов и повреждений нефтепромысловых трубопроводов.

Существующие направления увеличения ресурса безотказной работы трубопроводов отражены в научной и отраслевой литературе, однако в них не уделено достаточного внимания защите соединений от эксплуатационного воздействия. [15, 24, 41, 101, 102].

Одно из направлений связано с использованием труб из полимерных и композиционных материалов, но при этом рабочие давления приходится существенно снижать по сравнению со стальными трубопроводами, так как, известно, что прочность полимерных материалов ниже прочности стали [82].

Использованием труб из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, который менее подвержен коррозии по сравнению со сталью – это еще одно направление. На настоящий момент уже проведены лабораторные и стендовые испытания, проводятся промышленные испытания. [82].

Другим перспективным направлением является санация стальных трубопроводов путем введения внутрь защитной оболочки из полимерных материалов, т.е. данная технология относится к бестраншейным, что положительной особенностью. Недостатки этой технологии связаны с соединением отдельных восстановленных участков в единый трубопровод, с поддержанием формы внутренней оболочки в устойчивом состоянии, и диагностикой, и ремонтом восстановленного трубопровода.

Стальных трубы, футерованных полиэтиленом, в настоящее время активно внедряются, однако также остаются проблемы надежного соединения труб, обслуживания и ремонта трубопроводов [82].

От действия сварочной дуги и высоких температур любое покрытие разрушается, а полимерное покрытие выгорает. Не смотря на всё большую тенденцию применения превентивных средств защиты от коррозии (использование труб, обладающих повышенной стойкостью в коррозионно-активных средах) для промышленных трубопроводов, при монтаже и таких труб зона сварного стыка остается недостаточно защищенной, и это минимизирует эффект от их применения.

В виду агрессивности транспортируемой среды и других эксплуатационных факторов наиболее уязвимым местом на данных системах трубопроводов выявлены сварные соединения, их интенсивное коррозионное разрушение, вызванное недостаточной изоляцией от окружающей среды.

На начальном этапе, при перекачке газоводонефтяной смеси, от скважины до установок подготовки нефти, транспортируемая среда оказывает разрушительное воздействие на нефтепромысловое оборудование в виду присутствия в ней концентрации агрессивных компонентов, взвешенных частиц, минерализации и рН водной фазы, содержания коррозионно-опасных микроорганизмов.

В результате описанного разрушительного воздействия, необходимость в проведении ремонтных работ возникает уже в первые 5 лет эксплуатации. На промыслах отдельные трубопроводные линии приходится заменять уже через 2-3 года.

В диссертационном исследовании Сильницкой Н. Ю. [69] приводится анализ причин отказов и повреждений на промышленных трубопроводах. Большое количество отказов трубопроводов происходит из-за увеличения обводненности добываемой нефти, (за последние 10 лет скорость коррозии трубопроводов возросла с 0,04 до 1,2 г/м²/час).

Установлено, что 65 % отказов является следствием коррозионных повреждений. Ежегодно в России заменяется 7-8 тыс. км нефтепромысловых сетей, расходуется 400-500 тыс. тонн стали.

Более половины отказов промышленных трубопроводов происходит из-за влияния коррозионных процессов (рисунок 1.2).

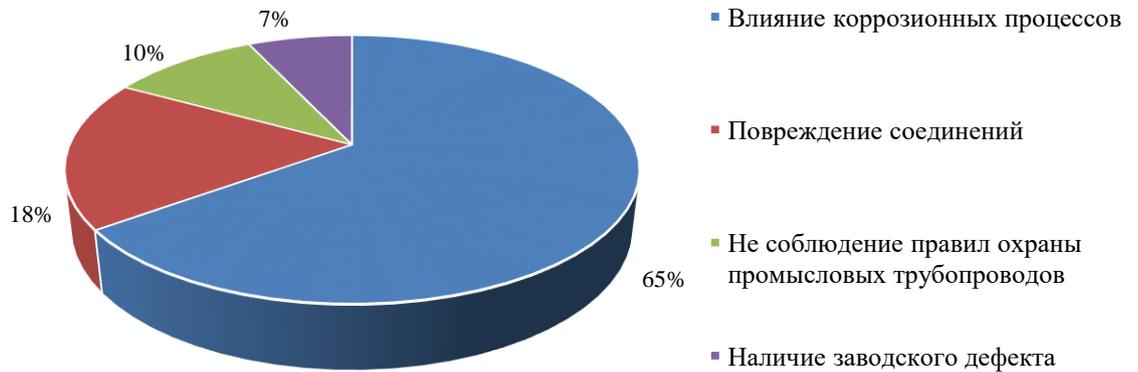


Рисунок 1.2 – Причины отказов промышленных трубопроводов России

Для сооружения промышленных трубопроводов используют трубы, обладающие повышенной стойкостью в коррозионно-активных средах: полиэтиленовые, металлопластовые, стеклопластиковые, а также стальные трубы с внутренним защитным покрытием [15, 41, 24].

Однако, при монтаже таких труб зона сварного стыка остается незащищенной от воздействия перекачиваемого продукта, и это сводит на нет весь положительный эффект от их применения [21].

Основной причиной возникновения отказов является разрушение промышленных трубопроводов в местах их соединений. Ниже (рисунок 1.3) представлен анализ данных об отказах на промышленных трубопроводах в России.

Исследования и анализ причин разрушения промышленных трубопроводов показывают возможность возникновения отказов трубопроводов с выходом (утечкой) транспортируемого продукта.

Проведенный анализ исследований И. А. Щербинина, П. Ю. Денисова, В.Ф. Зараевой, Д. А. Болотова, Г. Л. Агафоновой, М. В. Кузнецова, А. В. Конева, С. Г. Низьева и др., посвященных специфике противокоррозионной защиты

промысловых трубопроводов и оценке прочностной надежности систем трубопроводного транспорта, показывает актуальность выбранной темы исследования [36, 58, 59, 66, 104, 110].

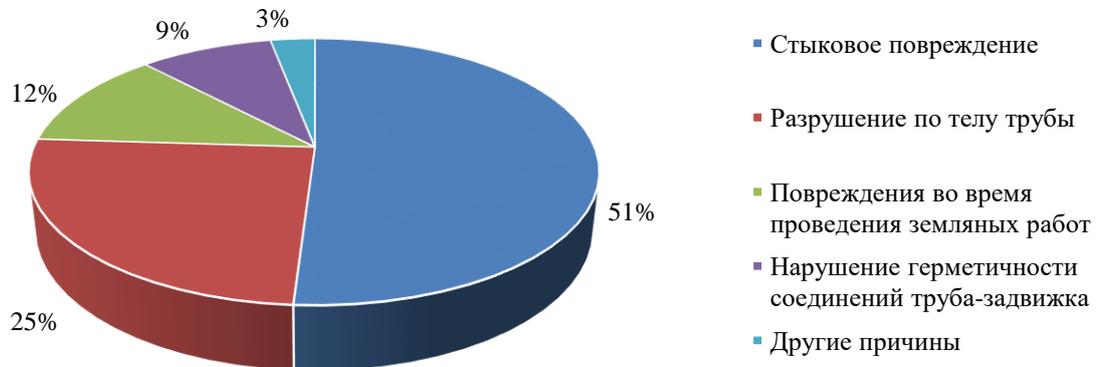


Рисунок 1.3 – Причины разрушения промысловых трубопроводов

На ныне работающих промыслах установки комплексной подготовки нефти и прочие установки в современном представлении имеют достаточно компактное расположение:

- блок напорной гребенки (БНГ) предназначен для распределения пластовой воды по скважинам (давление до 15 МПа) (рисунок 1.4);

- автоматизированная групповая замерная установка (АГЗУ) нефти предназначена для замера дебита скважин и определения процентного состава нефтесодержащей жидкости (давление до 3 МПа) (рисунок 1.5).

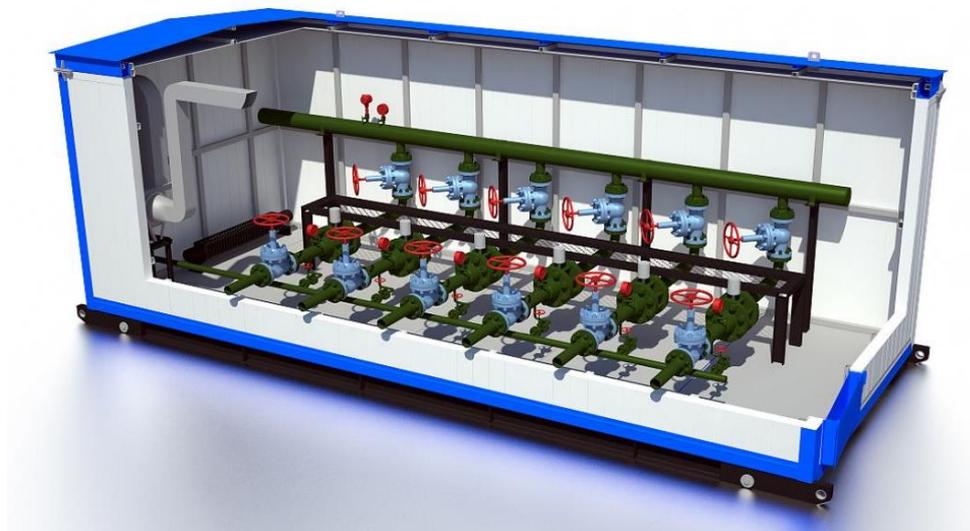


Рисунок 1.4 – Блок напорной гребенки

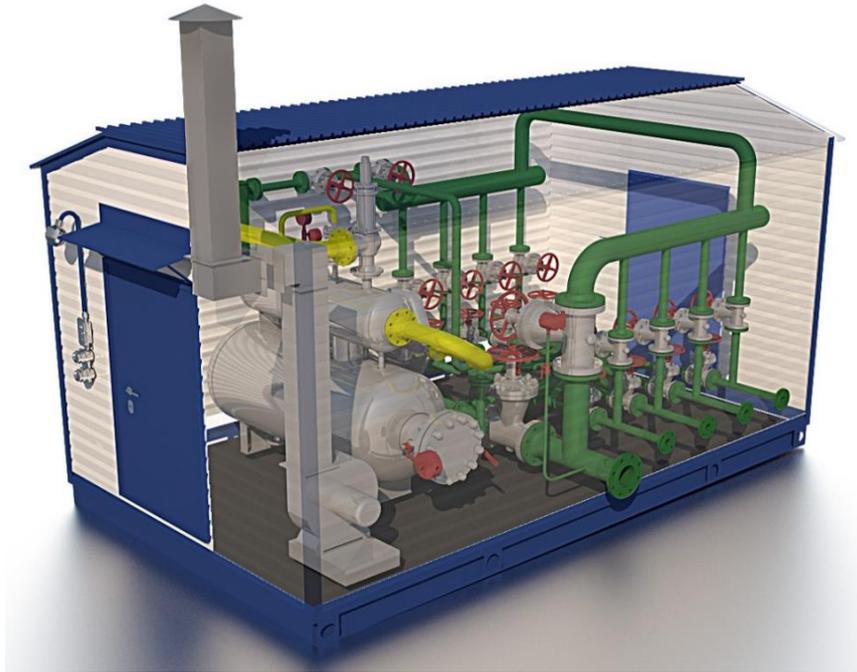


Рисунок 1.5 – Автоматизированная групповая замерная установка

Они имеют модульное исполнение, поэтому сварные работы в них трудно выполнимы, по этой причине может возникать несовершенство технологического процесса монтажа, которое в свою очередь может привести к отказу, а затем к аварии.

Совокупность всех факторов технологического режима работы оборудования (высокое давление, расход технологических жидкостей потока, коррозионная активность перекачиваемого продукта), а также трудоемкость сварки трубопроводов высокого давления приводит к повреждению и дальнейшему разрушению сварных соединений, к выходу из строя оборудования, разрушительному влиянию на экологию, и дальнейшим финансовым затратам.

Видно, что подавляющее большинство отказов на промышленных трубопроводах происходит из-за коррозионного воздействия на материал труб. Эту проблему решают применением различных превентивных мер, существует множество исследовательских работ на данную тематику.

Несмотря на это, аварийные ситуации всё же происходят на трубопроводах. Основной причиной отказов является разрушение в местах их соединений. От правильного выбора соединения трубопроводов зависит прочность и

долговечность работы всей промышленной трубопроводной сети при его эксплуатации.

Создание технологии и конструкции, способных решить проблему разрушения соединений трубопроводов при наличии перечисленных факторов, а также обеспечивающих качество и надежность соединения является актуальной задачей.

1.3 Соединения промышленных трубопроводов

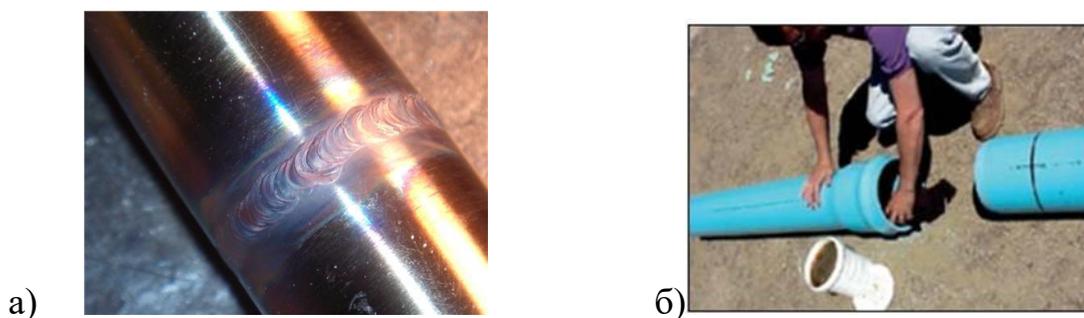
Анализ литературных источников [17, 63, 64, 71, 75, 84] позволяет выделить классификацию промышленных трубопроводов (ПТ) по способу соединения:

- разъемные (фланцевое, резьбовое, рисунок 1.6);
- неразъемные (сварные, склеенные, рисунок 1.7).



а - фланцевое; б - резьбовое и резьбовое муфтовое соединение

Рисунок 1.6 – Разъемные соединения промышленных трубопроводов



а - сварное соединение; б - склеивание промышленных трубопроводов

Рисунок 1.7 – Неразъемные соединения промышленных трубопроводов

Фланцевое соединение — наиболее распространенный способ стыковки стальных промышленных трубопроводов между собой, представляет собой две плоские стальные пластины, имеющие форму кольца. В средней части каждой пластины расположено отверстие под вставку торцевой части трубы, а по ее контуру — несколько равноудаленных отверстий под установку болтов либо шпилек, которые впоследствии фиксируются гайками.

Фланцевые соединения являются быстроразъемной альтернативой сварной стыковки. При монтаже торец трубы приваривается к пропускному отверстию фланца, после чего пластины стягиваются между собой. Герметичность соединения достигается за счет использования уплотнительных прокладок из резины либо фторопласта.

Также фланцевые соединения используются для соединения трубопроводов с насосными и компрессорными агрегатами, сосудами, работающими под давлением, а также с другим технологическим оборудованием. В таком случае на концы труб наваривается фланец, к которому подводится заборный патрубок оборудования [38, 72, 86].

К недостаткам данного вида соединений относятся: трудоемкость монтажных работ; сравнительно высокая стоимость; низкая надежность при использовании из-за плохой устойчивости к температурным перепадам и изменению давления (если среда, которая транспортируется по трубам, будет подвергаться перечисленным изменениям, то фланцевые соединения существенно ослабнут, это в свою очередь может привести к возникновению протечки); габаритные размеры, которые не удобны для современных модульных установок.

Резьбовое соединение предназначено для невысокого давления, используются на буровых установках, для соединения насосно-компрессорных труб.

Осуществляется как путём непосредственного соединения трубных изделий между собой, так и через резьбовые тройники, переходники, краны, муфты и прочие дополнительные приспособления.

Недостатки резьбовых соединений между трубами: при отсутствии резьбы на изделии могут возникнуть сложности с её нанесением, и для этого возникает необходимость в специальных инструментах; быстрый износ резьбы при частом разборе и сборе соединения; в ряде случаев возникает потребность в применении средств стопорения, препятствующих постепенному самоотвинчиванию резьбы.

Главный недостаток резьбовых соединений – наличие большого количества концентраторов напряжений на поверхностях резьбовых деталей, которые снижают их сопротивление усталости при переменных нагрузках.

При монтаже труб в коррозионностойком исполнении (из высокопрочного чугуна, стальных с внутренними покрытиями из полимерных материалов), а также труб из разнородных материалов, когда монтаж их традиционными методами, в частности с помощью сварки, затруднен или невозможен, используют клеевые соединения. В настоящее время в нашей стране и за рубежом эксплуатируется целый ряд трубопроводов из стальных, чугунных, поливинилхлоридных и стеклопластиковых труб, монтаж которых осуществлен с помощью полимерных клеев [64].

Склеивание позволяет создавать принципиально новые инженерные конструкции, оно имеет множество преимуществ по сравнению с другими технологиями соединения (низкая затраты и простота осуществления технологии; отсутствие необходимости в использовании дополнительного оборудования).

К недостаткам клеевых соединений относится сравнительно невысокая прочность, в особенности при неравномерном отрыве, низкая долговечность некоторых клеев, низкая теплостойкость, необходимость в установке приточно-вытяжной вентиляции; для большинства соединений требуется нагрев, сжатие и длительная выдержка соединяемых деталей.

Наиболее популярным вариантом неразборного соединения трубопроводов является сварка.

Сварка – это огнеопасный и технологический сложный процесс, который проводится как на специализированных участках, так и на изделии. Тем не менее, для такого общепринятого вида имеются ограничения:

1. Соединяемые элементы должны быть изготовлены из одинакового материала или близкого по химическому составу;
2. Не образовывать хрупких или интерметаллических соединений в процессе кристаллизации расплава сварного шва;
3. Толщина соединяемых элементов должна отличаться не более чем на 25%;
4. Предельные отклонения контактируемых свариваемых элементов должны находиться в пределах 3 качества.

На промыслах внутреннее давление составляет порядка 15-20 МПа, при этом проводится специализированная сварка для соединения высоконапорного оборудования и трубопроводов.

Высоконапорные трубопроводы требуют выполнения особых условий сварки и контроля качества, они вызваны технологическими затруднениями вследствие больших толщин стенок труб при сравнительно малых диаметрах. При этом необходимо обеспечивать получение высоких механических свойств сварного шва при нормальных, отрицательных и повышенных температурах транспортируемой по трубопроводу среды, а также шва, стойкого против коррозии. При сварке труб из некоторых марок стали, а также толстостенных труб вследствие высоких температур происходит изменение структуры металла шва и околошовной зоны основного металла, возникают внутренние термические напряжения и, как следствие, ухудшаются механические свойства сварного соединения [73].

Для защиты сварного шва, а также проведения антикоррозионных мероприятий действующие нормы проектирования для данных трубопроводных систем не имеют четкой формулировки (таблица 1.1).

Все виды трубных соединений являются востребованными, и выбор того или иного метода в конкретной ситуации зависит от ряда факторов, таких как технические возможности, материал изготовления, наличие необходимых навыков, инструментов, потребность в тех или иных свойствах соединения и т. д.

Таблица 1.1 – Действующие нормы проектирования для промышленных трубопроводных систем

СП 34-116-97 «Инструкция по проектированию, строительству и реконструкции промышленных нефтегазопроводов»:	
- При проектировании трубопроводов, предназначенных для транспортирования газа, нефти и нефтепродуктов, оказывающих коррозионные воздействия на металл и сварные соединения труб и арматуру, установленную на трубопроводах, необходимо предусматривать мероприятия, обеспечивающие защиту трубопроводов от коррозионного воздействия или сероводородного растрескивания	Нет конкретных указаний на проведение антикоррозионных мероприятий;
- Трубопроводы нефтесбора нефтяных месторождений, а также трубопроводы систем заводнения нефтяных пластов и систем захоронения пластовых и сточных вод в глубокие поглощающие горизонты, нефтепроводы для транспортирования товарной нефти от ЦПС до сооружений, магистрального транспорта, должны выполняться из труб, имеющих внутреннее антикоррозионное покрытие.	Сварное соединение не защищено.
ВСН 006-89 «Строительство магистральных и промышленных трубопроводов. Сварка»	Нет указаний для защиты сварного шва.

Очевидно, что перечисленные способы создания соединений имеют ограничения в применении к промышленным трубопроводам, поэтому актуальным остается вопрос о создании прочного, герметичного и конструктивно не сложного соединения труб, плетей, отдельных участков трубопроводов с эффективной защитой зон их соединений.

В настоящий момент безогневое соединение труб оказывается альтернативой сварочной технологии монтажа трубопроводов. Эти решения реализуются в муфтовых и прочих соединениях [82].

1.4 Муфтовые соединения трубопроводов

На основании информации, полученной путем анализа научно-технической литературы, содержащий в себе актуальные решения по методам монтажа и ремонта трубопроводов, можно заключить, что качество эксплуатации соединения можно существенно повысить путем проведения мероприятий по защите соединения и ли применения безогневой технологии.

Муфтовые соединения – это наиболее перспективный вид соединений трубопроводов. Они обеспечивают высокую герметичность и надежность, а также обладают сравнительно низкой трудоемкостью их изготовления. В отечественной промышленности изготовление муфтовых соединений осуществляется в основном сваркой и пайкой, а также обеспечивается обжатием муфты специальным оборудованием. Качество такого соединения зависит от конструкции соединительной муфты (с проточкой, рельефом, выступом, резьбой и пр.), наличия вкладыша (втулки), качества герметика, а также определяется технологическими параметрами применяемого оборудования.

Основными преимуществами метода муфтового соединения являются: легкость и всесезонность технологии, высокая производительность прокладки трубопровода. Муфтовая технология не требует высокой квалификации рабочих, а также проведения неразрушающего контроля.

Постоянное совершенствование и развитие технологий соединений необходимо для увеличения ресурса работы трубопроводов.

Для промысловых нефтепроводов необходимо создание такой конструкции соединения, которая обеспечила бы возможность:

- противодействия агрессивной среды;
- обеспечения прочности и герметичности трубопровода при действии различных других факторов: внутреннего давления, осевой нагрузки, изгибающих и крутящих моментов, в том числе, действующих в статическом и циклическом режимах;
- совершенствования процесса монтажа [13].

Одним из новых ресурсосберегающих направлений обеспечения безопасной эксплуатации трубопроводов и повышения их долговечности является разработка быстросрабатываемого функционального устройства для соединения трубопроводов и запорной арматуры, не подверженных коррозии внутренней поверхности трубопровода, позволяющие увеличить срок эксплуатации промысловых систем.

1.5 Об изучении материалов с ЭПФ

Стремительное развитие промышленности, медицины, строительных технологий ведет к необходимости создания новых материалов, что создает возможность для развития существующих технологий.

Современная наука открывает материалы, с уникальными свойствами, которые позволяют металлам осуществлять функции других материалов или даже механизмов.

Одним из относительно новых материалов настоящего времени является группа сплавов, обладающих способностью к формовосстановлению. Они достаточно хорошо изучены и зарубежными, и отечественными учеными и имеют все шансы занять свою нишу в производственной деятельности человека.

Известно, что пластическая деформация кристалла металлов и их сплавов происходит за счёт движения дефектов кристаллической решетки различной природы. Существует мнение, что неупругие деформации в кристаллах необратимы.

Данное представление об упругопластических свойства кристаллов является традиционным и требует пересмотра в виду проводимых исследований последнего времени.

Установлено, что существует десяток металлических материалов с памятью формы, которые после значительного неупругого деформирования способны полностью восстанавливать форму.

Физико-механические свойства сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) обратили на себя внимание ещё в прошлом столетии. За прошедшее время был открыт, изучен и сформирован большой класс новых функциональных материалов, которые имеют способность восстанавливать большие неупругие деформации.

Сплав, наделенный способностью после значительных пластических деформаций восстанавливать первоначальную форму при нагреве до определенной температуры, был предложен советскими учеными

Г. В. Курдюмов и Л. Г. Хандорсон в 1948 г. Уже позже это изобретение было признано открытием и стало известно, как эффект Курдюмова.

В 1958 г. впервые был получен сплав с эффектом памяти формы – нитинол. Нитинол (никелид титана) — это сплав никеля и титана.

Известно, титан и его сплавы целесообразно применять для изготовления оборудования, подверженного действию коррозии и солёных вод. Применение сплавов титана для изготовления составных частей, контактирующих с нефтью и нефтепродуктами, позволит значительно реже производить их замену.

Высокая коррозионная стойкость данного сплава в агрессивных средах позволяет применять его в нефтяном и химическом машиностроении [97].

Описываемый эффект памяти формы реализуется следующим образом: предварительно заготовке, например, проволоке, придают требуемую форму, затем ее нагревают и охлаждают, после чего её выпрямляют. При последующем нагреве проволока обязательно примет свою первоначальную конфигурацию (рисунок 1.8).

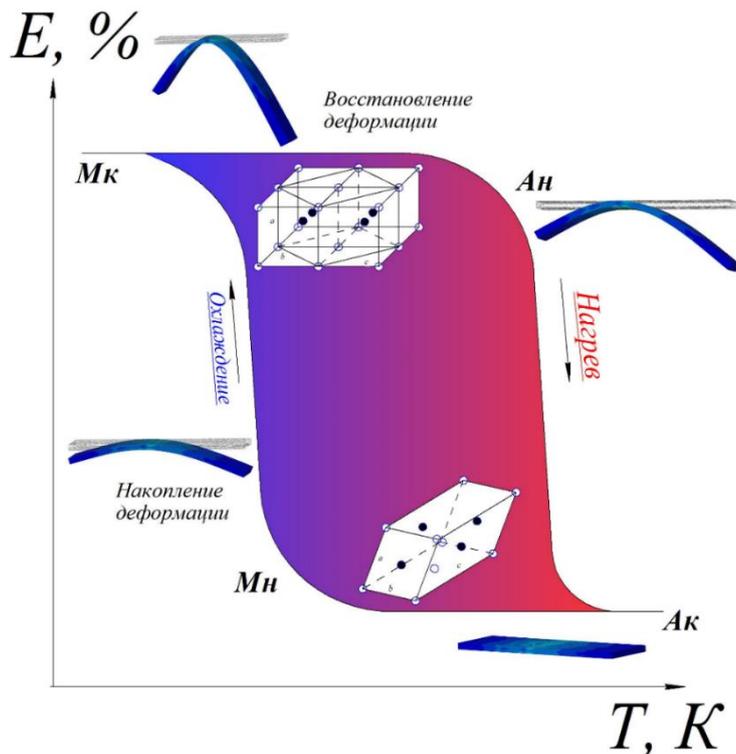


Рисунок 1.8 – Инфографика ЭПФ

Явление самопроизвольного формовосстановления – эффект памяти формы – наблюдается как в изотермических условиях, так и при изменении температуры – нагревании и охлаждении.

В группе материалов с ЭПФ наиболее перспективны сплавы на основе никелида титана, которым характерно удачное сочетание свойств – высокий уровень механических, коррозионных и термомеханических характеристик, а также высокая термостабильность. Перечисленные свойства, несмотря на сравнительно высокую стоимость сплавов никелида титана, делают их незаменимыми и обуславливают, как в настоящем, так и в будущем их широкое применение в качестве функционального материала нового поколения [16, 22, 57].

Производство сплава никелида титана имеет особенности: для достижения требуемой переходной температуры соотношение никеля и титана в сплаве должно выдерживаться с высокой точностью. Необходимая чистота производства обеспечивается за счет применения вакуумных печей и сложного вспомогательного оборудования. Поэтому широкое применение нитинола лимитируется его высокой стоимостью, а иногда и пассивностью мышления. Снижение стоимости производства нитинола является основной трудностью перед началом массового производства. И некоторые фирмы, например, «Special Metals Corporation» (США), намерены приступить к промышленному производству нитинола с приемлемой коммерческой стоимостью.

В России на сегодняшний день существует небольшое количество производств, занимающихся производством не только самого материала с памятью, но и изготавливающих из него устройства для разных сфер деятельности человека.

Физико-механический аппарат для описания свойств материалов с МН (мартенситная неупругость) в терминах инженерной механики появился относительно недавно. С появлением структурно-аналитической теории прочности В. А. Лихачева– В. Г. Малинина возникла возможность описывать поведение материалов в условиях проявления МН.

К настоящему времени выполнено большое количество научных работ отечественных и зарубежных авторов, таких как: В. А. Лихачёв, А. И. Разов, В. Г. Малинин, Ж. М. Бледнова, Н. Н. Реснина, М. А. Хусаинов, В. Э. Гюнтер, Л. Делэя, К. Ооцуки и др., посвященных исследованию уникального явления эффекта памяти формы, а также материалов, обладающих ЭПФ [8, 9, 16, 32, 44, 49, 52, 62, 68, 76, 89, 98, 100, 107, 108].

Основой для теоретических исследований материалов с ЭПФ, послужила математическая модель В. А. Лихачева– В. Г. Малинина, одна из работ В.Г. Малинина посвящена расчёту напряжённо-деформированного состояния толстостенного цилиндра из материала с эффектом памяти формы, испытывающего деформацию пластичности превращения.

М. А. Хусаиновым проведен анализ физических и механических свойств сплавов TiNi с памятью формы по результатам экспериментальных исследований гистерезисов мартенситных превращений. Установлено, что сплав TiNi является наиболее предпочтительным для изготовления рабочих элементов с памятью формы.

В работах А. И. Разова экспериментально подтверждена надежность рабочих элементов из сплавов TiNi, рассчитанных на реализацию эффекта памяти формы, находящихся длительное время во взведенном состоянии в ожидании рабочего цикла.

Методика расчета исполнительного упругого элемента в форме винтовой цилиндрической пружины, выполненного из материала с эффектом памяти формы изложена С. С. Гаврюшиным. Описаны нелинейные уравнения состояния материала, построенные на основе диаграммы фазовых переходов.

Экспериментальными исследованиями механического поведения ЭПФ при термоциклировании через интервалы МП занималась Ухтинская школа исследователей в составе И. Н. Андропова, Н. П. Богданова, Н. А. Северовой, М. Н. Коновалова, С. В. Крючкова, Р. А. Вербаховской, С. К. Овчинникова, С. С. Гаврюшина и другие исследователи [3-14, 22, 25, 37].

Исследователями Ухтинской школы во главе с И. Н. Андроновым были:

– разработаны фундаментальные принципы получения и обработки функциональных и конструкционных материалов с эффектом памяти формы [61];

– исследованы явления мартенситной неупругости при сложном температурно-силовом воздействии [25];

– разработаны методологические основы регулирования фазового состава в тонко-пленочных нанокристаллических покрытиях из TiO_2 с целью управления функциональными свойствами поверхности имплантируемых медицинских конструкций, работающих в контакте с биологическими клетками и тканями [51].

Свойство "запоминания" материала и последующего нагрева восстанавливаться (воспроизводить) заданную форму выявило перед данными материалами большие возможности. Ранее металлы и сплавы не могли выполнять функции, присущие механизмам или резиноподобным материалам. В таких сплавах подобные способности реализуются за счет эффекта памяти формы. На практике могут быть использованы различные уникальные свойства материалов с ЭПФ, например, эффект изменения формы при изменении температуры или изменяющегося гидростатического давления; способность развивать усилия, которые возникают, как реакция на действия, не дающие восстанавливать форму; эффект многократного изменения формы при изменении температуры [62].

Сплавы с эффектом памяти формы являются типичным примером нового материал, которые необходимо продолжать исследовать для обеспечения стабильной работы элементов с ЭПФ.

Сплавы с ЭПФ как наиболее перспективные материалы уже нашли применение на практике и продолжают внедряться во многие отрасли человеческой деятельности, поэтому важно продолжать проводить исследования основных материаловедческих свойств данных сплавов.

Материалы с ЭПФ эффективно применяются в различных отраслях промышленности при производстве:

- исполнительных и силовых приводов (аварийный выпуск шасси самолета);
- микророботов, манипуляторов;
- разворачивающихся антенн и мачт, технологической оснастки;
- тепловых двигателей для преобразования тепловой энергии в механическую;
- автоматических датчиков, клапанов, переключателей, предохранителей;
- соединительных элементов различных конструкций и назначения;
- разъемных и неразъемных соединений трубопроводов различного назначения [16];
- разных медицинских протезов (стержень Харинтона для коррекции искривления позвоночника, искусственные суставы, пластины для соединения костей, дуги для исправления положения зубов) [76, 108].

Данный материал был использован для изготовления муфты для соединения трубопроводов гидросистем реактивного истребителя; также материал применялся для изготовления стопора для неподвижного соединения деталей, когда невозможно осуществить какие-либо действия на противоположной стороне скрепляемых частей, например, герметичный пустотелой конструкции; еще одно применение в качестве зажимного приспособления для крепления неподвижных деталей типа скоб или уплотнений.

Отсутствие прикладных методов расчёта соединений является определённым барьером на пути разработки новых перспективных конструкций силовых устройств, то есть практическая необходимость создания этих методов очевидна. Успешное решение этой актуальной проблемы позволит проектировать силовые устройства и ТМС трубопровода с гарантированными эксплуатационными характеристиками при заметном сокращении объема экспериментальных работ и проверочных испытаний.

Учитывая данные физико-механические свойства никелида титана возможно изготавливать обжимные муфты для применения в альтернативных технологиях

сооружения промышленных трубопроводов.

Идея настоящей исследовательской работы состоит в том, чтобы измерив величину деформации образцов из никелида титана, обусловленной ЭПФ, как функцию температуры, подобрать компонентный состав сплава, рассчитать реактивные напряжения в муфте, а также провести аналитические и численные расчеты эквивалентных напряжений для эксплуатационных условий, на основании которых обосновать и выбрать рациональные величины основных конструкционных параметров муфтовых соединений из материала с эффектом памяти формы, а именно, деформации, вызванной ЭПФ, технологического зазора между муфтой и трубой, и критерия обжимной жесткости соединения трубопровода и запорной арматуры.

Такая постановка вопроса чрезвычайно важна, так как предполагаемый технологический режим работы оборудования (высокое давление, температура и расход технологических жидкостей потока) способствует возникновению значительных механических напряжений в металле, которые в сочетании с высокой агрессивностью технологических жидкостей приводит к ускоренной коррозии [17, 64].

В диссертационной работе предложены и исследованы два вида конструкционных соединений, представляющие собой цилиндрические муфты из материала с ЭПФ.

1.6 Выводы по главе I. Цель и задачи исследования

1. На основании обзора и анализа причин отказов на нефтепромысловых трубопроводных системах выявлено, что наиболее подвержены разрушениям места соединения трубопроводов и запорной арматуры ввиду существенного влияния эксплуатационных факторов и окружающей среды.

2. Обзор способов соединения промышленных трубопроводов и запорной арматуры показал, что используемые на данный момент технологии имеют ряд

недостатков, поэтому существует необходимость в создании новых конструкций, позволяющих герметично и прочно осуществлять данные соединения.

3. Показано, что существует ряд уникальных материалов с эффектом памяти формы, которые достаточно хорошо изучены, поэтому уже нашли применение в ответственных устройствах и конструкциях. Использование данных материалов в качестве ТМС трубопроводов являются устоявшейся и наиболее отлаженной в производственном отношении сферой применения сплавов с ЭПФ, что обусловило широкое использование этих соединений в авиакосмической и атомной технике, медицине, судостроении.

4. Установлено, что вопросам обоснования и выбора рациональных параметров соединений из материалов с эффектом памяти формы применительно к нефтепромысловым трубопроводам не уделено достаточного внимания. Данный недостаток предлагается решить путем проведения экспериментальных и аналитических исследований возможности применения материала с ЭПФ в качестве обжимных муфт для нефтепромысловых трубопроводных систем.

На основе приведенных автором выводов по главе 1 сформулированы цель и задачи исследования.

Целью исследования является обоснование и выбор рациональных величин основных конструкционных параметров муфтовых соединений из материала с ЭПФ, обеспечивающих их прочность и герметичность для нефтепромысловых трубопроводов, на основе установления закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния как функции изменения температуры.

Задачи исследования:

1. Провести сбор и анализ статистических данных причин отказов на нефтепромысловых трубопроводных системах и обобщить результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученных ранее по рассматриваемой тематике.

2. Выполнить экспериментальные исследования функциональной зависимости деформации, обусловленной ЭПФ, от задаваемой температуры для оценки влияния соотношения концентраций титана и никеля на выбор

рациональных величин параметров муфтового соединения в эксплуатационном интервале температур.

3. Выявить рациональные значения основных параметров обжимного соединения муфты из материала с памятью: технологического зазора между стальной трубой и муфтой из ТН-1 и деформации, вызванной ЭПФ, для обеспечения герметичности термомеханического соединения (ТМС).

4. Разработать конечно-элементную модель предлагаемых конструкций обжимных муфт на основе программного комплекса ANSYS, определить предельно допустимые величины эквивалентных напряжений для заданных значений пределов текучести и прочности материала;

5. Разработать способ создания термомеханического соединения путем низкотемпературного деформирования и предложить рекомендации по технологическому процессу монтажа обжимных муфт для нефтепромысловых систем.

ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ТН-1 ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ

В данной главе приведено детальное описание экспериментальной установки, позволяющей проводить деформирование осевым напряжением при различных температурно-силовых режимах.

Представлены основные направления экспериментальных и теоретических исследований:

1. Опытные исследования деформационных откликов и характеристических температур сплавов в режиме растяжения при постоянной нагрузке, с целью выбора оптимального и подходящего сплава под условия эксплуатации ТМС;

2. Определение деформационно-силовых характеристик образцов выбранного сплава в условиях жесткости противодействия системы «образец – заземление – контртело», моделирующих эксплуатационные условия;

3. Математическое планирование эксперимента и проведение оценки сходимости результатов математической модели с данными натурального эксперимента.

Подробно описана методика выполнения эксперимента, режим нагружения и термоциклирования, исследуемые образцы.

Обсуждаются полученные результаты измерений технологических параметров проволок ТН-1 с эффектом памяти формы, таких как деформация, вызванная ЭПФ, реактивные напряжения при термоциклировании.

2.1 Свойства и характеристики материала с ЭПФ

В работах И.Н. Андропова [3, 5, 7, 8, 9, 91, 99] показано, что термоциклирование материалов с ЭПФ в нагруженном состоянии через интервалы мартенситных переходов сообщает материалу свойство обратимого формоизменения, которое проявляется при нагревании в виде эффекта памяти

формы и эффекта пластичности прямого превращения (ППП) при охлаждении. Это позволяет предположить, что данный материал может быть использован для создания ответственных конструкций, в том числе эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивных сред.

Материалом для исследования был выбран сплав, обладающим ЭПФ, ТН-1 - никелид титана. Обоснованием выбора данного материала служит широкий диапазон температурных переходов, необходимый для эксплуатационных условий термомеханических соединений (ТМС), а также комплекс свойств, делающих его пригодным для практического применения – прочность, пластичность, коррозионная стойкость, [22, 31, 39, 40, 67, 68, 76, 90, 105, 108, 109], что позволяет использовать данные материалы в качестве соединительных муфт для промышленных трубопроводов.

В таблице 2.1 дана краткая характеристика свойств сплава ТН-1.

Таблица 2.1 – Физические свойства никелида титана

Параметры	ТН-1
Плотность, г/см ³	6,45 - 6,50
Температура плавления, С°	1250 - 1310
Коэффициент термического расширения, 10 ⁻⁶ , К ⁻¹	6 – 10,4
Удельное электросопротивление, 10 ⁻⁸ , Ом·м	55 - 60
Коэффициент Пуассона	0,48
Предел прочности (временное сопротивление при растяжении), МПа	600-800
Предел текучести, МПа	400 - 600
Относительное удлинение, %	20-40
ЭПФ: Предельная деформация, при которой происходит полное восстановление формы, %	до 8

Известно [14-16], что для сообщения материалу эффекта многократнообратимой памяти формы достаточно его подвергнуть термоциклам в нагруженном состоянии в интервалах мартенситных переходов. После снятия

нагрузки в мартенситном состоянии металл останется способен демонстрировать явление многократнообратимого формоизменения.

В работах [3, 5-9, 12, 99] исследованы три способа создания ЭПФ.

1. Материал нагружают в мартенситные состояния до некоторого уровня, затем нагревают через интервал обратного мартенситного превращения, в аустенитном состоянии его разгружают и охлаждают до исходного состояния.

2. Материал нагружают в мартенситном состоянии, затем нагревают через интервал обратного мартенситного превращения до аустенитного состояния и охлаждают до исходного состояния.

3. Предварительно нагруженный в мартенситном состоянии, материал разгружают. Затем нагревают через интервал обратного мартенситного превращения до аустенитного состояния в свободном состоянии, где его нагружают и охлаждают нагруженный материал до мартенситного состояния.

Для всех термомеханических режимов нагружения при нагревании экспериментально определяют величину восстанавливаемой, а при охлаждении накапливаемой деформаций.

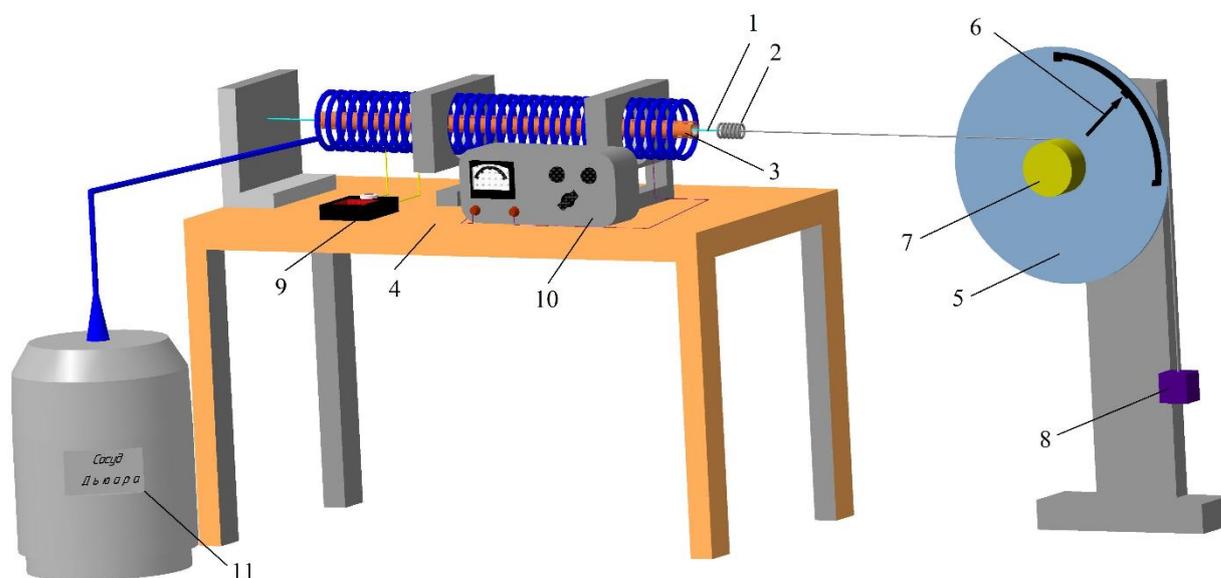
Физические и механические процессы обратимого формоизменения при теплосменах через интервалы МП подробно рассмотрены в работах [23, 91, 103].

Изучение механического поведения сплавов NiTi при термоциклировании позволило выявить самопроизвольное многократное формоизменение материала в процессе циклических изменений температуры ОПФ в интервале МП [6-9, 22, 39, 108]. Эффект приобретает важное значение при использовании материалов с ЭПФ в качестве рабочего тела исполнительных механизмов [23, 37, 108], при создании устройств многоразового действия.

2.2 Описание экспериментальной установки

Для осуществления экспериментальной части работы была использована специальная установка, спроектированная в ФГБОУ ВО «УГТУ» [37, 100].

Схема установки представлена на рисунке 2.1.



- 1 – проволока с ЭПФ; 2 – витая пружина; 3 – нагревательный элемент; 4 – рама;
 5 – силовое устройство; 6 – шкала; 7 – шкив; 8 – груз; 9 – миллиамперметр;
 10 – ЛАТР; 11 – сосуд Дьюара с жидким азотом.

Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки

Образец (проволока с ЭПФ) 1 правым концом закреплен с пружиной 2, а левым концом образец жестко закреплен к станине. Внутри нагревательного элемента 3 помещена рабочая часть испытываемого образца. Осевое нагружение производили следующим образом: к концу троса на силовом устройстве 5 подвешивали груз 8, при этом в тросе, намотанном на шкив 7, возникает растягивающее усилие. Это усилие передается через витую пружину 2 к проволочному образцу с ЭПФ 1.

При помощи электроприбора ЛАТР 10 типа РНО–250–2 производили нагрев, прибор подключается к спирали, намотанной на контур нагревательного элемента 3.

Регистрация температуры в процессе эксперимента проводилась миллиамперметром 9 типа М 253 ГОСТ 8711–93, подключенного к хромель - копелевой термопаре, спай которой подсоединяли к рабочей части проволочного образца с ЭПФ. Время прогрева составило 15–20 минут.

Для определения осевой деформации учитывали "инструментальную" погрешность, связанную с тепловым эффектом установки, которую предварительно находили по следующей методике.

Эталонный образец, выполненный из стали (коэффициент теплового линейного расширения $\alpha=1,06 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$) закрепляли в установку, и определяли дилатограмму от совместного теплового эффекта эталонного образца и установки. Для выделения теплового эффекта установки, из полученной суммарной дилатограммы вычитали дилатограмму эталонного образца. Далее тепловой эффект установки учитывали путем добавления его к обратимым составляющим деформации при растяжении и вычитании при сжатии. Ошибка в измерении осевой деформации составляла $\pm 0.05\%$, а температуры $\pm 1 \text{K}$. В неизотермических опытах изменение температуры проходило со скоростью 10K/мин .

Перед испытанием образцы отжигали в муфельной печи при температуре 550°C в течение 1 ч, а затем охлаждали на воздухе до комнатной температуры.

С целью получения исходных диаграмм осевая деформация – температура, перед проведением эксперимента с каждым образцом проводились 3 – 4 термоцикла в свободном состоянии. Отсутствие остаточных деформационных откликов на исходной диаграмме $\sigma = \sigma(T)$ свидетельствовало о готовности образца к испытаниям.

Деформация образцов проводилась на описанной экспериментальной установке. Образцы нагружали в мартенситном состоянии и термоциклировали под постоянной нагрузкой, низкие температуры достигались охлаждением с помощью жидкого азота. При достижении напряжения, равного фазовой текучести (σ_{fm}), образец деформировался пластически, его длина изменялась, что регистрировалось на шкале.

По формуле (2.1) определяли осевую деформацию проволоки.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

где Δl – изменение длины образца, м.

$$\Delta l = r \cdot \varphi \quad (2.2)$$

r – радиус шкива, м;

φ – угол поворота стрелки при изменении длины образца.

Напряжения определяли по формуле:

$$\sigma = \frac{m \cdot g \cdot R}{S \cdot r} \quad (2.3)$$

где m – масса груза, кг;

g – ускорение свободного падения, $g=9,8 \text{ м/с}^2$;

S – площадь поперечного сечения образца;

R – радиус силового устройства.

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (2.4)$$

где d – диаметр поперечного сечения проволоки, м.

2.3 Методика проведения эксперимента

Эксперимент состоял из 2 этапов:

1. Опытные исследования деформационных откликов и характеристических температур сплавов проводили в режиме растяжения при постоянной нагрузке, с целью выбора оптимального и подходящего сплава под условия эксплуатации ТМС;
2. Определение деформационно-силовых характеристик образцов выбранного сплава в условиях жесткости противодействия системы «образец – заземление–контртело», моделирующих взаимодействие муфты и трубы.

Во время проведения эксперимента образцы в мартенситном состоянии нагружали и термоциклировали под постоянной нагрузкой.

Каждый образец сплава был подвергнут термическим тренировкам через интервалы мартенситных переходов (M_H , M_K , A_H , A_K), т.к. деформационно-силовые характеристики стабилизируются в течении проводимых тренировок.

В каждом случае термоциклирование начиналось в мартенситном состоянии.

Первым этапом эксперимента было изучение деформационного отклика материала без участия контртела.

Для выявления, наиболее подходящего по характеристическим температурам сплава, испытывали 5 образцов (длина рабочей части $L_0=2$ м и диаметр $D_0=0,002$ м) с разным процентным содержанием титана и никеля (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Состав титана и никеля в сплавах ТН-1 и соответствующие им характеристические температуры [33]

№ образца		1	2	3	4	5
Состав, % (ат.)	Ni	47,2	50,0	50,5	50,75	51,0
	Ti	52,8	50,0	49,5	49,25	49,0
Характеристические температуры, °С	M_n	90	50	25	0	-55
	M_k	60	20	5	-20	-90
	A_n	100	55	35	10	-50
	A_k	135	75	60	30	-25

Образец одним концом закрепляется с помощью двух винтов в захвате, жестко соединенном с опорой. Другой конец образца соединяется через переходник со стальным витым тросом, который закреплен на оси шкива измерительной части установки. Основание устройства крепится с помощью юстировочных винтов к станине установки, что позволяет настраивать устройство для образцов различной длины.

Задание образцу предварительной деформации осуществлялось при пониженной температуре, для чего был использован сосуд Дьюара с жидким азотом. В сосуд опускается испаритель – трубка, на которую намотана электрическая спираль. При пропускании тока по спирали азот испаряется и движется по трубке. Другой конец трубки перфорированный по длине, соответствующей длине проволоки, вставлен внутрь нагревателя 3.

Проволоку охлаждали до температуры M_n , т.к. данная температура характеризует минимальное значение фазового предела текучести материала, а значит более податливое его поведение [80].

Температура образца фиксировалась при помощи миллиамперметра, после достижения температуры M_n устанавливали груз 8, который закреплялся на

силовом устройстве 5. Груз растягивал проволоку, задавая ей предварительную деформацию.

Нагрев образца осуществлялся с помощью нагревателя 3, т.е. катушки с регулируемым током.

Деформация, обусловленная ЭПФ, определялась по углу отклонения шкалы 6 при деформации проволоки и радиусу шкива 7, этому соответствует формула (2.1).

При нагреве, в момент, когда происходит восстановление деформации, регистрируется сдвиг стрелки на шкале 6, что означает начало аустенитного перехода (обратного мартенситного превращения).

Охлаждение образца производилось при помощи вентилятора до комнатной температуры около 21°C.

Дальнейшее понижение температуры проводили до конечной температуры мартенситного перехода с помощью сосуда Дьюара.

На 2 этапе опытов в экспериментальной установке использовали витые стальные контрпружины, которые одним концом прикреплялись к проволоке из никелида титана, а другим к стальному тросу.

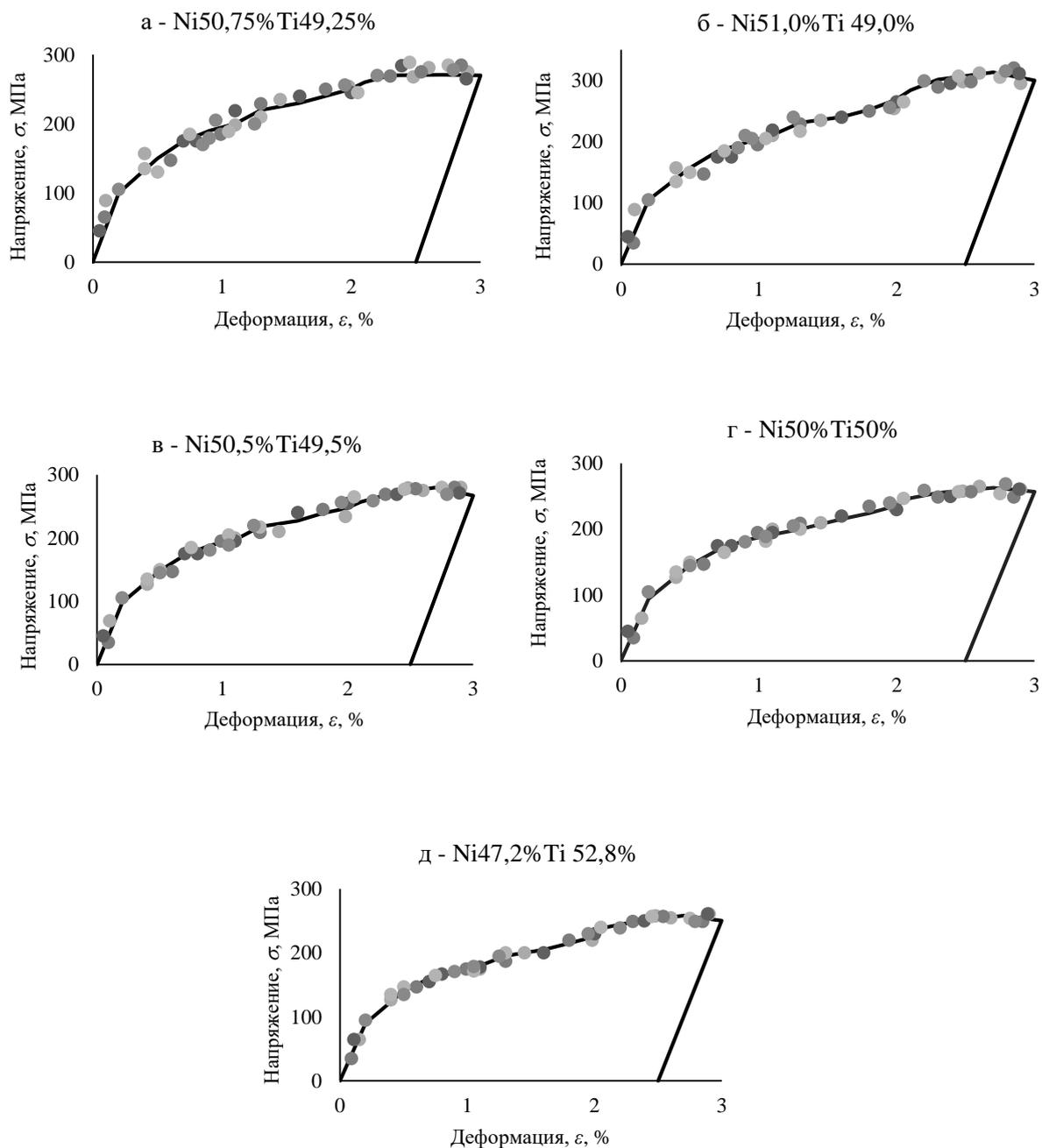
2.3.1 Этап 1 – Определение характеристических температур образцов

По пяти измерениям были определены средние напряжения, которые соответствуют определенному значению деформации и представлены на рисунке 2.2.

Расчетные «максимальные» деформации, обеспечивающие герметичное термомеханическое соединение.

В результате проведенных измерений были построены графики зависимости напряжений, возникающих в образцах, от величин осевой деформации в мартенситном состоянии (рисунок 2.2).

Из полученных графических зависимостей определяли предел текучести σ_m , эксплуатационное напряжение σ , которые используются в дальнейших расчетах.



а - Ni 50,75%Ti 49,25%, температура деформирования $T_d =$ минус 40°C;

б - Ni51,0%Ti49,0%, $T_d =$ минус 95°C;

в - Ni50,5%Ti49,5%, $T_d = 1^\circ\text{C}$;

г - Ni50%Ti50%, $T_d = 5^\circ\text{C}$;

д - Ni47,2%Ti52,8%, $T_d = 50^\circ\text{C}$.

Рисунок 2.2 – Экспериментальные изотермические диаграммы нагружения образцов из сплавов, близких к эквиаtomному ТН-1 до заданной деформации $\varepsilon_n=3\%$

Для использования образца из никелида титана в силовых устройствах необходимо добиться стабильного значения ЭПФ.

После деформирования в мартенситном состоянии при температурах деформирования T_δ , образцы разгружали и термоциклировали в полном интервале температур мартенситного перехода (от M_K до A_K). В ходе эксперимента фиксировали значения деформаций при изотермическом нагружении, а также определяли величину ЭПФ при нагревании.

Для каждого образца проволоки из NiTi было проведено 10 термоциклов. После каждого термоцикла наблюдалось все более схожее поведение кривых гистерезиса. К десятому термоциклу каждая проволока показывала устойчивые деформационные характеристики.

Для всех образцов для десятого термоцикла были построены графики зависимости деформации, обусловленной ЭПФ, от задаваемой температуры. (рисунки 2.3-2.7).

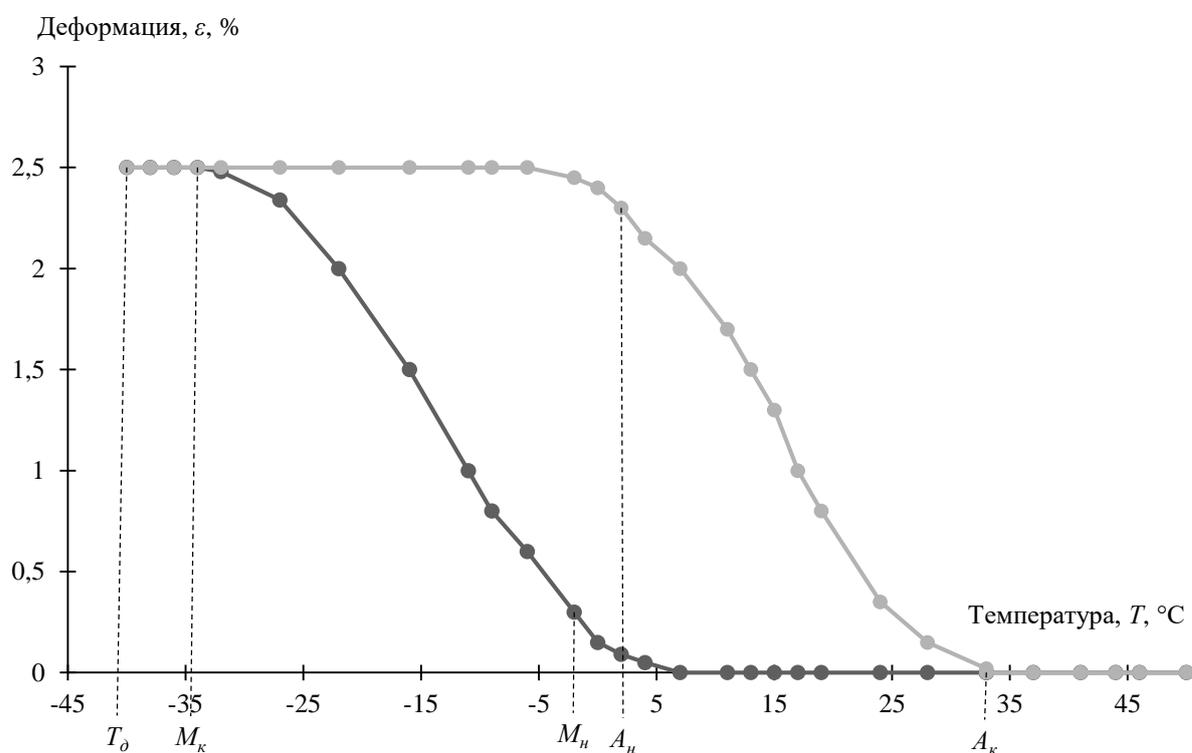


Рисунок 2.3 – Зависимость накопленной и восстановленной деформации от температуры в сплаве Ni50,75%Ti49,25%, T_δ = минус 40°C

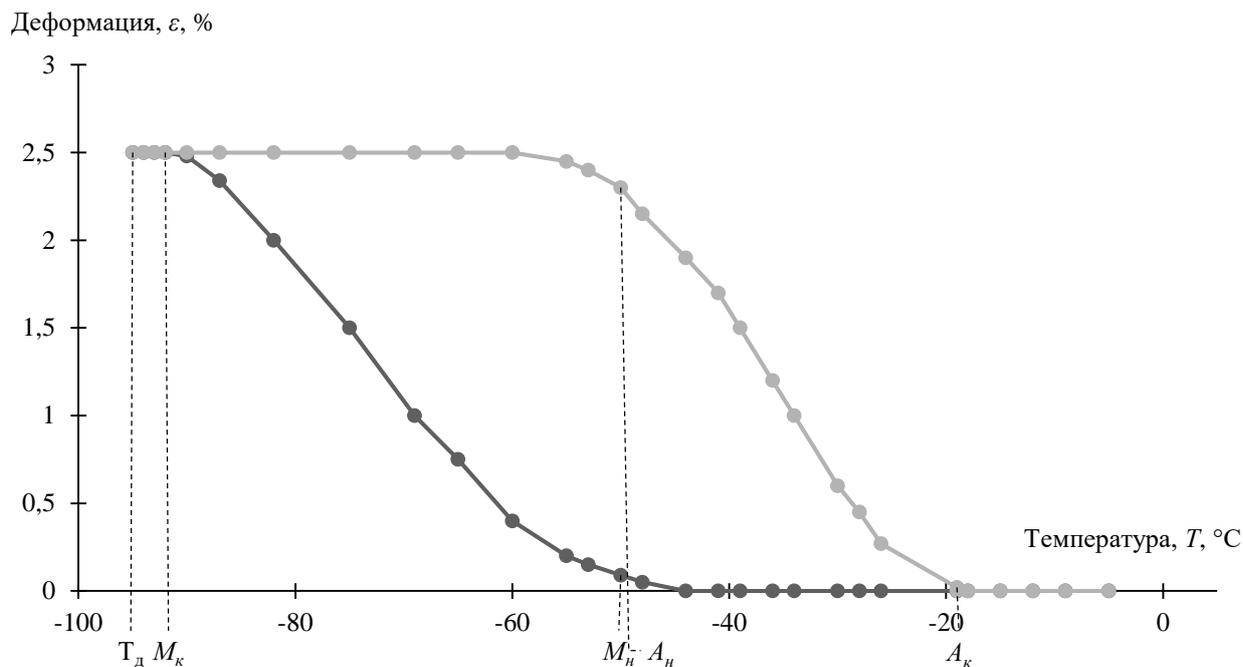


Рисунок 2.4 – Зависимость накопленной и восстановленной деформации от температуры в сплаве Ni51,0%Ti49,0%, $T_d = \text{минус } 95^\circ\text{C}$

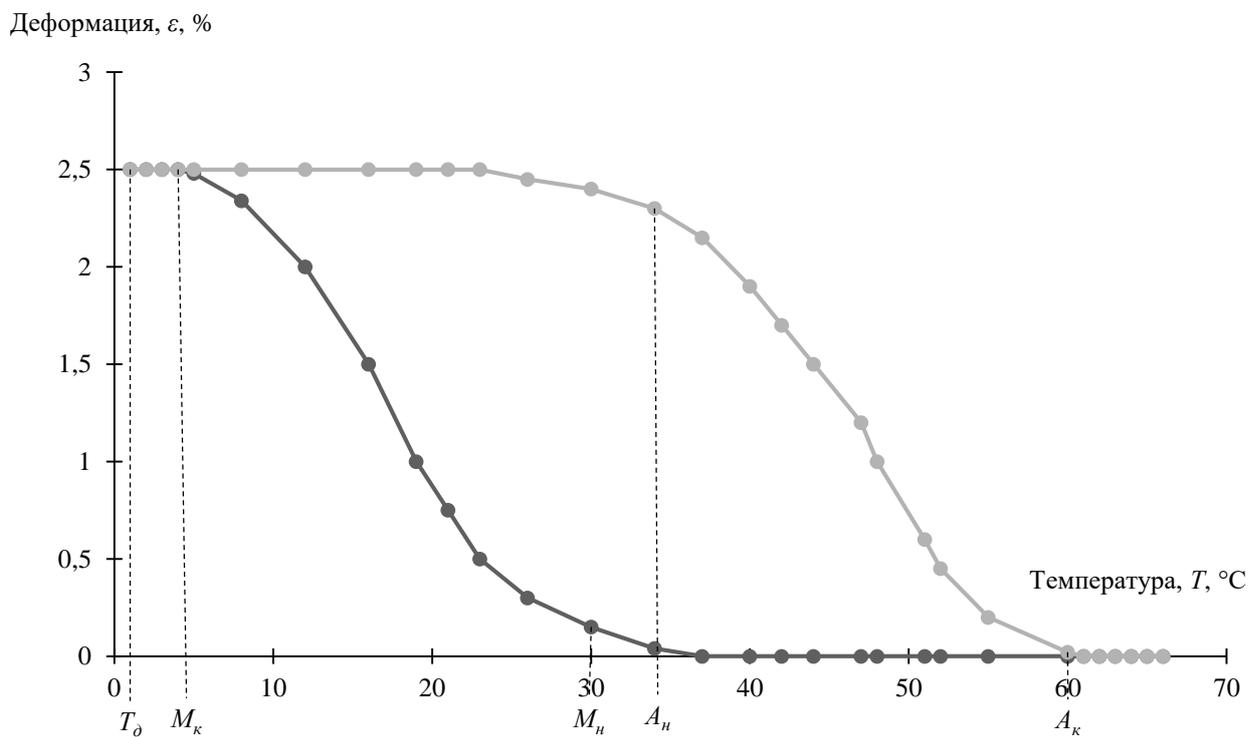


Рисунок 2.5 – Зависимость накопленной и восстановленной деформации от температуры в сплаве Ni50,5%Ti49,5%, $T_d = 1^\circ\text{C}$

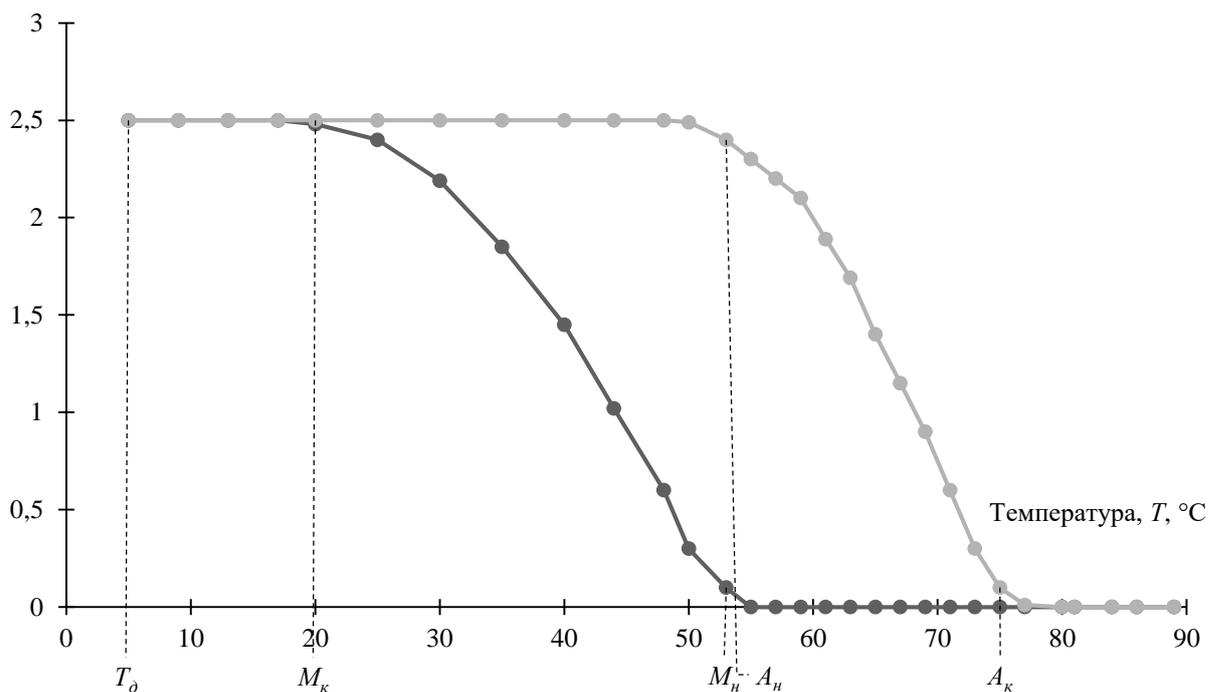
Деформация, ε , %

Рисунок 2.6 – Зависимость накопленной и восстановленной деформации от температуры в сплаве Ni50%Ti50%, $T_\delta = 5^\circ\text{C}$

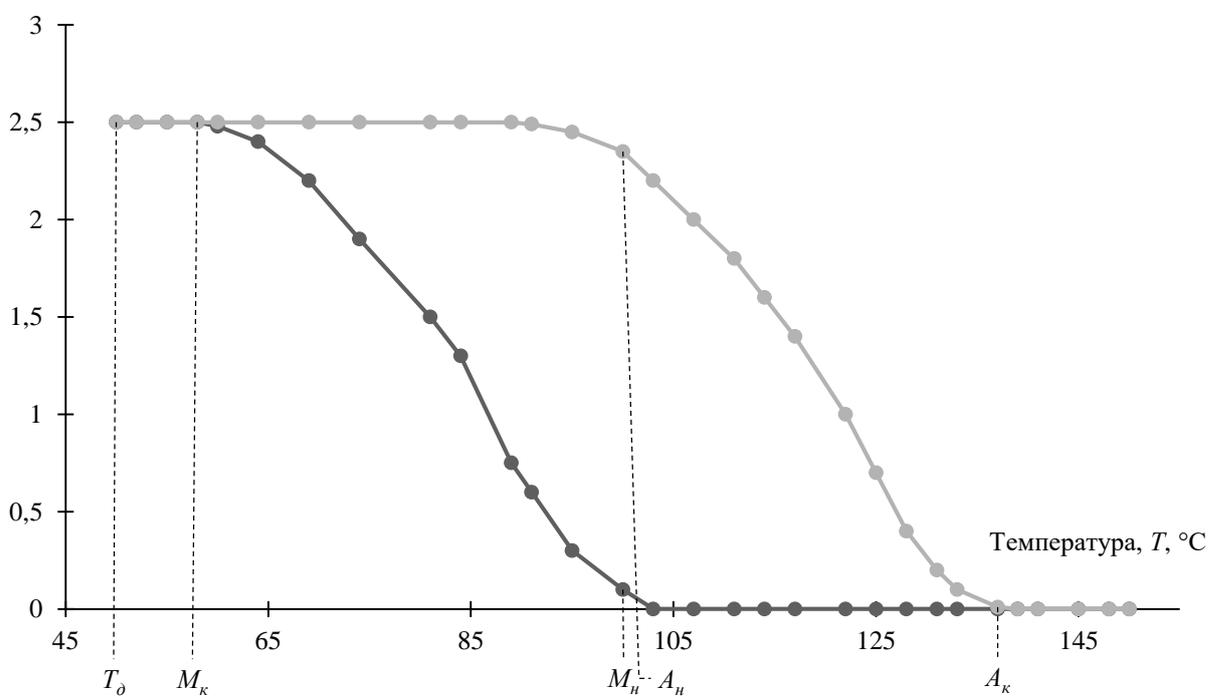
Деформация, ε , %

Рисунок 2.7 – Зависимость накопленной и восстановленной деформации от температуры в сплаве Ni47,2%Ti52,8%, $T_\delta = 50^\circ\text{C}$

Из графиков видно, что, несмотря на малые различия состава сплавов образцов NiTi (около 1%), разница в характеристических температурах весьма значительна (таблица 2.1). Таким образом, варьируя соотношение титана и никеля, можно изменять рабочие зоны температур и подобрать сплав для различных условий эксплуатации материала с памятью.

Для исследуемой области применения материала с памятью наиболее оптимальным является образец, соответствующий рисунку 2.3. Температурные условия работы разрабатываемого конструкционного соединения входят в рабочую зону температур выбранного сплава. Состав сплава Ni_{50,75}Ti_{49,25}% демонстрирует требуемые характеристики работы функционального устройства – ТМС.

Экспериментальное исследование показало, что при нагревании материал демонстрирует ЭПФ, а на этапе охлаждения – эффект ППП. Кинетика накопления и возврата деформаций была аналогична таковой: на этапе охлаждения под нагрузкой образец растягивался, а в полцикле нагрева укорачивался в обратном направлении.

2.3.2 Методика расчета деформационных параметров при проектировании ТМС

Согласно методике, представленной ниже, полученные экспериментальные значения напряжений и деформаций будут использованы для расчета проектных параметров.

Для определения напряжений σ_3 применим условную схему нагружения образца (рисунок 2.8).

Для расчёта σ_3 примем проектные деформационные параметры, используемые при проектировании функциональных элементов с ЭПФ:

– ε_n – максимальные значения деформации исследованных образцов из NiTi при проведении эксперимента, $\varepsilon_n = 3\%$;

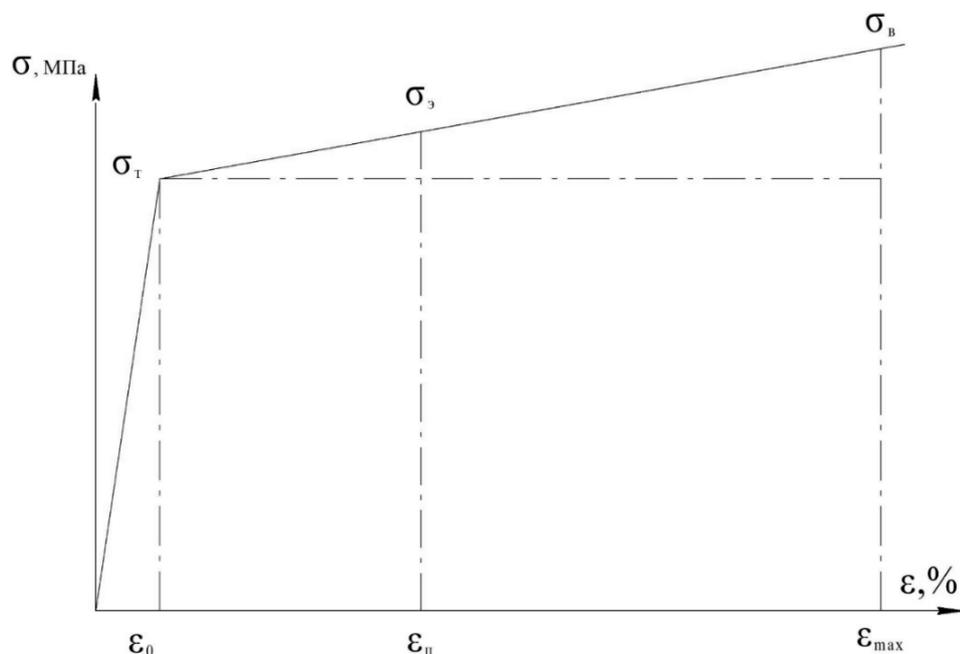


Рисунок 2.8 - Схема растяжения для образцов из никелида титана

- ε_0 – минимальные значения деформации образцов из NiTi, $\varepsilon_0 = 0,42\%$;
- ε_{max} – максимально возможные значения деформации для материала NiTi, $\varepsilon_{max} = 8,0\%$;
- $\sigma_{\phi m}$ – среднее значение предела фазовой текучести для NiTi, $\sigma_{\phi m} = 150$ МПа;
- σ_m – среднее значение предела текучести для NiTi, $\sigma_m = 300$ МПа;
- σ_6 – среднее значение предела выносливости для NiTi, $\sigma_6 = 600$ МПа;
- E_A – модуль Юнга в аустенитном состоянии для никелида титана, $E_A = 7 \cdot 10^{10}$ Па.

Из подобия треугольников (рисунок 2.7), имеем:

$$\frac{\sigma_3 - \sigma_m}{\sigma_6 - \sigma_m} = \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_0}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_0}, \quad (2.5)$$

$$\text{Откуда: } \sigma_3 = \sigma_m + (\sigma_6 - \sigma_m) \cdot \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_0}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_0} = 402 \text{ МПа}.$$

Таким образом, получены значение экспериментального параметра напряжения, которое будет использоваться далее в определении реактивных напряжений.

2.3.2 Этап 2 – Определение реактивных напряжений

На данном этапе эксперимента определяются величины реактивных напряжений, генерируемых в процессе восстановления деформации образцов.

Из работ [32, 80] известно, что особенностью деформационно-силового поведения материалов с ЭПФ является эффект генерации реактивных напряжений. После деформирования образца с ЭПФ при $T \approx M_n$ и разгрузки в нем сохранится фазовая деформация. Если при последующем нагреве воспрепятствовать свободному восстановлению деформации (заневолить образец), то в нем возникнут внутренние напряжения, называемые реактивными σ_p .

Важным, для практического использования материалов с ЭПФ в циклически действующих устройствах, является характерная особенность реактивного напряжения в многократной воспроизводимости гистерезисной зависимости напряжения от температуры при повторяющихся нагревах и охлаждениях.

Реактивные напряжения при температурах выше M_n весьма стабильны во времени, что обеспечивает длительную работоспособность деталей, в которых реализуются σ_p [80].

Для осуществления 2 этапа опыта экспериментальную установку необходимо дополнить витыми пружинами, которые с одной стороны закрепляются с проволокой из никелида титана, а с другой стороны к витому стальному тросу.

При нагреве образца, его свободному формовосстановлению препятствует пружина, следовательно, в образце возникают внутренние реактивные напряжения σ_p .

В работах [37, 55, 103] показано, что материалы с ЭПФ могут демонстрировать значительное число термоциклов без заметного изменения реактивных напряжений в условиях противодействия упругого контртела.

Если жесткость противодействия K упругого контртела стремится к бесконечности (на рисунке 2.9 этому предельному переходу соответствует замена пружины на жесткую заделку), нормальное напряжение стремится к максимально возможному значению σ_{max} , а соответствующий деформационный отклик ε будет равен

нулю. И наоборот, если жесткость $K=0$ (этому отвечает реализация ЭПФ в свободном состоянии), деформационный отклик принимает максимальное значение ε_{max} при σ , равном нулю. При варьировании K от нуля до бесконечности деформационный отклик ε изменяется от ε_{max} до нуля, а напряжение σ от нуля до σ_{max} .

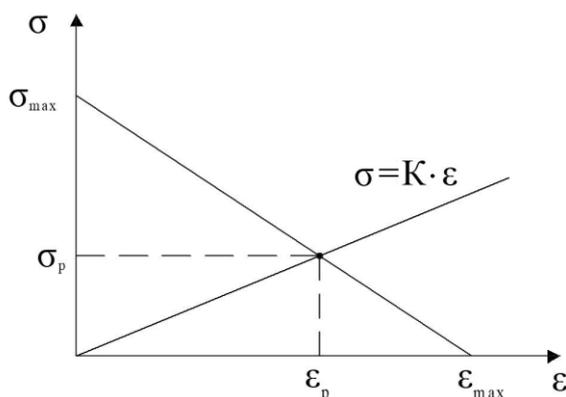


Рисунок 2.9 – Демонстрация расчета рабочих напряжений σ_p и деформаций ε_p

Согласно проведенному эксперименту, изменению значений K в вышеуказанных пределах отвечает геометрическое место точек в пространстве $\sigma - \varepsilon$, в первом приближении аппроксимируемое нисходящей прямой. Описанное выше схематически представлено на $\sigma - \varepsilon$ диаграмме (рисунок 2.9), где по оси абсцисс отложена амплитуда обратимой деформации, а по оси ординат – соответствующий уровень реактивных напряжений. Здесь величина σ_{max} показывает максимально возможный уровень генерируемых напряжений, отвечающих бесконечной жесткости противодействия упругого контртела, ε_{max} – величина деформации, обусловленной ЭПФ в свободном состоянии после термоциклирования под нагрузкой.

Величины σ_{max} и ε_{max} определяются экспериментально и являются базовыми механическими параметрами задачи. Прямая $\sigma = K \cdot \varepsilon$ является линией постоянной жесткости противодействия.

Величина жесткости противодействия K зависит от толщины сечения проволоки и жесткости пружины.

Жесткость противодействия системы «образец – заземление» K определяется по уравнению (2.6) [37]:

$$K = \frac{k \cdot L_{\text{Э}}}{s}, \quad (2.6)$$

где k – жесткость упругого элемента, кН/м;

$L_{\text{Э}}$ – длина рабочей части образца, 2,0 м;

s – площадь поперечного сечения образца, $0,785 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$. (диаметр 1 мм)

$$k = \frac{G \cdot d_D^4}{8 \cdot d_F^3 \cdot n}$$

где d_D – диаметр проволоки;

d_F – диаметр намотки (измеряемый от оси проволоки);

n – число витков;

G – модуль сдвига (для обычной стали $G \approx 80 \text{ ГПа}$).

Рассчитанные параметры жесткости пружин и жесткости противодействия сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Параметры жесткости упругих элементов и жесткости противодействия системы

Параметры исследуемой системы	№ упругого элемента				
	1	2	3	4	5
Жесткость упругого элемента k , кН/м	4,0	1,58	6,97	2,5	11,57
Жесткость противодействия K , ГПа	10,2	4,03	17,8	6,37	29,5

Реактивные напряжения σ_p , при условии пренебрежения обычной пластической деформацией:

$$\sigma_p = K \cdot \varepsilon, \quad (2.8)$$

где ε – осевые деформации, способные к возврату за счет ЭПФ.

Величины рабочих напряжений и деформаций σ_p и ε_p проволоки ЭПФ находятся как координаты точки пересечения нисходящей прямой $\sigma(\varepsilon)$ и прямой постоянной жесткости противодействия $\sigma = K \cdot \varepsilon$, т.е. из геометрических соображений согласно (2.9), (2.10).

$$\sigma_p = \frac{\sigma_{\max}}{1 + \frac{\sigma_{\max}}{K \cdot \varepsilon_{\max}}}, \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_{\max}}{K + \frac{\sigma_{\max}}{\varepsilon_{\max}}}. \quad (2.10)$$

На рисунке 2.10 показаны деформационно-силовые кривые, показывающие связь между реактивными напряжениями σ_p и осевой деформацией ε . Ломаная 1-ABCDE-2 определяет значения реактивных напряжений σ_p и осевых деформаций ε , реализуемых при нагреве через интервал обратного мартенситного перехода в сплаве ТН-1. Для точек ABCDE значения σ_p и ε найдены экспериментально, а точка 1 отвечает фактическому пределу прочности исследованной проволоки из сплава с ЭПФ при максимальном значении деформации ε_n .

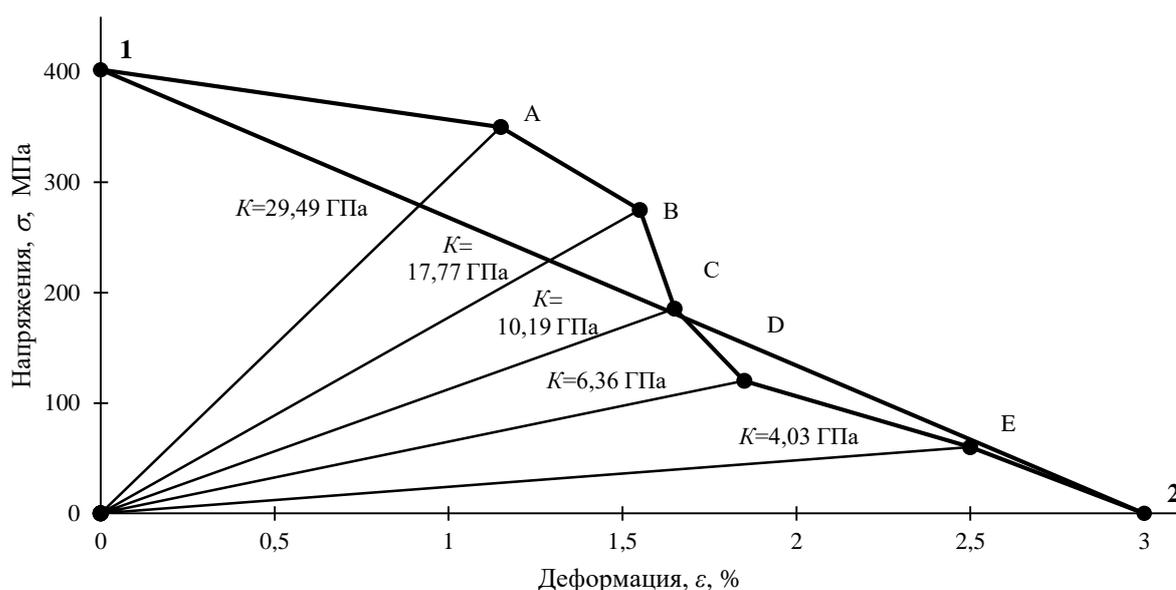


Рисунок 2.10 - Деформационно-силовые характеристики

В ходе работы выполнено экспериментальное исследование оптимального сплава с ЭПФ ТН-1 (Ni50,75%Ti49,25%) в качестве рабочего тела при его защемлении.

В результате 2 этапа эксперимента получены зависимости величин реактивных напряжений и деформаций, реализуемых за счет ЭПФ, от жесткости противодействия упругого контртела.

2.4 Математическое планирование эксперимента

Планирование эксперимента применяется для определения максимальной точности измерений при минимальном количестве проведённых опытов и сохранения достоверности полученных результатов.

Изучение его выполняется с помощью математической модели, представляющей уравнение связи (функцию отклика) параметра оптимизации с факторами, воздействующими на объект. Каждый фактор имеет несколько уровней значений.

Для нахождения параметра оптимизации (ε , деформация, обусловленная ЭПФ) при математическом планировании эксперимента принимается во внимание значения трех наиболее важных факторов:

- характеристическая температура выбранного сплава ТН-1 (Ni50,75%Ti49,25%) T , К;
- предел прочности материала образцов σ_b , МПа;
- жесткость упругого контртела K , МН/м.

Кодирование факторов, оказывающих влияние на деформацию ε , вызываемой действием ЭПФ, искомую в эксперименте, приведены в таблице 2.4 [2, 81].

Таблица 2.4 – Кодированные значения факторов

Наименование фактора	Параметр	Единицы измерения	Обозначение
Характеристическая температура сплава ТН-1	T	К	x_1
Предел прочности сплава ТН-1	σ_b	МПа	x_2
Жесткость упругого контртела	K	Н/м	x_3

Для разработки математической модели, описывающей влияние вышеперечисленных факторов на изменение значений функции отклика, был выбран ортогональный центрально-композиционный план второго порядка (ОЦКП) [2, 34, 74, 81].

При планировании и вычислении ОЦКП второго порядка использовали безразмерные величины факторов и соответствующие им выходные параметры.

Для определения количества опытов N , необходимых для ОЦКП, использовали формулу [2, 81]:

$$N = 2^{k_\phi} + 2 \cdot k_\phi + 1, \quad (2.11)$$

где k_ϕ – число факторов.

При $k_\phi = 3$ искомое количество опытов для ОЦКП второго порядка составляет 15.

Число уровней независимых переменных, для получения математической модели в ОЦКП, должно быть на единицу больше степени интерполяционного многочлена.

Ядро ОЦКП – это ортогональные планы и некоторое число дополнительных «звездных» точек, которые лежат на сфере диаметром 2α . Построение сводится к определению расстояния звездного плеча α от центра до «звездных» точек [2, 81].

На рисунке 2.11 приведен общий вид трехфакторного ОЦКП второго порядка.

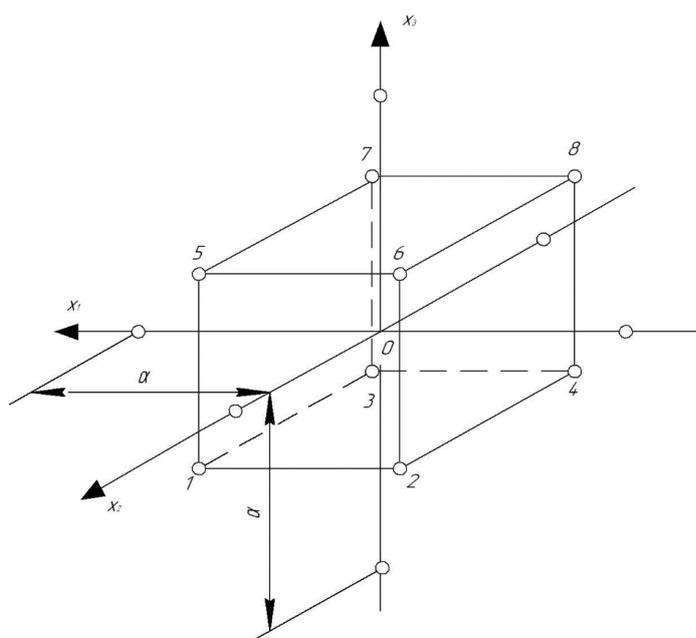


Рисунок 2.11 - Схема трехфакторного ОЦКП второго порядка

Для упрощения вычислений и определения независимых коэффициентов регрессии воспользуемся одним из общих свойств матриц планирования – ортогональностью матрицы [2, 81, 88]:

$$\sum_{u=1}^n x_{0i} x_{iu}^2 = 0 \text{ и } \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 x_{ji}^2 = 0. \quad (2.12)$$

Условие (2.12) определяется путем преобразования квадратичных переменных:

$$(x'_i)^2 = x_i^2 - \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2}{n} = x_i^2 - \bar{x}_i^{-2}. \quad (2.13)$$

где n – число параллельных опытов.

Величина \bar{x}_i^{-2} зависит от числа факторов k и плеча α

$$\bar{x}_i^{-2} = \frac{2^k + 2\alpha^2}{2^k + 2k + 1}. \quad (2.14)$$

Величину \bar{x}_i^{-2} обозначают через плечо φ , таким образом уравнение (2.14) будет иметь следующий вид:

$$\bar{x}_i^{-2} = \varphi = \frac{2^k + 2\alpha^2}{2^k + 2k + 1} = \frac{2^k + 2\alpha^2}{n} \quad (2.15)$$

Тогда условие (2.14) запишем как:

$$2^k (1 - \varphi)^2 - 4\varphi(\alpha^2 - \varphi) + 2(k - \varphi)\varphi^2 + \varphi^2 = 0 \quad (2.16)$$

Таким образом, получаем:

$$\varphi = \sqrt{\frac{2^k}{n}}, \quad (2.17)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{n\varphi - 2^k}{2}}, \quad (2.18)$$

Расчет по формулам 2.17-2.18 дает значения параметров ОЦКП (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Параметры ОЦКП

Ядро плана	Общее количество опытов	φ	α
2^3	15	0,7303	1,2154

Функцию отклика математической модели аппроксимируют в виде полного квадратичного полинома, получая выражение:

$$y = b'_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{\substack{1 \leq i \leq k \\ 1 \leq j \leq k \\ i \neq j}} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2. \quad (2.19)$$

По условию ортогонального планирования эксперимента и используя экспериментальные данные рассчитываются значения коэффициентов регрессии:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n y_u}{n}, \quad (2.20)$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} \overline{y_u}}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2}, \quad (2.21)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} \overline{y_u} x_{ju}}{\sum_{u=1}^n (x_{iu} x_{ju})^2}, \quad (2.22)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n (x'_{iu})^2 \overline{y_u}}{\sum_{u=1}^n (x'_{iu})^2}, \quad (2.23)$$

где i, j - номера столбцов матрицы планирования эксперимента;

x_{iu} - элементы i -го столбца.

При анализе эксперимента усреднение результатов повторных опытов определяется по формуле:

$$\overline{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (2.24)$$

где i - номер параллельного опыта;

y_i - значение функции отклика.

Оценка дисперсий коэффициентов уравнения регрессии рассчитывается по следующим формулам:

$$S_{b0}^2 = \frac{S_{\text{воспр}}^2}{n}, \quad (2.25)$$

$$S_{bi}^2 = \frac{S_{\text{воспр}}^2}{\sum_{n=1}^n x_{iu}^2}, \quad (2.26)$$

$$S_{bij}^2 = \frac{S_{\text{воспр}}^2}{\sum_{n=1}^n (x_{iu} x_{ju})^2}, \quad (2.27)$$

$$S_{bii}^2 = \frac{S_{\text{воспр}}^2}{\sum_{n=1}^n (x'_{iu})^2}, \quad (2.28)$$

где $S_{\text{воспр}}^2$ – оценка дисперсии воспроизводимости результатов измерений.

Кодирование величин значимых факторов выполняется по формуле:

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0}}{I}, \quad (2.29)$$

где x_i – нормированное значение фактора;

\tilde{x}_i – натуральное значение фактора;

\tilde{x}_{i0} – основной уровень фактора;

I – интервал варьирования факторов.

Область проводимого эксперимента, принятые натуральные и кодированные значения рассматриваемых факторов приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Матрица трехфакторного ОЦКП

Уровни варьирования	Область эксперимента			
	$x_1=T, \text{ К}$	$x_2=\sigma_6, \text{ МПа}$	$x_3=K, \text{ кН/м}$	Кодированное значение
Нижний	241 - M_n	500	1,6	-1
Основной	287	600	7,0	0
Верхний	333 - A_k	700	12,4	+1

Интервал варьирования рассматриваемых факторов I составил для:

– температура минимального фазового предела текучести (температура деформации), $T - I=46 \text{ К}$.

– предела прочности материала образцов $\sigma_6 - I=100 \text{ МПа}$;

– жесткости упругого контртела $K - I = 5,4$ кН/м.

Согласно формуле (2.29), учитывая интервал варьирования и натурные значения факторов, кодированные значения имеют вид:

$$x_1 = \frac{T - 287}{46}, \quad (2.30)$$

$$x_2 = \frac{\sigma_\epsilon - 600}{100}, \quad (2.31)$$

$$x_3 = \frac{K - 7,0}{5,4}. \quad (2.32)$$

Учитывая кодирование значений значимых факторов, выражение (2.19) принимает вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (2.34)$$

Подставив параметры кодированных факторов в уравнение (2.34) получается промежуточная математическая модель:

$$y = b_0 + b_1T + b_2\sigma_\epsilon + b_3K + b_{12}T\sigma_\epsilon + b_{13}TK + b_{23}\sigma_\epsilon K + b_{11}T^2 + b_{22}\sigma_\epsilon^2 + b_{33}K^2 \quad (2.35)$$

Учитывая натурные значения и кодирование факторов согласно формулам (2.30-2.32) и подставив их в математическую модель (2.35), получаем:

$$\begin{aligned} y = & b_0 + b_1 \left(\frac{T - 250}{40} \right) + b_2 \left(\frac{\sigma_\epsilon - 900}{100} \right) + b_3 \left(\frac{K - 5,63}{4,89} \right) + \\ & + b_{12} \left(\frac{T - 250}{40} \right) \left(\frac{\sigma_\epsilon - 900}{100} \right) + b_{13} \left(\frac{T - 250}{40} \right) \left(\frac{K - 5,63}{4,89} \right) + \\ & + b_{23} \left(\frac{\sigma_\epsilon - 900}{100} \right) \left(\frac{K - 5,63}{4,89} \right) + b_{11} \left(\frac{T - 250}{40} \right)^2 + \\ & + b_{22} \left(\frac{\sigma_\epsilon - 900}{100} \right)^2 + b_{33} \left(\frac{K - 5,63}{4,89} \right)^2. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Общий вид исходной матрицы планирования ОЦКП второго порядка представлен в таблице 2.7.

Критерий выявления грубых ошибок определен по формуле (2.37):

$$\beta' = \frac{(x_{\max} - x_{cp})}{S \sqrt{\frac{(u-1)}{u}}}. \quad (2.37)$$

Таблица 2.7 - Общий вид исходной матрицы планирования ОЦКП второго порядка

Номер опыта	Матрица планирования эксперимента										Результаты повторных измерений	Среднее \bar{y}
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1^2 - \beta$	$x_2^2 - \beta$	$x_3^2 - \beta$		
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	1,591	1,613
											1,612	
											1,499	
											1,701	
											1,661	
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	1,601	1,648
											1,599	
											1,72	
											1,64	
											1,681	
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	1,58	1,614
											1,59	
											1,658	
											1,742	
											1,498	
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	1,352	1,555
											1,705	
											1,499	
											1,599	
											1,621	
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	1,61	1,607
											1,625	
											1,721	
											1,481	
											1,598	
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	1,588	1,615
											1,695	
											1,487	
											1,702	
											1,601	
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	1,604	1,597
											1,578	
											1,499	
											1,751	
											1,555	

Окончание таблицы 2.7

8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	1,489	1,599
											1,529	
											1,638	
											1,75	
											1,588	
9	+1	-1,22	0	0	0	0	0	+0,76	-0,73	-0,73	1,622	1,629
											1,741	
											1,631	
											1,495	
											1,655	
10	+1	+1,22	0	0	0	0	0	+0,76	-0,73	-0,73	1,495	1,638
											1,781	
											1,632	
											1,698	
											1,586	
11	+1	0	-1,22	0	0	0	0	-0,73	+0,76	-0,73	1,655	1,647
											1,645	
											1,698	
											1,651	
											1,584	
12	+1	0	+1,22	0	0	0	0	-0,73	+0,76	-0,73	1,431	1,576
											1,629	
											1,688	
											1,65	
											1,484	
13	+1	0	0	-1,22	0	0	0	-0,73	-0,73	+0,76	1,632	1,683
											1,781	
											1,581	
											1,695	
											1,725	
14	+1	0	0	+1,22	0	0	0	-0,73	-0,73	+0,76	1,595	1,608
											1,671	
											1,562	
											1,728	
											1,486	
15	+1	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	1,555	1,636
											1,635	
											1,708	
											1,545	
											1,735	
N	15	10,44	10,44	10,44	8	8	8	4,377	4,377	4,377		

Для определения ошибок повторных опытов эксперимента определяют среднеквадратичное отклонение по формуле:

$$S_i^2 = \frac{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}, \quad (2.38)$$

Для определения брака используем критерий Стьюдента:

$$\frac{y - \bar{y}}{S} \geq t \text{ или } t_{расч} \geq t_{табл}, \quad (2.39)$$

где t – критерий Стьюдента, его значение для 5-ти повторных опытов (5 термоциклов) и доверительной вероятности 0,99 равно 2,947 [35].

Данные расчетов среднеквадратического отклонения приведены в таблице 2.8.

Рабочая матрица ОЦКП второго порядка с учетом экспериментальных данных и результатов расчетов представлена в таблице 2.9.

Применив критерий Стьюдента можно найти вероятность брака (рассчитан для опыта №10):

$$\frac{1,638 - 1,495}{0,108671} = 1,89, \quad \frac{1,781 - 1,638}{0,108671} = 1,31.$$

Видно, что условие $t_{расч} \geq t_{табл}$ не выполняется, значит, результаты повторных опытов не можем считать ошибочными.

2.5 Математическая модель и регрессионный анализ экспериментальных данных

Для определения математической модели, необходимо рассчитать соответствующие коэффициенты регрессии.

Используя формулы (2.20-2.23) определим значения коэффициентов уравнения регрессии.

$$b_0 = \frac{1,613 + 1,648 + 1,614 + 1,555 + 1,607 + 1,615 + 1,597 + 1,599 + 1,629 +}{15} + \frac{1,638 + 1,647 + 1,576 + 1,683 + 1,608 + 1,636}{15} = 1,61764$$

Таблица 2.8 – Данные расчетов среднеквадратического отклонения

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S_i^2	0,0059	0,0023	0,0083	0,018	0,0073	0,0078	0,0089	0,0103	0,0078	0,0118	0,00167	0,0126	0,00613	0,0089	0,0074
S_i	0,0767	0,052	0,091	0,135	0,0856	0,088	0,0942	0,1018	0,088	0,109	0,041	0,112	0,078	0,094	0,086

Таблица 2.9 - Рабочая матрица ОЦКП второго порядка с учетом экспериментальных данных и результатов расчетов

j	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1^2 - \beta$	$x_2^2 - \beta$	$x_3^2 - \beta$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	\bar{y}	$S_y^2(y)$	β'
1.	+1	-1	-1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	+1	+1	+1	1,6128	0,005882	1,29
2.	+1	+1	-1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	-1	-1	+1	1,6482	0,002737	1,54
3.	+1	-1	+1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	-1	+1	-1	1,6136	0,008377	1,57
4.	+1	+1	+1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	+1	-1	-1	1,5552	0,018284	1,24
5.	+1	-1	-1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	+1	-1	-1	1,607	0,007322	1,49
6.	+1	+1	-1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	-1	+1	-1	1,6146	0,007819	1,11
7.	+1	-1	+1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	-1	-1	+1	1,5974	0,008873	1,83
8.	+1	+1	+1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	+1	+1	+1	1,5988	0,010361	1,66
9.	+1	-1,22	0	0	+0,76	-0,73	-0,73	0	0	0	1,6288	0,007807	1,42
10.	+1	+1,22	0	0	+0,76	-0,73	-0,73	0	0	0	1,6384	0,011809	1,47
11.	+1	0	-1,22	0	-0,73	+0,76	-0,73	0	0	0	1,6466	0,001663	1,41
12.	+1	0	+1,22	0	-0,73	+0,76	-0,73	0	0	0	1,5764	0,012579	1,11
13.	+1	0	0	-1,22	-0,73	-0,73	+0,76	0	0	0	1,6828	0,006129	1,41
14.	+1	0	0	+1,22	-0,73	-0,73	+0,76	0	0	0	1,6084	0,008884	1,42
15.	+1	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	0	0	0	1,6356	0,007457	1,29
$\sum_{j=1}^n x_j y_j$	Коэффициенты уравнения регрессии										$u=5$ $\alpha=0,95$ $\beta<1,9$		
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{12}	b_{13}	b_{23}			
	1,61764	-0,00022	-0,01947	-0,00984	0,0005872	0,011054	0,011	-0,0125	0,004	0,00835			
$y = 1,62 - 0,0002x_1 - 0,02x_2 - 0,01x_3 - 0,0125x_1x_2 + 0,004x_1x_3 + 0,008x_2x_3 + 0,0006x_1^2 + 0,011x_2^2 + 0,011x_3^2$													

$$b_1 = \frac{-1,613 + 1,648 - 1,614 + 1,555}{10,44} - \frac{1,615 - 1,597 + 1,987 + 1,999}{10,44} = -0,0002192$$

$$b_{11} = \frac{0,435 + 0,445 + 0,436 + 0,420 + 0,434 + 0,436 + 0,431 + 0,432 + 1,238 + 1,245 - 1,202 - 1,151 - 1,228 - 1,174 - 1,194}{4,377} = 0,00058716$$

$$b_{12} = \frac{1,6128 - 1,6482 - 1,6136 + 1,5552 + 1,607 - 1,6146 - 1,5974 + 1,5988}{8} = -0,0125$$

Для подтверждения значимости коэффициентов регрессии необходимо выполнения условия:

$$|b_i| \geq S_{bi} t, \quad (2.40)$$

где S_{bi} – среднеквадратическая ошибка в определении соответствующих коэффициентов регрессии.

Проведенные расчеты показали, что все значения коэффициентов регрессии значимы. С учетом вычисленных коэффициентов регрессии, уравнение (2.34) принимает вид:

$$y = 1,62 - 0,0002x_1 - 0,02x_2 - 0,01x_3 - 0,0125x_1x_2 + 0,004x_1x_3 + 0,008x_2x_3 + 0,0006x_1^2 + 0,011x_2^2 + 0,011x_3^2 \quad (2.41)$$

Данное уравнение (2.39) неудобно для использования из-за наличия в нем закодированных величин значимых факторов.

Подставим раскодированные значения значимых факторов согласно формулам (2.30-2.32) в уравнение (2.39):

$$y = 1,62 - 0,0002 \cdot \left(\frac{T - 287}{46} \right) - 0,02 \cdot \left(\frac{\sigma_s - 600}{100} \right) - 0,01 \cdot \left(\frac{K - 7,0}{5,4} \right) - 0,0125 \cdot \left(\frac{T - 287}{46} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_s - 600}{100} \right) + 0,004 \cdot \left(\frac{T - 287}{46} \right) \cdot \left(\frac{K - 7,0}{5,4} \right) + 0,008 \cdot \left(\frac{\sigma_s - 600}{100} \right) \cdot \left(\frac{K - 7,0}{5,4} \right) + 0,0006 \cdot \left(\frac{T - 287}{46} \right)^2 + 0,011 \cdot \left(\frac{\sigma_s - 600}{100} \right)^2 + 0,011 \cdot \left(\frac{K - 7,0}{5,4} \right)^2 \quad (2.42)$$

Упростим полученное уравнение (2.40) и получим искомое выражение для расчета параметра оптимизации (ε , деформация, обусловленная ЭПФ):

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 0,479 - 0,0016 \cdot T - 10,82 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_{\varepsilon} - 0,0073 \cdot K - \\ & - 2,71 \cdot 10^{-6} T \cdot \sigma_{\varepsilon} + 1,61 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot K + 1,48 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_{\varepsilon} \cdot K + \\ & + 1,7 \cdot 10^{-10} \cdot T^2 + 1,2 \cdot 10^{-8} \cdot \sigma_{\varepsilon}^2 + 4,15 \cdot 10^{-6} \cdot K^2 \end{aligned} \quad (2.43)$$

По критерию Кохрена оценим воспроизводимость эксперимента, используя условие (2.44):

$$K_{расч} \leq K_{табл}, \quad (2.44)$$

где $K_{расч}$ - расчетное значение критерия Кохрена;

$K_{табл}$ - табличное значение критерия Кохрена.

Табличное значение критерия Кохрена принимаем по [18] в зависимости от числа степеней свободы $f_1 = n_1 - 1 = 5 - 4 = 1$ и $f_2 = N = 15 \Rightarrow K_{табл}$

$$K_{расч} = \frac{S_{\max i}^2}{\sum_1^m S_i^2}, \quad (2.45)$$

$$K_{расч} = \frac{0,0182}{0,0782} = 0,233.$$

$$0,233 \leq 0,242 \Rightarrow \text{условие выполняется.}$$

Следовательно, опыты можно считать воспроизводимыми.

Для проверки сходимости результатов математической модели с данными эксперимента проведем дополнительную серию опытов, используя заданные интервалы варьирования значимых факторов.

Числовые значения закодированных факторов определяли согласно уравнениям (2.30-2.32).

Опыт 1. $T=241$ К; $\sigma_{\varepsilon}=500$ МПа; $K=1,6$ кН/м, $\varepsilon=1,612\%$.

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 0,479 - 0,0016 \cdot 241 - 10,82 \cdot 10^{-4} \cdot 500 - 0,0073 \cdot 1,6 - \\ & - 2,71 \cdot 10^{-6} \cdot 241 \cdot 500 + 1,61 \cdot 10^{-5} \cdot 241 \cdot 1,6 + 1,48 \cdot 10^{-5} \cdot 500 \cdot 1,6 + \\ & + 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot 241^2 + 1,2 \cdot 10^{-8} \cdot 500^2 + 4,15 \cdot 10^{-6} \cdot 1,6^2 = 1,641\% \end{aligned}$$

$$\text{Погрешность: } \frac{1,641 - 1,612}{1,641} = 0,017 \approx 1,7\%.$$

Опыт 2. $T=287$ К; $\sigma_e=600$ МПа; $K=7,0$ кН/м, $\varepsilon = 1,597\%$.

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 0,479 - 0,0016 \cdot 287 - 10,82 \cdot 10^{-4} \cdot 600 - 0,0073 \cdot 7,0 - \\ & - 2,71 \cdot 10^{-6} \cdot 287 \cdot 600 + 1,61 \cdot 10^{-5} \cdot 287 \cdot 7,0 + 1,48 \cdot 10^{-5} \cdot 600 \cdot 7,0 + \\ & + 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot 287^2 + 1,2 \cdot 10^{-8} \cdot 600^2 + 4,15 \cdot 10^{-6} \cdot 7,0^2 = 1,627\% \end{aligned}$$

$$\text{Погрешность: } \frac{1,627 - 1,597}{1,627} = 0,018 \approx 1,8\%.$$

Опыт 3. $T=333$ К; $\sigma_e=700$ МПа; $K=12,4$ кН/м, $\varepsilon = 1,683\%$.

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 0,479 - 0,0016 \cdot 333 - 10,82 \cdot 10^{-4} \cdot 700 - 0,0073 \cdot 12,4 - \\ & - 2,71 \cdot 10^{-6} \cdot 333 \cdot 700 + 1,61 \cdot 10^{-5} \cdot 333 \cdot 12,4 + 1,48 \cdot 10^{-5} \cdot 700 \cdot 12,4 + \\ & + 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot 333^2 + 1,2 \cdot 10^{-8} \cdot 700^2 + 4,15 \cdot 10^{-6} \cdot 12,4^2 = 1,712\% \end{aligned}$$

$$\text{Погрешность: } \frac{1,712 - 1,683}{1,712} = 0,0169 \approx 1,69\%.$$

Математическое планирование подтвердило значения, полученные в результате проведенного эксперимента, это означает что настоящий эксперимент можно считать удавшимся, погрешность составила не более 2%.

Рассчитаны следующие параметры: коэффициенты регрессии; критерий Стьюдента $t_{расч} = 1,89$, $t_{расч} = 1,89 \geq t_{табл} = 2,947$; критерий Кохрена $K_{расч} = 0,233$, $K_{расч} = 0,233 \leq K_{табл} = 0,242$.

2.6 Выводы по главе II

Исследованы деформационные характеристики материалов с памятью формы (проволоки из сплава никелида титана) при реализации ЭПФ. Определен состав сплава Ni50,75Ti49,25 наиболее подходящий под эксплуатационные условия работы функционального устройства – ТМС.

Показано, что величины реактивных напряжений и деформаций, реализуемых в исследуемом образце за счет ЭПФ, зависят от жесткости противодействия упругого контртела. Полученные значения реактивных напряжений не превышают предела текучести и прочности материала, что говорит о возможности его применения на практике.

На основании построенных экспериментальных термомеханических диаграмм образцов из сплава ТН-1 при заданной деформации растяжением определены напряжения, возникающие в образцах из никелида титана от величины осевой деформации в мартенситном состоянии.

Проведено математическое планирование эксперимента, в результате которого:

- установлен параметр оптимизации ε (деформация, обусловленная ЭПФ) при помощи решения уравнения регрессии и расчета коэффициентов регрессии, который показал, что определенное в результате реального эксперимента значение деформации, вызванной ЭПФ, является экспериментально верно установленным.

- по выполняемым условиям критерия Стьюдента и критерия Кохрена, результаты повторных опытов не могут считаться ошибочными, и соответственно, опыты можно считать воспроизводимыми.

Сходимость результатов математической модели с данными эксперимента была подтверждена итоговой проверкой по средствам дополнительного расчета, используя заданные интервалы варьирования значимых факторов.

Полученные результаты возможно использовать для проектирования разных силовых устройств, в том числе муфтовых соединений.

ГЛАВА 3 АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Одним из факторов, определяющим надежную работу любой разрабатываемой конструкции является достоверный расчет напряжений, возникающих по телу конструкции. Выбор способа определения напряжений в симметричных цилиндрических фигурах основывается на конкретной форме, конструктивных параметрах и внешних условиях.

Подходящий для этого способ – это определение напряжений при помощи решения задачи Ламе для толстостенных цилиндров, работающих под высоким давлением, при этом рассматриваются возникающие в цилиндре перемещения. Муфта является цилиндром, для которой будет справедливо решение задачи Ламе, именно его выбираем для дальнейшего изучения разрабатываемой муфтовой конструкции.

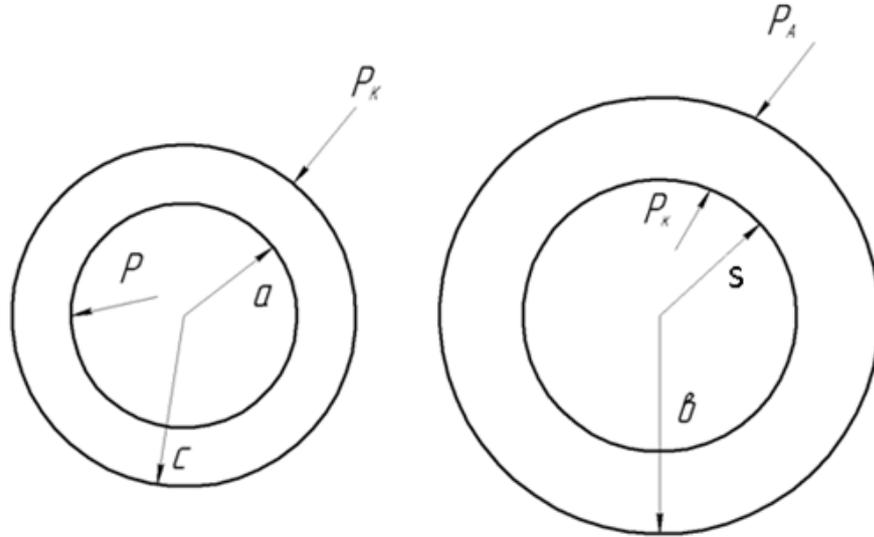
3.1 Аналитический метод решения

3.1.1 Цилиндрическая муфта

Представляемый способ неразъемного соединения основан на использовании эффекта низкотемпературной сверхпластичности материала с ЭПФ.

В работах [3 - 8] показано, что термоциклирование материалов с ЭПФ в нагруженном состоянии через интервалы мартенситных переходов сообщает материалу свойство обратимого формоизменения материала, которое проявляется при нагревании в виде эффекта памяти формы и эффекта пластичности прямого превращения (ППП) при охлаждении. Муфты, «натренированные» путем термоциклирования через интервалы мартенситных переходов, способны стать исполнительной частью неразъемного, быстросрабатываемого элемента трубопроводов, используемых в промышленных трубопроводных системах.

Схема поперечного сечения труб и муфты показана на рисунке 3.1.



a – внутренний радиус трубы; c – внешний диаметр трубы; s – внутренний радиус муфты; b – внешний радиус муфты; P – внутреннее давление; P_a – атмосферное давление; P_k – контактное давление.

Рисунок 3.1 – Схема поперечного сечения трубы из стали 17Г1С и муфты из никелида титана NiTi

На рисунке 3.2 изображен выделенный из цилиндра криволинейный шестигранник, который показывает направления основных напряжений и перемещений в муфте и трубе.

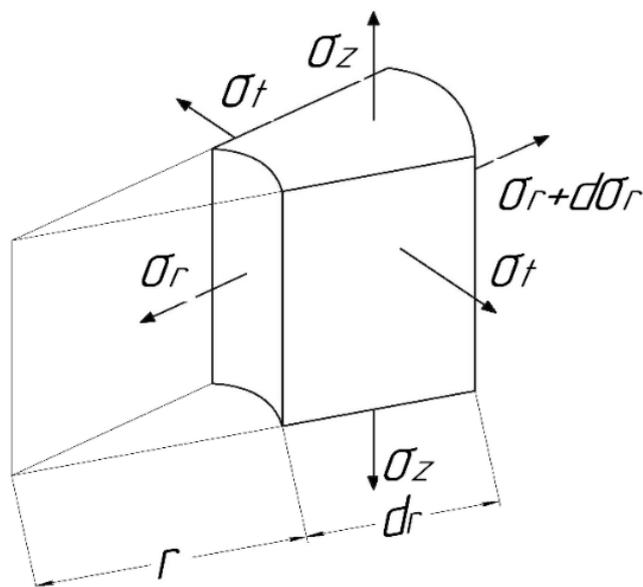
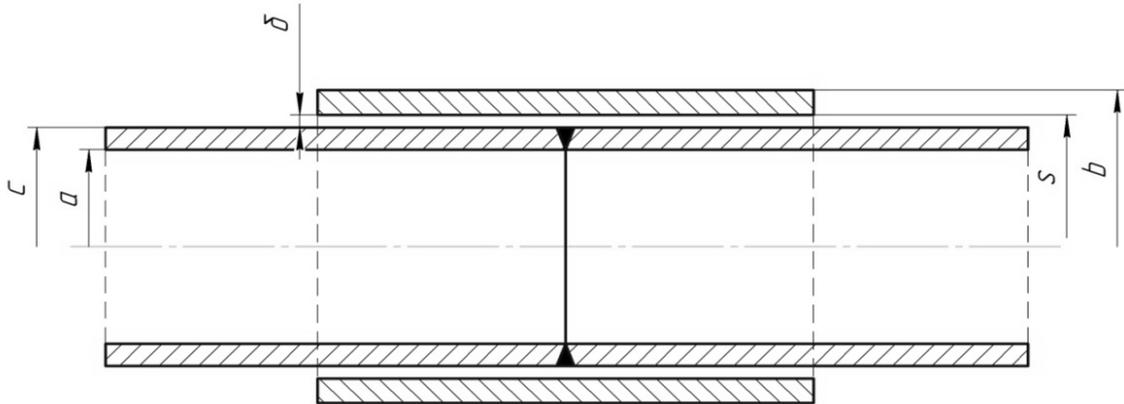


Рисунок 3.2 – Выделенный из цилиндра криволинейный шестигранник

3.1.2 Определение напряжений и перемещений в системе «муфта – труба»

На рисунке 3.3 представлена схема сечения соединяемых труб и муфты с ЭПФ.



a, c, s, b – обозначения те же что и в рисунке 3.1; δ – зазор между соединяемыми элементами, равный $s - c$. Величина $(s - c)/l \ll 1$, поэтому в дальнейших расчетах полагаем, что после «срабатывания муфты» $s \cong c$

Рисунок 3.3 – Схема сечения соединяемых труб и муфты с ЭПФ

Для расчета механических напряжений, согласно решению задачи Ламе [85], находим кольцевые (окружные) и радиальные нормальные напряжения в стальной трубе (1), за счет внутреннего давления – P .

$$\sigma_t^r = \frac{P \cdot a^2}{c^2 - a^2} \cdot \left(1 \mp \frac{c^2}{r^2} \right), \quad (a \leq r \leq c) \quad (3.1)$$

При этом знак плюс отвечает кольцевым напряжениям, а минус радиальным.

За счет внешнего (контактного) давления - P_k , возникают напряжения (3.2).

Труба не дает возможности предварительно деформированной муфте из никелида титана (заневоленный материал) свободно восстанавливать деформацию при реализации эффекта памяти формы, при этом возникают реактивные напряжения.

$$\sigma_t^r = -\frac{P_k \cdot c^2}{c^2 - a^2} \cdot \left(1 \mp \frac{a^2}{r^2} \right), \quad (a \leq r \leq c) \quad (3.2)$$

Суммарное напряжение за счет внутреннего и внешнего давления при $a \leq r \leq c$ будет (3.3).

$$\sigma_t^r = \frac{P \cdot a^2}{c^2 - a^2} \cdot \left(1 \mp \frac{c^2}{r^2}\right) - \frac{P_k \cdot c^2}{c^2 - a^2} \cdot \left(1 \mp \frac{a^2}{r^2}\right), \quad (3.3)$$

Аналогично определяем напряжение в муфте из никелида титана. Муфта нагружена внутрисимметричной нагрузкой, которая вдоль оси не изменяется.

За счет внутреннего (контактного) давления - P_k (3.4).

$$\sigma_t^r = \frac{P_k \cdot c^2}{b^2 - c^2} \cdot \left(1 \mp \frac{b^2}{r^2}\right), (c \leq r \leq b) \quad (3.4)$$

За счет внешнего давления P_a (атмосферное давление и давление в среде, окружающей трубу) (3.5).

$$\sigma_t^r = -\frac{P_a \cdot b^2}{b^2 - c^2} \cdot \left(1 \mp \frac{c^2}{r^2}\right), \quad (3.5)$$

Суммарное напряжение при $c \leq r \leq b$ будет (3.6).

$$\sigma_t^r = \frac{P_k \cdot c^2}{b^2 - c^2} \cdot \left(1 \mp \frac{b^2}{r^2}\right) - \frac{P_a \cdot b^2}{b^2 - c^2} \cdot \left(1 \mp \frac{c^2}{r^2}\right), \quad (3.6)$$

В поперечных сечениях муфты и трубы возникают, как следствие нагружения цилиндров силами вдоль оси, нормальные (осевые) напряжения σ_z и $\sigma_z^{\cdot\cdot}$.

Расчет осевых напряжений при $a \leq r \leq c$ будет согласно [85] осуществляться по формуле (3.7).

$$\sigma_z = \frac{P \cdot a^2}{\pi \cdot (c^2 - a^2)}, \quad (3.7)$$

Осевые напряжения в муфте находили из уравнения равновесия:

$$\sigma_z \cdot \pi \cdot (c^2 - a^2) = \sigma_z^{\cdot\cdot} \cdot \pi \cdot (b^2 - c^2), \quad (3.8)$$

$$\sigma_z^{\cdot\cdot} = \sigma_z \cdot \frac{c^2 - a^2}{b^2 - c^2} = \frac{P \cdot a^2}{b^2 - c^2}, \quad (3.9)$$

где $\sigma_z, \sigma_z^{\cdot\cdot}$ – осевые напряжения в трубе и муфте.

Или, возвращаясь к прежним обозначениям при $c \leq r \leq b$

$$\sigma_z = \frac{P \cdot a^2}{b^2 - c^2}, \quad (3.10)$$

Местные механические напряжения в муфте, возникающие в месте стыка труб

В месте стыка труб внутреннее давление в трубе будет являться внутренним для муфты, а поэтому механические напряжения, возникающие в муфте - σ_t^r , равны:

$$\sigma_t^r = \frac{P \cdot c^2}{b^2 - c^2} \cdot \left(1 \mp \frac{b^2}{r^2}\right) - \frac{P_a^2 \cdot b^2}{b^2 - c^2} \cdot \left(1 \mp \frac{b^2}{r^2}\right), \quad (3.11)$$

Расчет контактного (реактивного) давления между трубой и муфтой

При посадке, внешний радиус трубы сократится, точки контактной поверхности получат отрицательное смещение u_1 . Внутренний радиус муфты увеличится - u_2 . В данном случае, при действии эффекта памяти формы, величина натяга Δ зависит от деформации, обусловленной ЭПФ ε и расстояние между точками внутренней поверхности муфты и точками внешней поверхности стальной трубы.

Согласно [85] определяем разность перемещений для муфты и трубы:

$$u_2 - u_1 = \Delta = \Delta_n - \delta, \quad (3.12)$$

Здесь Δ_n - величина радиального перемещения в муфте, сформированная путем предварительного термомеханического воздействия [1-3] и реализуемая при нагревании в процессе протекания эффекта памяти формы, δ - величина радиального технологического зазора, используемая при монтаже соединения.

Определяем радиальные перемещения u_1 и u_2 :

$$u_1 = \frac{1 - \mu_1}{E_1} \cdot \frac{P \cdot a^2 - P_k \cdot c^2}{c^2 - a^2} \cdot r + \frac{1 + \mu_1}{E_1} \cdot \frac{a^2 \cdot c^2}{r} \cdot \frac{P - P_k}{c^2 - a^2}, \quad (3.13)$$

Вычисляя при $r = c$, получаем

$$u_1 = \frac{1 - \mu_1}{E_1} \cdot \frac{a^2 \cdot c \cdot P - P_k \cdot c^3}{c^2 - a^2} + \frac{1 + \mu_1}{E_1} \cdot \frac{a^2 \cdot c \cdot (P - P_k)}{c^2 - a^2}, \quad (3.14)$$

$$u_2 = \frac{1 - \mu_2}{E_2} \cdot \frac{c^3 \cdot P_\kappa}{b^2 - c^2} + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \cdot \frac{b^2 \cdot c \cdot P_\kappa}{b^2 - c^2}, \quad (3.15)$$

Определим, согласно (3.12), величину натяга:

$$\Delta = P_\kappa \left[\frac{1 - \mu_2}{E_2} \cdot \frac{c^3}{b^2 - c^2} + \frac{1 - \mu_1}{E_1} \cdot \frac{c^3}{c^2 - a^2} + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \cdot \frac{b^2 \cdot c}{b^2 - c^2} + \frac{1 + \mu_1}{E_1} \cdot \frac{a^2 \cdot c}{c^2 - a^2} \right] - \frac{2 \cdot P}{E_1} \cdot \frac{a^2 \cdot c}{c^2 - a^2}, \quad (3.16)$$

В итоге, стальная труба оказывается под действием внешнего контактного (реактивного) давления P_κ , а муфта из никелида титана под действием точно такого же внутреннего давления.

$$P_\kappa = \frac{\Delta + \frac{4 \cdot P}{E_1} \cdot \frac{a^2 \cdot c}{c^2 - a^2}}{\left[\frac{1 - \mu_2}{E_2} \cdot \frac{c^3}{b^2 - c^2} + \frac{1 - \mu_1}{E_1} \cdot \frac{c^3}{c^2 - a^2} + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \cdot \frac{b^2 \cdot c}{b^2 - c^2} + \frac{1 + \mu_1}{E_1} \cdot \frac{a^2 \cdot c}{c^2 - a^2} \right]}, \quad (3.17)$$

где E_1, E_2 – модули Юнга для стали и никелида титана;

μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона для стали и никелида титана.

После определения P_κ формулы (3.1-3.7) позволяют находить напряжения в стальной трубе и муфте из материала с ЭПФ.

Условие неразъемности соединения

Условие, при котором контактное давление, действующее на охватываемую контактную поверхность, не меньше допускаемого напряжения для муфты, является условием неразъемности соединения:

$$\alpha \cdot P_\kappa \cdot 4 \cdot \pi \cdot c \cdot L \geq [\sigma_2] \cdot \pi \cdot (b^2 - c^2) \quad (3.18)$$

при заданной ее толщине:

$$P_\kappa \geq \frac{[\sigma_2] \cdot (b^2 - c^2)}{4 \cdot \alpha \cdot c \cdot L} \quad (3.19)$$

где α – коэффициент трения покоя между сталью и никелидом титана.

3.1.3 Расчет на прочность системы «муфта – труба»

Для оптимизации конструктивных параметров ε_n и δ исходные параметры

трубы и муфты принимаются до монтажа, и имеют следующие значения: $a = 49$ мм, $c = 57$ мм, $s = (57+\delta)$ мм, $b = 65$ мм.

В качестве модельных материалов используется сталь 17Г1С [78] $\sigma_s=530$ МПа; $E=2\cdot 10^{11}$ Па и никелид титана ТН-1 [4] $\sigma_s = 600$ МПа, принимаем коэффициент запаса прочности для стали и никелида титана, равный $n=1,5$, при этом $[\sigma_1] = 355$ МПа; $[\sigma_2] = 400$ МПа; модуль Юнга для никелида титана брали согласно [14] $E=7\cdot 10^{10}$ Па.

Механические свойства материала ТН-1 и стали приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Механические свойства стали для трубопровода [83]

Параметр	Значение
Плотность, г/см ³	7,86
Температура плавления, С°	1450 - 1520
Коэффициент термического расширения, 10^{-6} , К ⁻¹	11,9
Удельное электросопротивление, 10^{-8} , Ом·м	17,1
Коэффициент Пуассона	0,28 - 0,3
Предел прочности (временное сопротивление при растяжении), МПа	373 - 412
Предел текучести, МПа	355 - 450
Относительное удлинение, %	18 - 32

Величины радиального перемещения, обусловленного ЭПФ и зазор, изменяются в нижеуказанных пределах:

$$0 < \Delta_n = c \cdot \varepsilon_n < 1,5 \text{ мм}; 0 < \delta < \Delta_n$$

Расчет на прочность осуществляется с учетом местных напряжений (3.11).

При этом Δ_n задаем согласно термомеханической методике, описанной в [1].

Длину муфты принимаем из условия $L \gg b - c$. Коэффициент трения покоя согласно [42] принимаем $\alpha = 0,6$.

Для заданных параметров δ и Δ_n вычисляем напряжения σ_t^r методом последовательных итераций по формуле (3.3) при $a \leq r \leq c$ и по формулам (3.6, 3.8) при $c \leq r \leq b$ и напряжение σ_z по формулам (3.7, 3.10).

По (3.17) находим P_κ и проверяем условие неразъемности (3.18).

По 4-й энергетической теории прочности [85] определяют эквивалентные напряжения, что в полной мере соответствует интенсивности нормальных напряжений – σ_i в классической теории пластичности [50] и будет иметь вид (3.20).

$$\sigma_i = \sigma_3 = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_t^2 + \sigma_z^2 - \sigma_r \cdot \sigma_t - \sigma_z \cdot \sigma_r - \sigma_z \cdot \sigma_t}, \quad (3.20)$$

Для точек $r = a, c, b$ осуществляется проверочный расчет на прочность.

$$\sigma_{1_3}(a); \sigma_{1_3}(c) \leq [\sigma_1]; \sigma_{2_3}(c); \sigma_{2_3}(b) \leq [\sigma_2], \quad (3.21)$$

где $\sigma_{1_3}, \sigma_{2_3}$ – эквивалентные напряжения в точках для стали и никелида титана;

$[\sigma_1], [\sigma_2]$ – соответствующие допускаемые напряжения.

Не эффективно использовать конструкцию в слабо нагруженном состоянии, поэтому помимо условий прочности (3.18) следует ввести условие загруженности конструкции (3.19).

$$\max(\sigma_{1_3}(a); \sigma_{1_3}(c)) \geq k_1 \cdot [\sigma_1], \quad \max(\sigma_{2_3}(a); \sigma_{2_3}(c)) \geq k_2 \cdot [\sigma_2], \quad (3.22)$$

коэффициенты $k_1 = k_2 = k$ принимали равными 0,8.

Если условие (3.18, 3.19) не выполнено, повторяем проверочный расчет при новом наборе параметров δ и Δ_n . Итерации продолжаются до тех пор, не будет выполнены условия прочности (3.21) и условие загруженности конструкции (3.22).

На рисунке 3.4 изображен алгоритм расчета для цилиндрической муфты, который можно использовать для расчета других диаметров, соответствующих сортаменту промышленных трубопроводов.

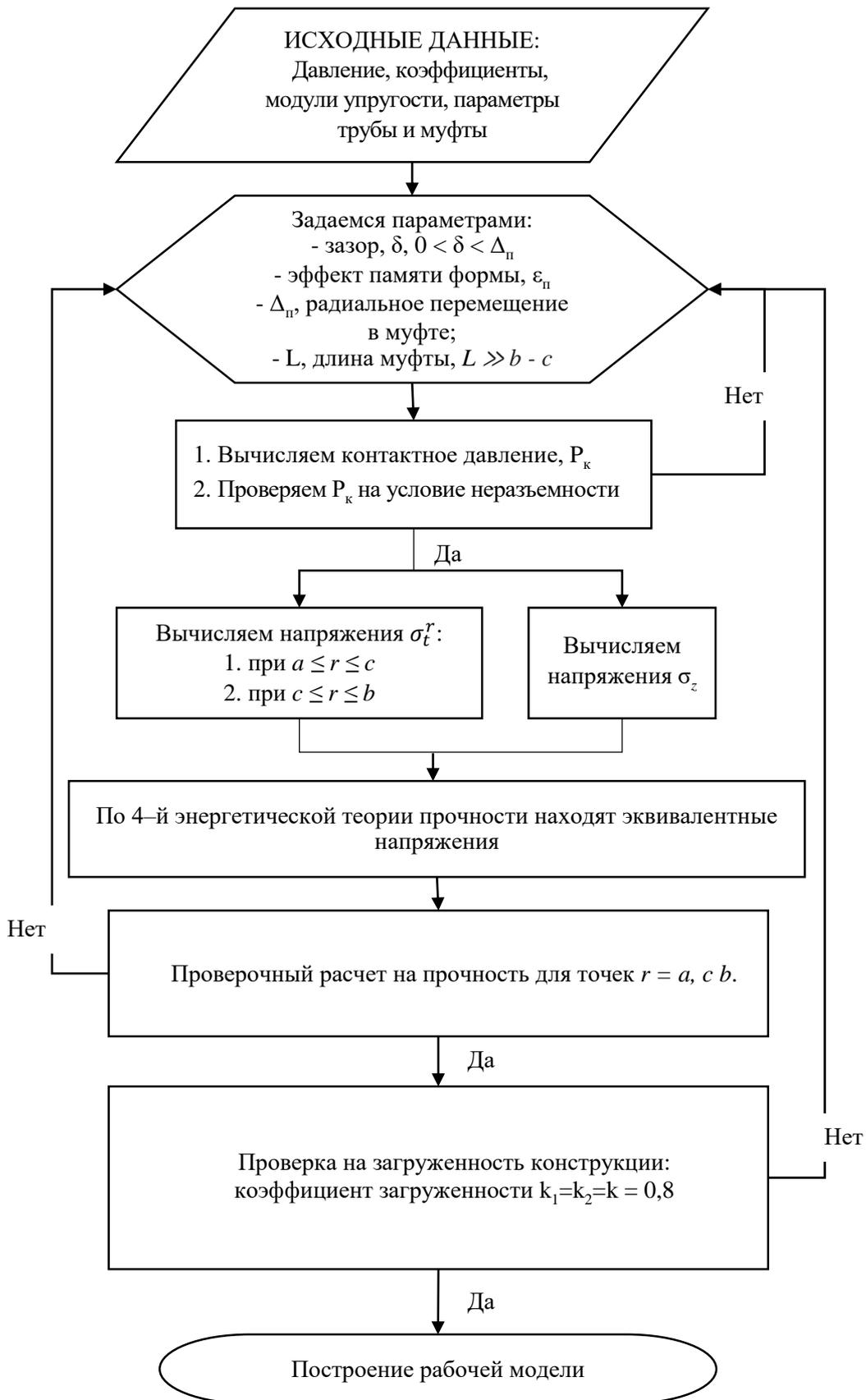
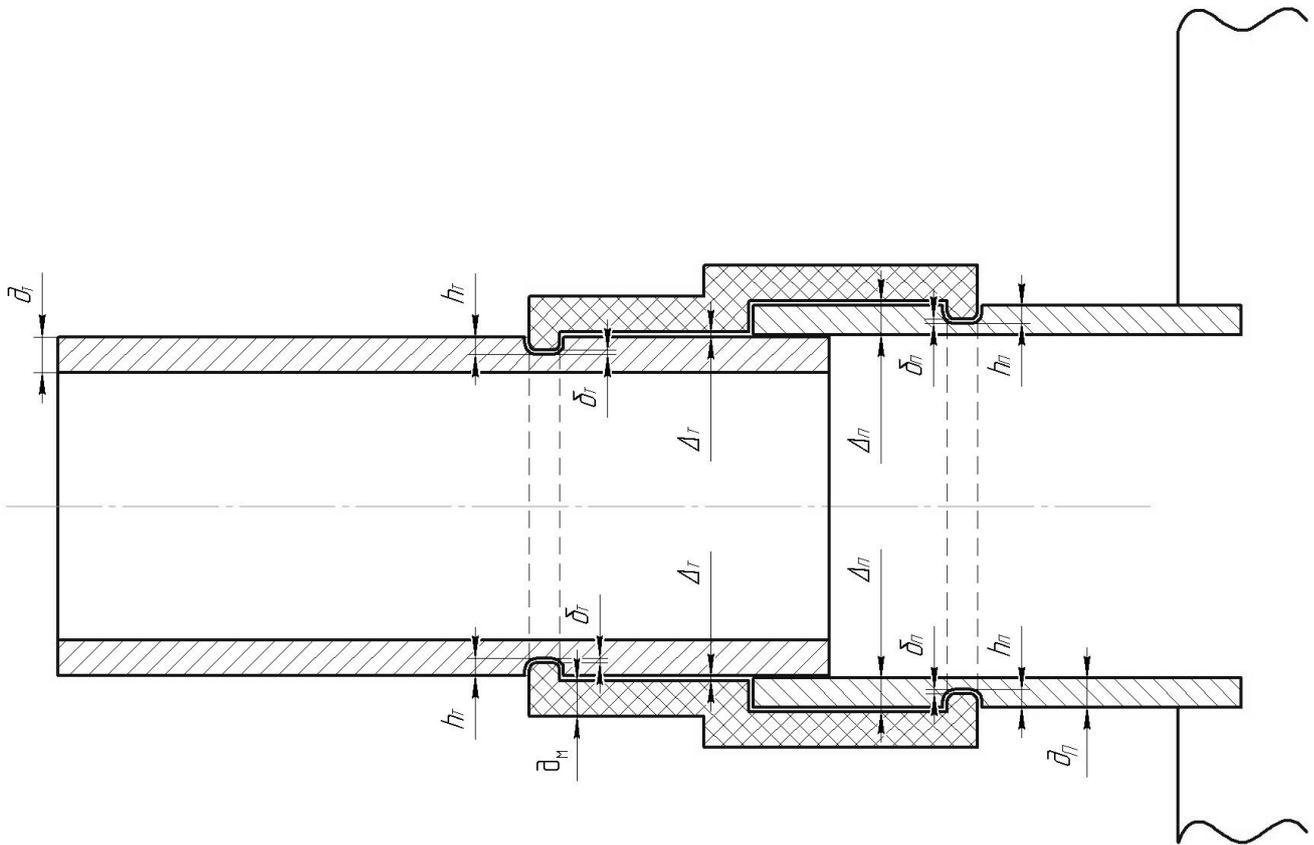


Рисунок 3.4 – Процедурный алгоритм расчета параметров муфтового соединения ступенчатого профиля

3.1.4 Цилиндрическая ступенчатая муфта

Для коротких муфт ступенчатого профиля задача Ламе может быть использована лишь как первое приближение для определения напряжений в муфте ступенчатого профиля.

На рисунке 3.5 представлен профиль муфты ступенчатого профиля и система труба-патрубок. С целью ограничения осевых перемещений муфта имеет два кольцевых выступа (буртика), на наружной поверхности трубы и патрубка есть ответные кольцевые углубления (проточки) препятствующие продольному перемещению.



δ_T - толщина стальной трубы; δ_P - толщина стального патрубка; Δ_T - зазор между муфтой и трубой, Δ_P - зазор между муфтой и патрубком (задвижкой), $\delta_T = \delta_P = \delta$ зазор между муфтой и соединяемыми элементами, h_T - глубина проточки в трубе, h_P - глубина проточки в патрубке

Рисунок 3.5 - Чертеж муфты ступенчатого профиля, закрепленной на трубе и патрубке

Расчет механических напряжений

Согласно решению задачи Ламе [50, 85] находим суммарные кольцевые (окружные) и радиальные нормальные напряжения в стальной трубе за счет внутреннего и внешнего давления в трубе, при $a \leq r \leq c$:

$$\sigma_r^t = \frac{P \cdot a^2}{c^2 - a^2} \cdot \left(1 \pm \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{P_k^2 \cdot c^2}{c^2 - a^2} \cdot \left(1 \pm \frac{a^2}{r^2}\right), \quad (3.23)$$

где a, c – внутренний и внешний радиусы труб;

P – внутреннее давление;

P_k – внешнее давление, это контактное давление, обусловленное взаимодействием трубы и муфты, при этом знак плюс соответствует кольцевым напряжениям, а минус отрицательным.

Аналогично определяем напряжение в муфте из никелида титана.

За счет внутреннего (контактного) давления - P_k , при $c \leq r \leq b$ (3.2).

$$\sigma_r^t = \frac{P_k^2 \cdot c^2}{b^2 - c^2} \cdot \left(1 \pm \frac{b^2}{r^2}\right), \quad (3.24)$$

За счет внешнего давления P_a (атмосферное давление) (3.3)

$$\sigma_r^t = -\frac{P_a^2 \cdot b^2}{b^2 - c^2} \cdot \left(1 \pm \frac{c^2}{r^2}\right), \quad (3.25)$$

Суммарное напряжение при $c \leq r \leq b$ будет (3.4).

$$\sigma_r^t = \frac{P_k^2 \cdot c^2}{b^2 - c^2} \cdot \left(1 \pm \frac{b^2}{r^2}\right) - \frac{P_a^2 \cdot b^2}{b^2 - c^2} \cdot \left(1 \pm \frac{c^2}{r^2}\right), \quad (3.26)$$

Расчет контактного давления между трубой и муфтой

Согласно [85] определяем разность перемещений для муфты и трубы:

$$u_2 - u_1 = \Delta, \quad (3.27)$$

где Δ натяг, который согласно [42] равен:

$$\Delta = \Delta_n - \delta, \quad (3.28)$$

Здесь Δ_n - величина радиального перемещения в муфте сформированная путем предварительного термомеханического воздействия по методике, развитой [1, 14, 43] и реализуемая при нагревании в процессе протекания эффекта памяти формы;

δ - величина радиального технологического зазора, используемая при монтаже соединения формулу для радиальных перемещений. При этом:

$$\Delta_n = r \cdot \varepsilon_n \quad (3.29)$$

Согласно [43, 78].

$$P_k = \frac{\Delta_n - \delta + \frac{4 \cdot P}{E_1} \cdot \frac{a^2 \cdot c}{c^2 - a^2}}{\left[\frac{1 - \mu_2}{E_2} \cdot \frac{c^3}{b^2 - c^2} + \frac{1 - \mu_1}{E_1} \cdot \frac{c^3}{c^2 - a^2} + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \cdot \frac{b^2 \cdot c}{b^2 - c^2} + \frac{1 + \mu_1}{E_1} \cdot \frac{a^2 \cdot c}{c^2 - a^2} \right]}, \quad (3.30)$$

где E_1, E_2 – модули Юнга для стали и никелида титана;

μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона для стали и никелида титана.

После определения P_k формулы (3.1-3.7) позволяют находить напряжения в стальной трубе и муфте из материала с ЭПФ.

Расчет на прочность

В качестве модельных материалов используется сталь, близкая по свойствам к классу сталей - 09Г2С, с механическими параметрами $\sigma_{в1} = 490$ МПа; $E_1 = 2 \cdot 10^{11}$ Па; $\mu_1 = 0,29$ согласно ГОСТ 19281-73 и никелид титана ТН-1 [10] $\sigma_{в2} = 600$ МПа; модуль Юнга для никелида титана брали согласно [14]; $E = 7 \cdot 10^{10}$ Па; $\mu_1 = 0,48$. Принимаем коэффициент запаса прочности для стали и никелида титана, равный $n = 1,5$, при этом $[\sigma_1] = 355$ МПа; $[\sigma_2] = 400$ МПа. Исходные параметры трубы и муфты принимаются до монтажа, и имеют следующие значения для трубы: $a_T = 30$ мм; $c_T = 38$ мм.

Для муфты над трубной частью: $c_M^T = (38 + \delta)$, $b_M^T = 46$ мм.

Для трубы в части патрубка: $a_P^T = 38$ мм, $c_P^T = 44,5$ мм.

Для муфты над патрубком: $c_M^P = (44,5 + \delta)$, $b_M^P = 52,5$ мм.

По (3.7) находим Δ_n для требуемых точек поперечного сечения. Далее по (3.8) находим P_k . Затем по формуле (3.1) находим кольцевые и радиальные напряжения в трубах, а по формуле (3.6) в муфте из никелида титана.

Далее в расчете на прочность используется 4-я энергетическая теория прочности [85], определяют эквивалентные напряжения, что в полной мере соответствует интенсивности нормальных напряжений – σ_i в классической теории пластичности [10] и имеет вид (3.9).

$$\sigma_i = \sigma_s = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_t^2 - \sigma_r \cdot \sigma_t}, \quad (3.31)$$

Для точек $r = a, c, b$ осуществляется проверочный расчет на прочность.

$$\sigma_{s1}(a); \quad \sigma_{s1}(c) \leq [\sigma_1]; \quad \sigma_{s2}(c); \quad \sigma_{s2}(b) \leq [\sigma_2] \quad (3.32)$$

где σ_{1s}, σ_{2s} – эквивалентные напряжения в точках для стали и никелида титана.

Кроме того, вводили, аналогично расчету для цилиндрической муфты, условие загруженности конструкции для первого и для второго материала, коэффициент загруженности конструкции:

$$k_1 = \frac{\sigma_{s1}}{[\sigma_1]}; \quad k_2 = \frac{\sigma_{s2}}{[\sigma_2]} \quad (3.33)$$

Предлагаемая конструкция сможет обеспечивать герметичность, надежность и ремонтпригодность трубопровода, уменьшение массы, трудоемкости и материалов на его изготовление и монтаж.

Для оценки глубины буртика запишем условие бесконтактности в месте проточки при утонении для трубы: $\left(\frac{D_r}{2} - h_r\right) \cdot \varepsilon_n \leq h_r$, откуда $\left(\frac{D_n}{2} - h_n\right) \cdot \varepsilon_n \leq h_n$, следовательно:

$$h_r \geq \frac{\varepsilon_n \cdot D_r}{2 \cdot (1 + \varepsilon_n)} \approx \frac{\varepsilon_n \cdot D_r}{2} = h_r^0 \quad (3.34)$$

где h_r – глубина проточки в трубе;

h_r^0 – минимальная величина проточки в трубе, при которой «буртик» не касается трубы.

$$h_r^0 = \frac{2 \cdot 10^{-2} \cdot 76}{2} = 0,76 \text{ мм}$$

Для патрубка:

$$h_n \geq \frac{\varepsilon_n \cdot D_n}{2 \cdot (1 + \varepsilon_n)} \approx \frac{\varepsilon_n \cdot D_n}{2} = h_n^0 \quad (3.35)$$

где h_n – глубина проточки в патрубке;

h_n^0 – минимальная величина проточки в патрубке, при которой «буртик» не касается трубы.

$$h_{\text{п}}^0 = \frac{2 \cdot 10^{-2} \cdot 89}{2} = 0,89 \text{ мм.}$$

Согласно (3.16, 3.17) минимальные величины выточек для трубы $D_m = 76$ мм, $\hat{\partial}_T = 8$ мм; для патрубка $D_n = 89$ мм, $\hat{\partial}_{\text{п}} = 6,5$ мм; $\varepsilon_{\text{п}} = 0,02$; $h_T^0 = 0,76$ мм; $h_{\text{п}}^0 = 0,89$ мм. Для обеспечения надежности соединения принимаем таким образом $h_T = h_{\text{п}} = 1$ мм.

Оценка изменения кольцевых напряжений за счет проточек

В проточках возрастают кольцевые напряжения за счет уменьшения толщины стенки трубы. Для оценки номинальных напряжений приемлемо приближение тонкостенных сосудов [85] по формуле (3.13):

$$\sigma_{\kappa} = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \hat{\partial}} \quad (3.36)$$

где D – диаметр трубы, мм;

$\hat{\partial}$ – толщина стенки трубы, мм.

В утонченном месте на глубину проточки – h

$$\sigma_{\kappa}^y = \frac{P \cdot (D - 2 \cdot h)}{2 \cdot (\hat{\partial} - h)} \quad (3.37)$$

Коэффициент усиления напряжений за счет утончения трубы на глубину проточки – h .

$$k = \frac{(D - 2 \cdot h) \cdot \hat{\partial}}{D \cdot (\hat{\partial} - h)} = \frac{\left(1 - \frac{2 \cdot h}{D}\right)}{\left(1 - \frac{h}{\hat{\partial}}\right)} = \frac{\left(1 - \frac{h}{\hat{\partial}} + \frac{h}{\hat{\partial}} - \frac{2 \cdot h}{D}\right)}{1 - \frac{h}{\hat{\partial}}} = 1 + \frac{\frac{h}{\hat{\partial}} - \frac{2 \cdot h}{D}}{1 - \frac{h}{\hat{\partial}}} \approx 1 + \frac{h}{\hat{\partial}} \quad (3.38)$$

Тогда коэффициенты усиления напряжений в трубе за счет уменьшения толщины будут:

$$k_m \approx 1 + \frac{1}{8} = 1,13; \quad k_n \approx 1 + \frac{1}{6,5} = 1,17 \quad (3.39)$$

Тогда с учетом ослабления труб за счет проточек формулы (3.13) для коэффициентов загруженности примут вид:

$$k_1 = \frac{\sigma_{\varepsilon 1}}{k_m \cdot [\sigma_1]}; \quad k_2 = \frac{\sigma_{\varepsilon 2}}{k_n \cdot [\sigma_2]} \quad (3.40)$$

На рисунке 3.6 изображен алгоритм расчета для рассчитываемой муфты.

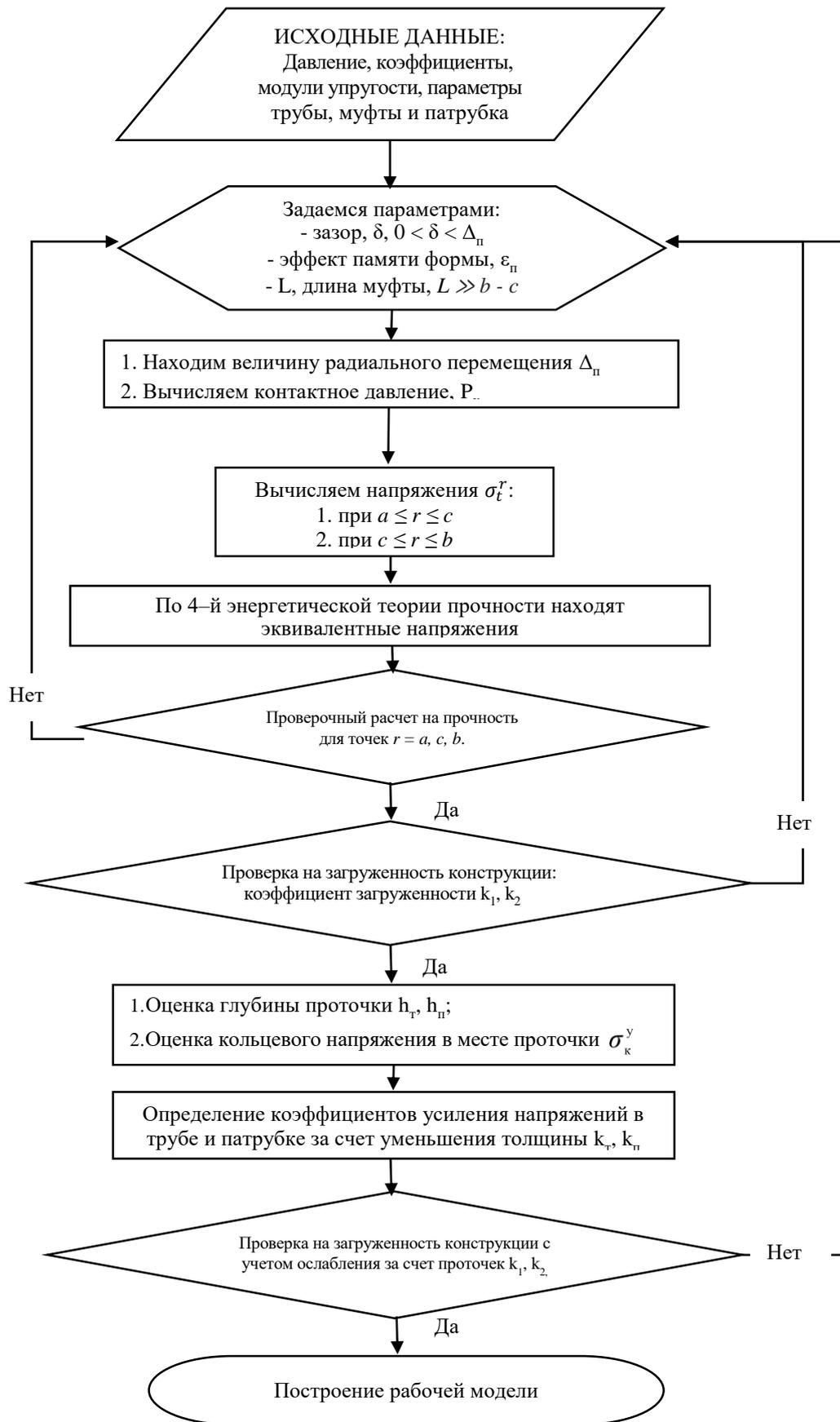


Рисунок 3.6 – Процедурный алгоритм расчета параметров муфтового соединения ступенчатого профиля

3.1.5 Результаты расчётов цилиндрической муфты

На базе разработанного алгоритма были проведены расчёты, результаты которых были графически отображены на рисунках.

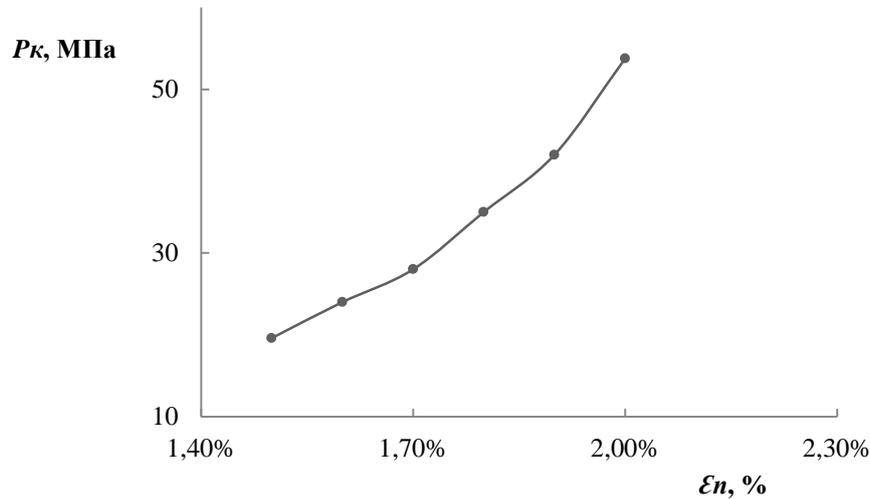


Рисунок 3.6 - Зависимость контактного давления от величины деформации памяти предварительно сообщенной муфте в радиальном направлении

Из рисунка 3.6 следует, что контактное давление монотонно возрастает с ростом величины деформации памяти - ε_n предварительно заданной в радиальном направлении.

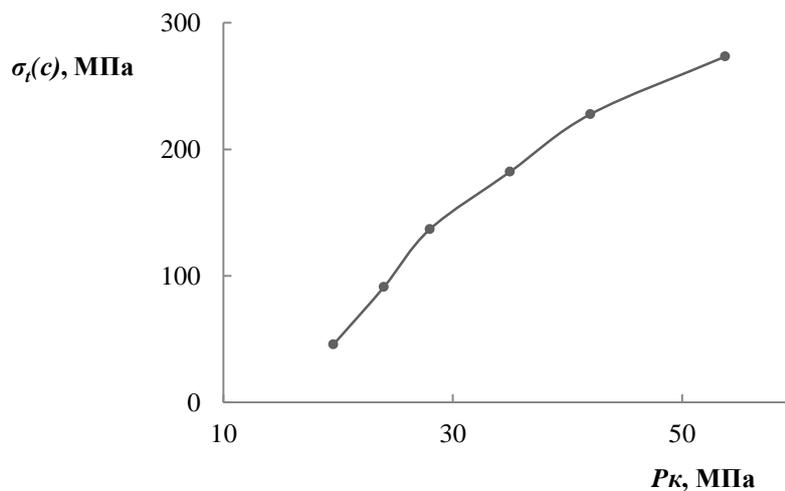


Рисунок 3.7 - Зависимость величины кольцевого напряжения в стальной трубе от величины контактного давления в точке c

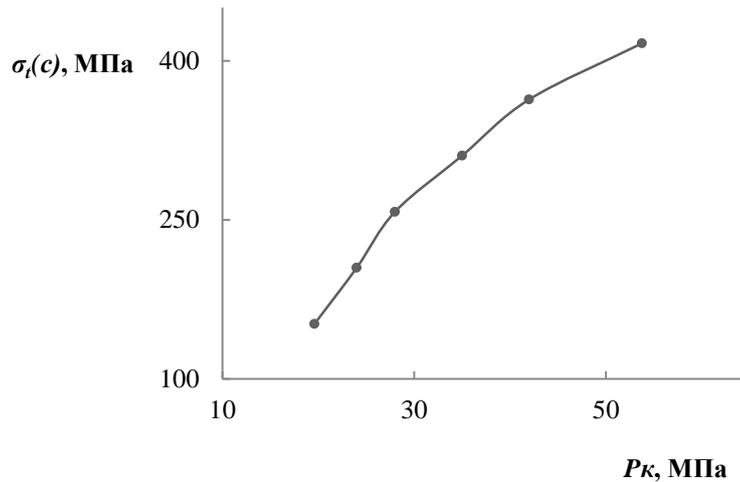


Рисунок 3.8 - Зависимость величины кольцевого напряжения в муфте из никелида титана от величины контактного давления в точке c

Рисунки 3.7 и 3.8 свидетельствуют о том, что кольцевые напряжения монотонно возрастают с ростом контактного давления.

На рисунках 3.9 – 3.10 представлены зависимости эквивалентных напряжений от кольцевых для точки c , определяемых по формуле (3.20).

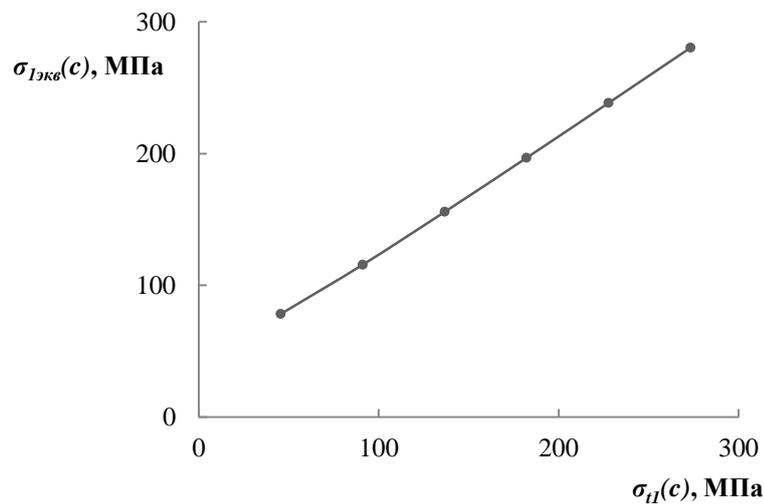


Рисунок 3.9 - Зависимость величины эквивалентного напряжения в точке c от величины кольцевого напряжения для трубы

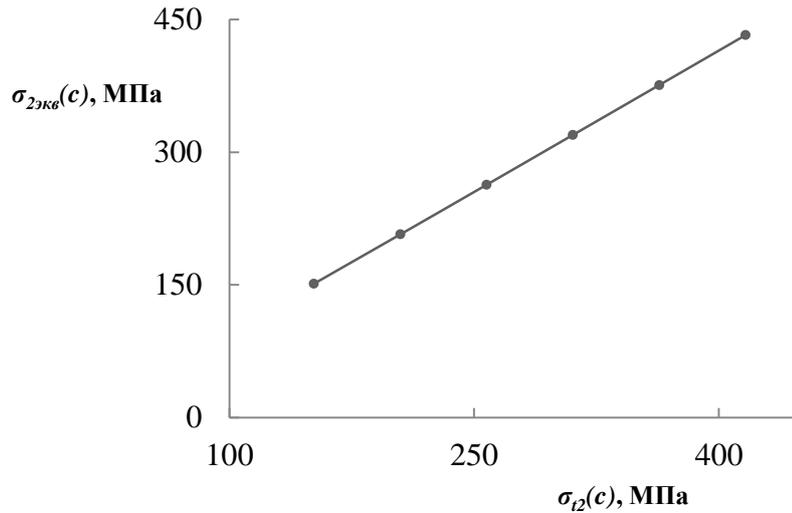


Рисунок 3.10 - Зависимость величины эквивалентного напряжения в точке c от величины кольцевого напряжения для трубы

Рисунки 3.11 – 3.12 иллюстрируют области изменения отношений напряжений $0,8 \leq (\sigma_i / [\sigma]) \leq 1$, при которых выполнено условие прочности и соблюдены условия загруженности материалов для стали и никелида титана.

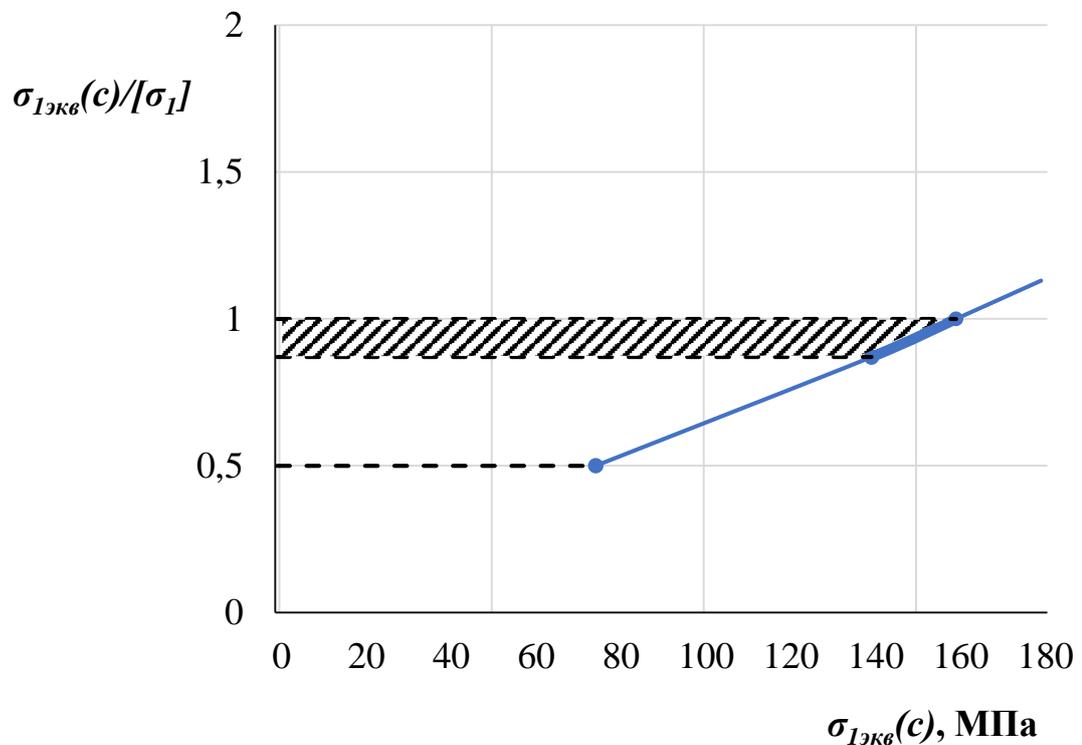


Рисунок 3.11 - Зависимость $\sigma_{1экв}(c)/[\sigma_1]$ от напряжения $\sigma_{1экв}(c)$ в точке c

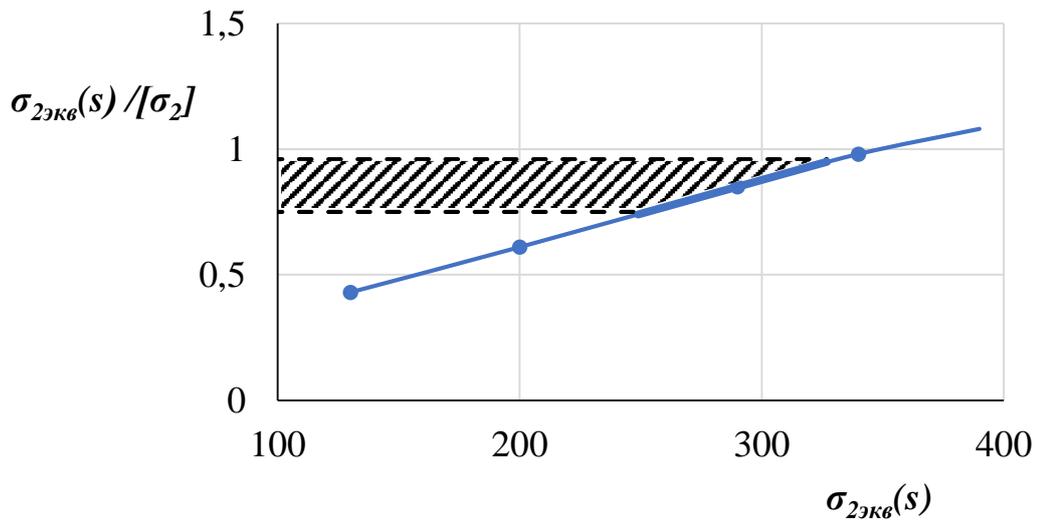


Рисунок 3.12 - Зависимость $\sigma_{2экв}(s)/[\sigma_2]$ от напряжения $\sigma_{2экв}(s)$ в точке s

Зависимость минимальной длины соединения от величин технологических параметров (деформация, вызванная ЭПФ; зазор между трубой и муфтой) приведена на рисунке 3.13. Вариация параметров соединения: задаваемой деформации ЭПФ в радиальном направлении и величины технологического зазора в границах поверхности диаграммы позволяет получить оптимальную конструкцию муфты с соблюдением условий нагруженности и неразъемности (3.18).

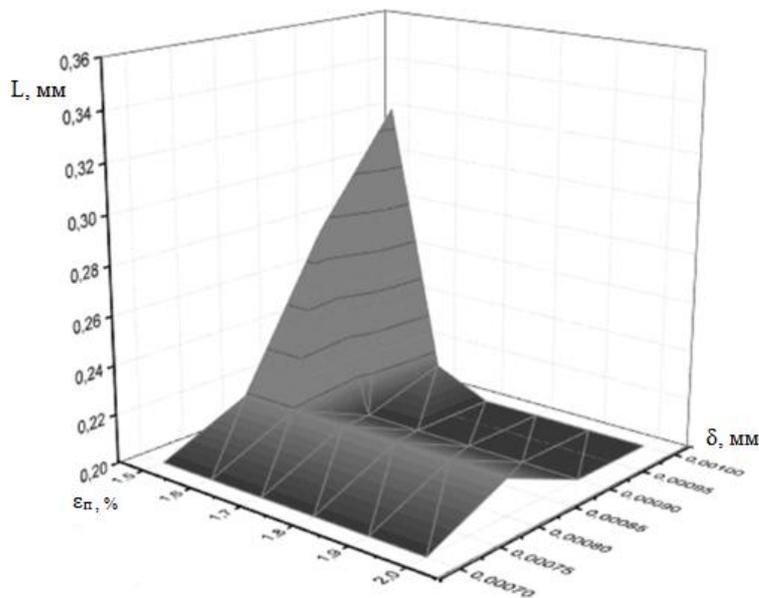
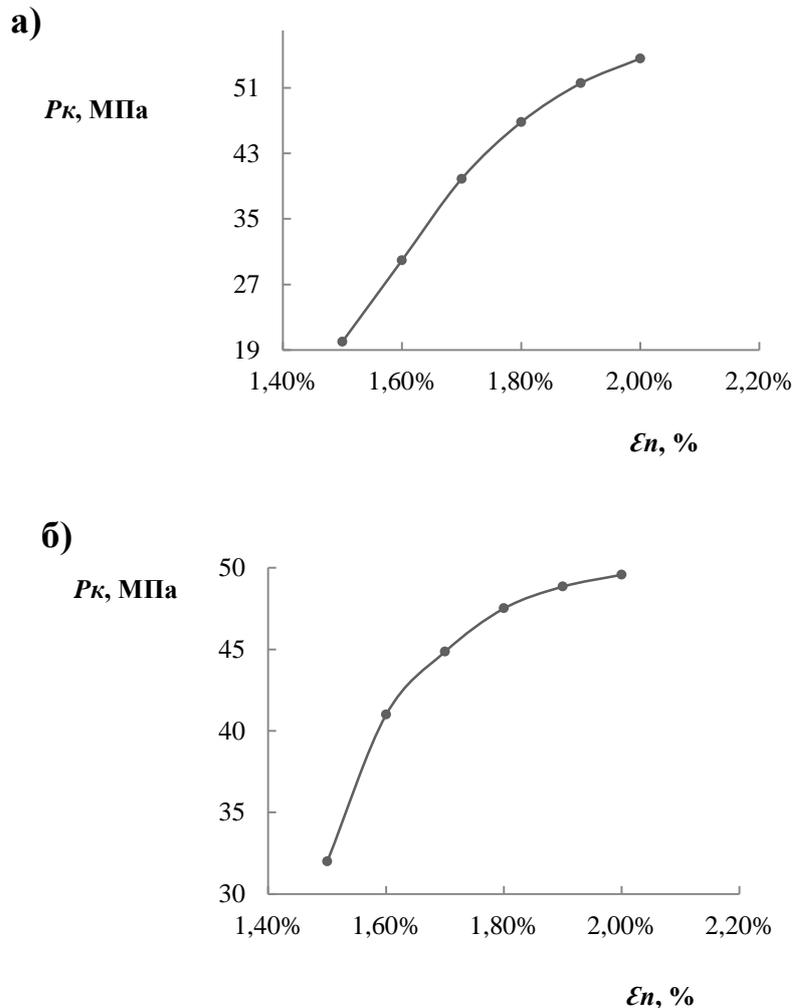


Рисунок 3.18 – Зависимость минимальной длины муфтового соединения от величин технологических параметров: деформация, вызванная ЭПФ - ϵ_n , зазор между трубой и муфтой- δ

3.1.6 Результаты расчётов цилиндрической ступенчатой муфты

На рисунках 3.14 -3.21 приведены результаты решения задачи Ламе для муфты ступенчатого профиля из никелида титана.

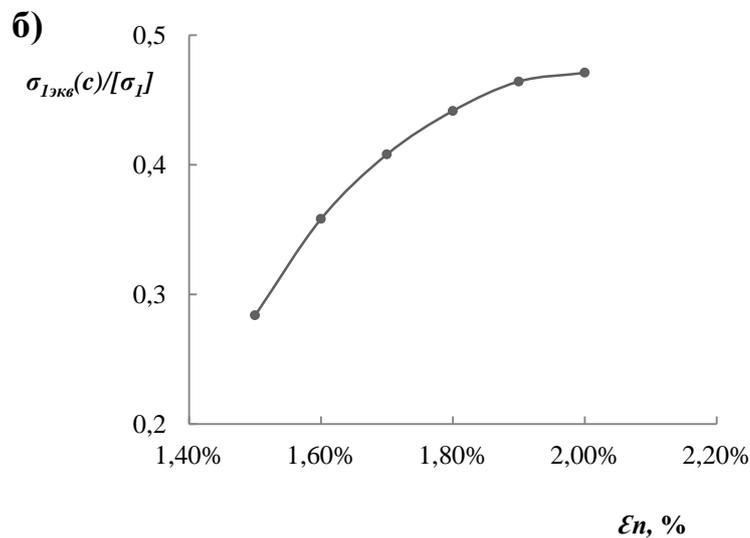
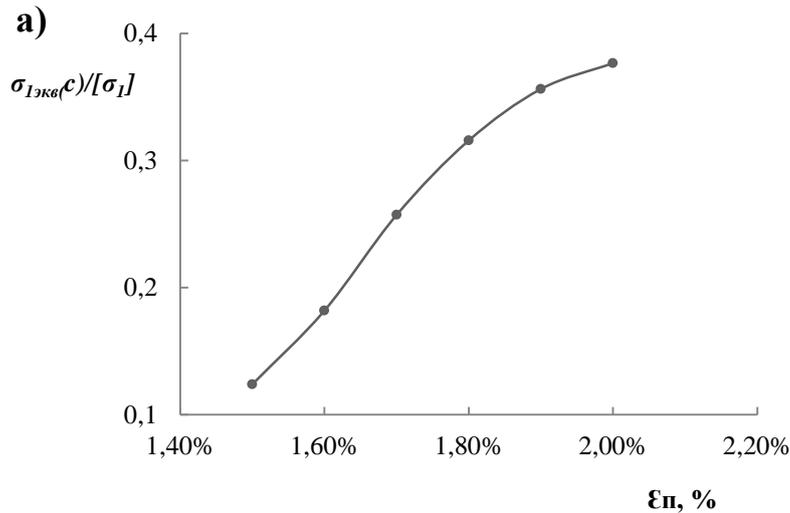
На нижеследующих графиках представлены некоторые зависимости, которые удалось получить в результате расчета данной муфты.



а - стальная труба-муфта из NiTi, б - стальной патрубок – муфта из NiTi

Рисунок 3.14 - Зависимость контактного давления от величины деформации памяти предварительно сообщенной муфте в радиальном направлении при $\delta = 0,1$ мм

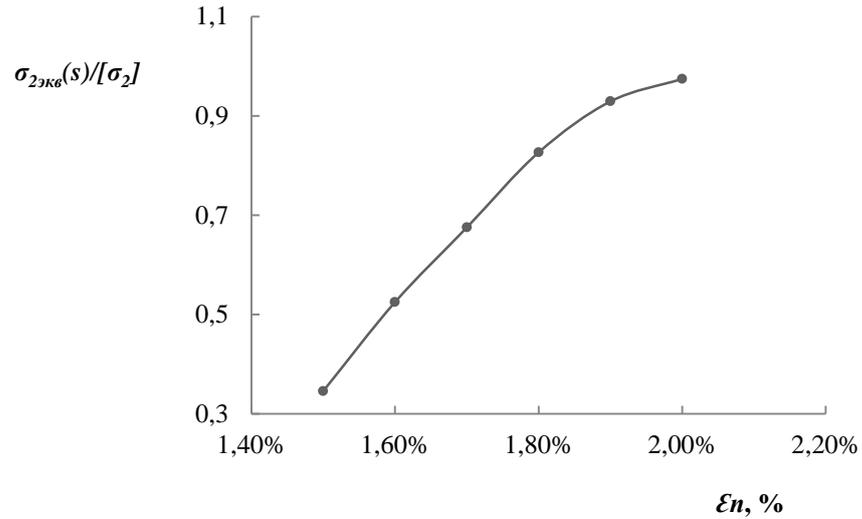
Из рисунка 3.14 следует, что контактное давление монотонно возрастает с ростом величины деформации памяти - ϵ_n предварительно заданной в радиальном направлении.



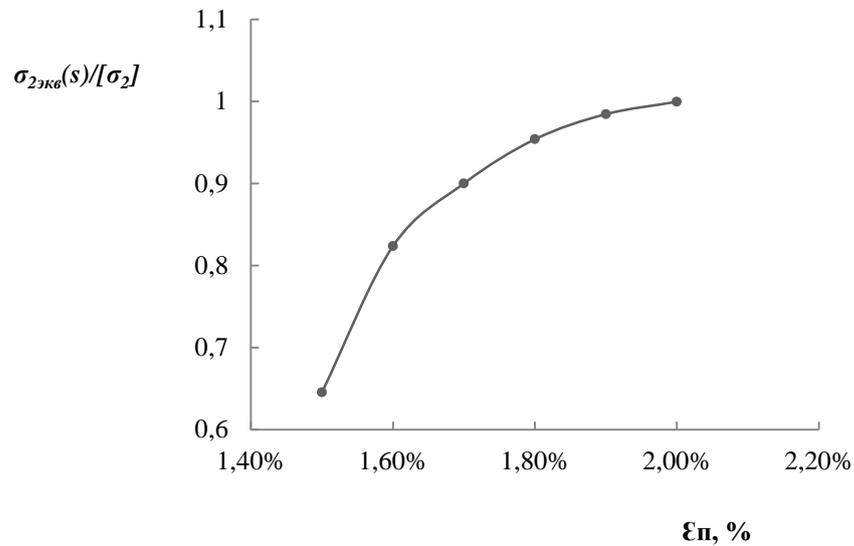
а - стальная труба-муфта из NiTi, б - стальной патрубок – муфта из NiTi
 Рисунок 3.15 - Зависимость $k_1 = \sigma_{1 экв(c)}/\sigma_1$ от величины деформации памяти
 при $\delta = 0,1$ мм

На рисунках 3.15 – 3.16 представлены зависимости эквивалентных напряжений от кольцевых для точек c и s соответственно, от величины деформации памяти. Во всех случаях наблюдается возрастание эквивалентных напряжений с ростом деформационного параметра памяти формы. При этом, как и следовало ожидать, напряжения растут как в стальных элементах конструкций – труба, патрубок, так и в муфте из NiTi в части трубы и патрубка.

а)



б)



а - стальная труба-муфта из NiTi, б - стальной патрубков – муфта из NiTi

Рисунок 3.16 - Зависимость $k_2 = \sigma_{2_{экв}}(s)/\sigma_2$ от величины деформации памяти в никелиде титана при $\delta = 0,1$ мм

Наибольший интерес представляет влияния величин проектировочных параметров - ϵ_n , δ на величины коэффициентов загруженности конструкций: $\sigma_{1_{экв}}/[\sigma_1]$ и $\sigma_{2_{экв}}/[\sigma_2]$, представленный на рисунках 3.17-3.20.

Величины коэффициентов загруженности конструкций k_1, k_2 довольно сложным образом зависят от величин параметров проектирования - ϵ_n , δ .

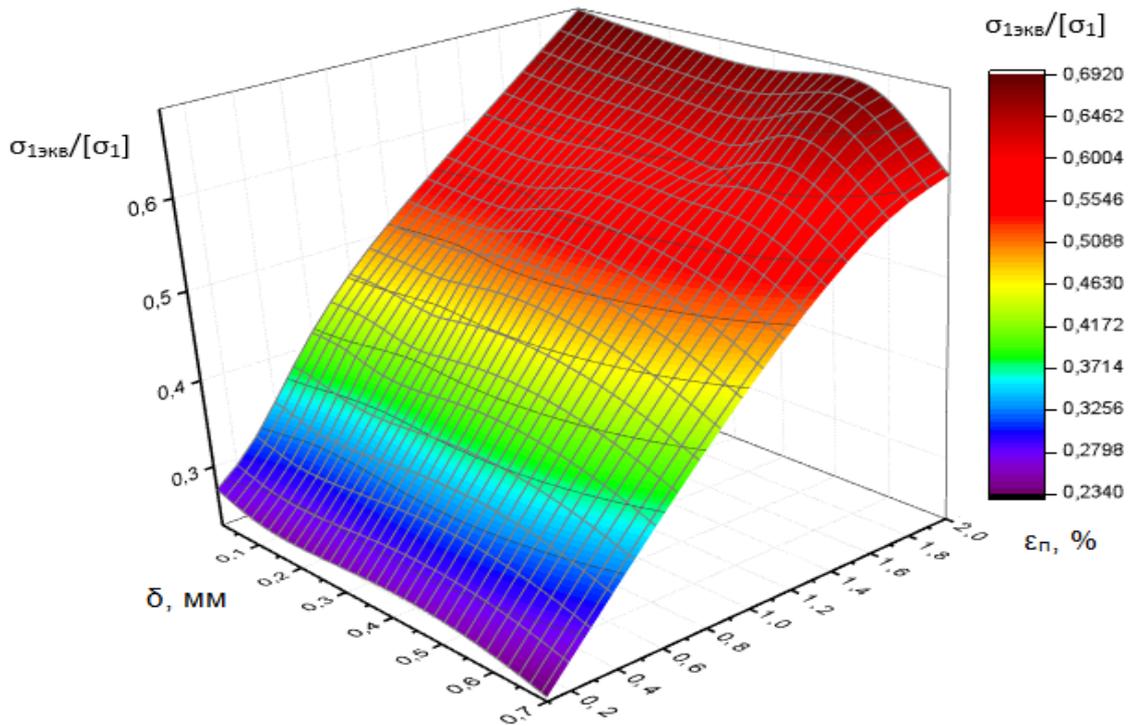


Рисунок 3.17 - Зависимость $k_1 = \sigma_{1\text{экв}} / [\sigma_1]$ от величин технологических параметров - ϵ_p , δ у стальной трубы. Здесь выполняется $k_1 < 1/1,13 = 0,88$

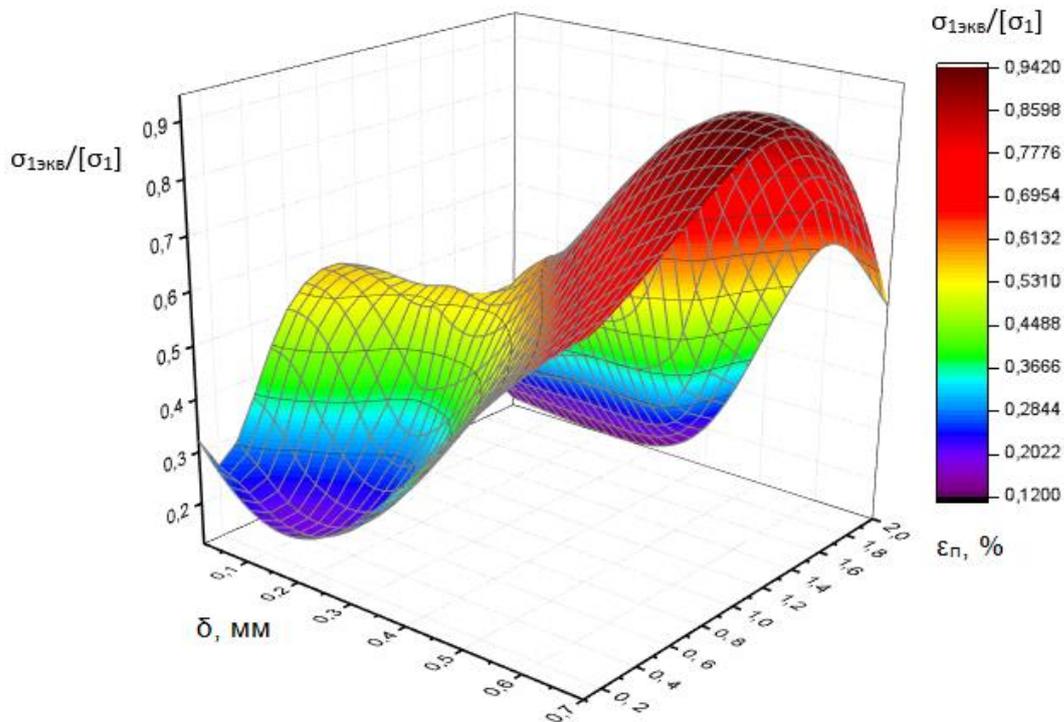


Рисунок 3.18 - Зависимость $k_1 = \sigma_{1\text{экв}} / [\sigma_1]$ от величин технологических параметров - ϵ_p , δ для стального патрубка. Здесь выполняется $k_1 < 1/1,17 = 0,85$

При этом характерным оказалось следующее: для трубной части как для стальной трубы на рисунке 3.6 так и для муфты из NiTi справедливо, что коэффициенты с загруженностью в целом возрастают с ростом $\varepsilon_{\text{п}}$ и с уменьшением δ на рисунках 3.17, 3.19. В то время как для патрубка, как для стальной его в части, так и для муфты коэффициенты k_1 , k_2 изменяются «волнообразным» образом при изменении величин проектировочных параметров рисунке 3.18, 3.20.

Важно отметить, что если для зависимостей на рисунках 3.17, 3.18, 3.20 справедливы соотношения $k_1 = \frac{\sigma_{\varepsilon_1}}{[\sigma_1]} \leq \frac{1}{1,13} \approx 0,88$; $k_2 = \frac{\sigma_{\varepsilon_2}}{[\sigma_2]} \leq \frac{1}{1,17} \approx 0,85$, то для рисунка 3.19 на плоскости $\varepsilon_{\text{п}} - \delta$ существует область значений, для которых $k_2 > 0,88$, когда условие прочности не будет выполняться,

На рисунке 3.19 этому соответствует часть гиперповерхности, представленная красным цветом, лежащая выше секущей плоскости $k_2 = 0,88$. Пересечение секущей плоскости с названной гиперповерхностью дополнительно ограничивают область определения проектировочных параметров $\varepsilon_{\text{п}} - \delta$.

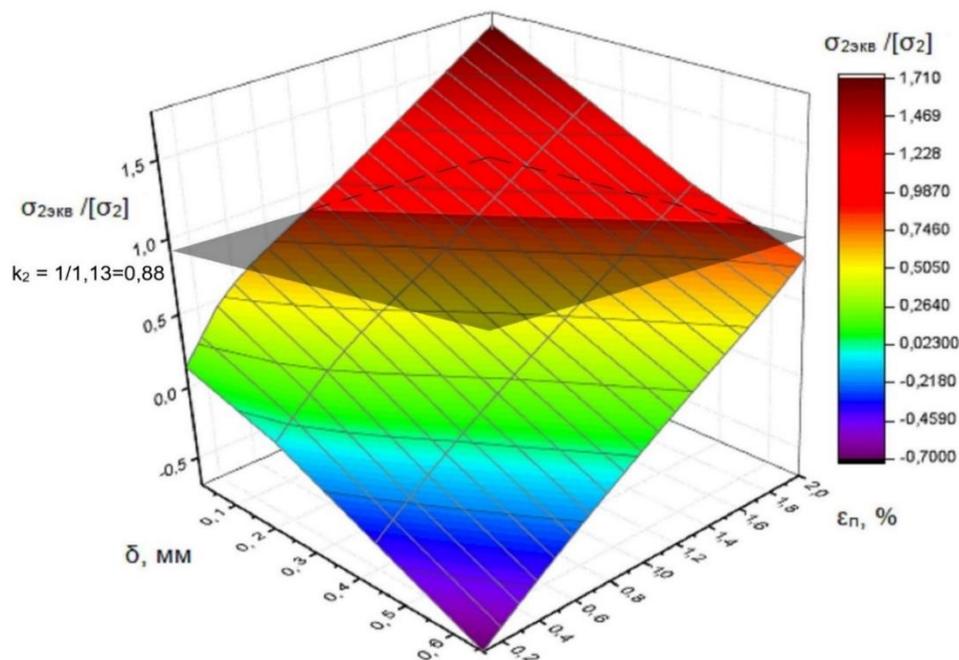


Рисунок 3.19 - Зависимость $k_2 = \sigma_{2\text{экв}}/[\sigma_2]$ от величин технологических параметров - $\varepsilon_{\text{п}}$, δ у муфты из никелида титана в области трубы. Здесь выполняется

$$k_2 \leq 1/1,13 = 0,88$$

На рисунке 3.20 представлена область изменения проектировочных параметров, отвечающая пересечению гиперповерхности и секущей плоскости на рисунке 3.19. Например, на рисунке 3.21 выделенный отрезок показывает, что при $\varepsilon_{\text{п}} = 1\%$ параметр δ меняется от 0,22 до 0,40 мм. Аналогичным образом можно определить пределы изменения δ для любого параметра $\varepsilon_{\text{п}}$ на рисунке 3.21.

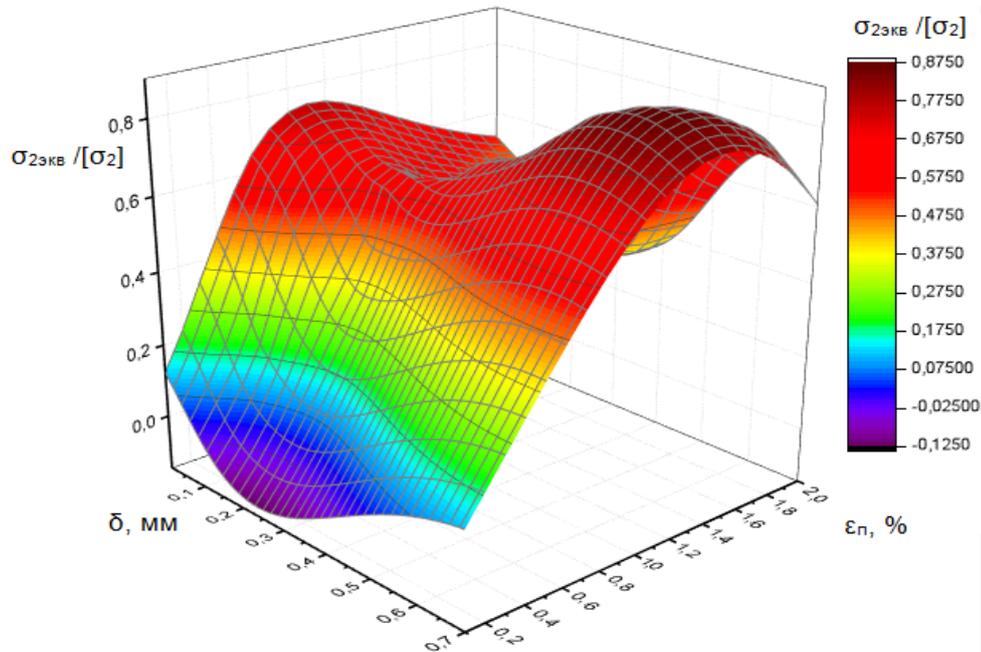


Рисунок 3.20 - Зависимость $k_2 < \sigma_{2\text{экв}}/[\sigma_2]$ от величин технологических параметров - $\varepsilon_{\text{п}}$, δ у муфты из никелида титана в области патрубка. Здесь выполняется

$$k_2 \leq 1/1,17=0,85$$

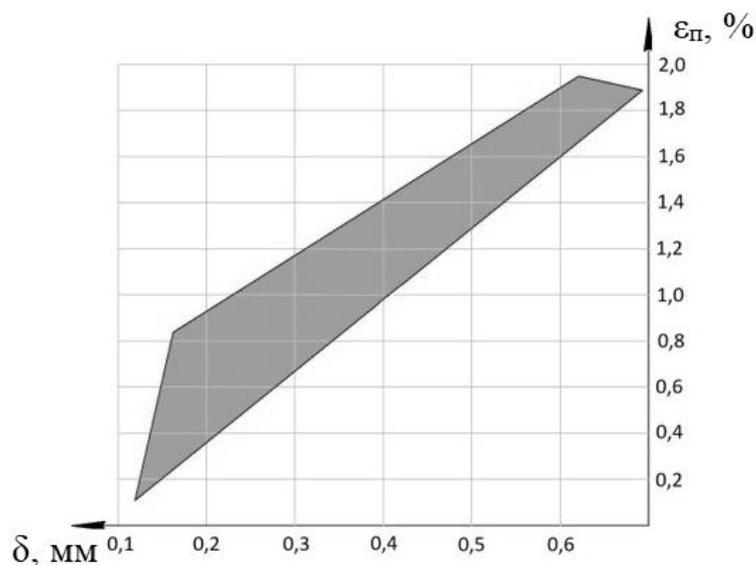


Рисунок 3.21 - Область задания проектировочных параметров $\delta - \varepsilon_{\text{п}}$ удовлетворяющих условию прочности для муфты ступенчатого профиля

3.2 Численная методика определения НДС термомеханических соединений. Разработка конечно-элементной модели

Для учета всех необходимых факторов, влияющих на работу систем «труба-муфта-труба» или «труба-муфта-задвижка», проведено компьютерное моделирование [11].

По результатам расчета с помощью программ конечно - элементного анализа становится возможным определить фактическое распределение напряжений в каждой точке объекта, однако правильная оценка полученных результатов требует определенных знаний и опыта.

Работа проводилась с использованием программного комплекса метода конечных элементов ANSYS для осесимметричной задачи в линейно-упругом приближении [94].

В программе ANSYS создается компьютерная модель изделия или его составной части; прикладываются действующие нагрузки или другие проектные воздействия; изучаются ответы системы в виде распределений температур, напряжений.

В работе использовалась версия 15 программы ANSYS.

План работы в ANSYS был разделен на 3 этапа:

- 1 – построение геометрической 3D модели с необходимыми начальными условиями, границами разбиения и сгущения сетки конечных элементов;
- 2 – задание граничных условий в зависимости от постановки решения;
- 3 – обработка полученных результатов.

3.2.1 Моделирование геометрии термомеханического соединения

Исследуемые модели муфт соответствовали геометрическим размерам реальной контактной пары. При создании конечно-элементной модели существенное внимание было уделено области, в которой деформирующий элемент непосредственно контактирует с обрабатываемой поверхностью,

поскольку для получения адекватного решения методом конечных элементов предпочтительно использовать формы, близкие к правильным геометрическим фигурам.

Для построения конечно-элементной модели, задания граничных условия и расчета напряженно-деформированного состояния в программе ANSYS был выбран раздел WORKBENCH и расчётный модуль статического конструкционного анализа Static Structural, используемый для трехмерного моделирования осесимметричных конструкций и для решения задач механики деформируемого твердого тела в статической постановке) [47-49].

Контактное взаимодействие приводит к неравномерному распределению напряжений, что в свою очередь требует построения соответствующей сетки конечных элементов — в зоне с высоким значением градиента напряжений следует генерировать более мелкие конечные элементы. Необходимо отметить, что все элементы, в том числе и в зоне наибольшего сгущения, имеют форму, близкую к квадрату, что обеспечивает сходимость вычислений.

Моделирование контактного взаимодействия при процессах обжатия проводилось в автоматическом режиме с использованием элемента Connections, в итоге получено 3 контактных взаимодействия типа Bonded (связанный контакт, зазор между телами автоматически закрывается, проникновение игнорируется) [46, 56, 106].

Время полного процесса компьютерного моделирования на персональном компьютере на базе процессора Intel CORE i3 составило около 4 ч.

В качестве модельного материала использовали сплав, содержащий 49,25 (ат.) % Ti, остальное Ni, удовлетворяющий следующим требованиям: низкое значение характеристической температуры начала прямого мартенситного перехода - M_n , высокий предел текучести при комнатной температуре (не менее 450 МПа) достаточно высокое значение эффекта памяти формы и пластичности прямого превращения в интервале возможных теплосмен, в которых функционирует муфта. Интервал эксплуатации материала муфты составлял от 0 до +30° С. Предполагали, что в муфте, находящейся под действием растягивающих

усилий заданной интенсивности $P=Q/F$, путем термоциклического воздействия создавали некоторый деформационный эффект памяти формы в радиальном направлении – ε_n . Согласно [6] считали, что величина деформации – ε_n может задаваться путем варьирования величины интенсивности – P внутренней силы при термоциклировании. Таким образом, применительно к данной муфте использовали два деформационных параметра проектирования – величина деформации ε_n и зазор δ .

Были получены значения напряжений, возникающих в результате процесса обжима. Распределение полей напряжений получено как в текстовой, так и в графической формах.

Важно отметить, что упомянутых в [10, 13] муфтах выполнен проектировочный расчет на прочность аналитически с помощью решения классической задачи Ламе. При аналитическом решении для толстостенных труб предполагали, что трубы и муфта имеют значительную длину ($l/D \gg 7$).

3.2.2 Трёхмерное моделирование конструкций

Для расчета в качестве исходных данных были приняты следующие параметры:

1. Расчётная температура 20°C.
2. Материал трубопровода, задвижки - сталь, материал муфты – никелид титана.

Механические свойства стали, никелида титана представлены в таблицах 3.2, 3.3 [26, 87].

Основные характеристики запорной арматуры приведены в таблице 3.4 [27, 28].

На данном этапе необходимо задать свойства материалов, граничные и начальные условия задачи, выбрать методы расчета, настроить решатель в соответствии с принятой физико-математической моделью и задать требуемую точность расчета.

Таблица 3.2 — Механические свойства стали

Параметр	Значение
Плотность	7850 кг/м ³
Коэффициент теплового расширения	12·10 ⁻⁶ К ⁻¹
Удельная теплоемкость	434 Дж/(кг·°С)
Теплопроводность	60,5 Вт/(м·К)
Удельное сопротивление	1,7·10 ⁻⁷ Ом·м
Модуль Юнга	2·10 ¹¹ Па
Коэффициент Пуассона	0,3

Таблица 3.3 — Механические свойства никелида титана

Параметр	Значение
Плотность	6500 кг/м ³
Коэффициент теплового расширения	8·10 ⁻⁶ К ⁻¹
Удельное сопротивление	5,7·10 ⁻⁷ Ом·м
Модуль Юнга	7·10 ¹⁰ Па
Коэффициент Пуассона	0,48

Таблица 3.4 – Основные характеристики запорной арматуры

Параметр	Значение
Рабочая среда	Пластовая вода
Номинальный диаметр	90 мм
Номинальное давление	15 МПа
Температура рабочей среды	+30 °С
Температура окружающей среды	-43÷39 °С
Масса	430 кг

Свойства материалов стали для трубопроводов и никелида титана для муфт задаются в соответствии с таблицами 3.2-3.4 и прописываются в Engineering Data – интерфейсе для управления базой данных физических и механических свойств материалов, а также входных параметров математических моделей [47 - 49].

На рисунке 3.22а изображено первое соединение, которое представляет собой муфту из никелида титана в компоновке с соединяемыми трубами.

Общая вычислительная размерность расчетной модели первой муфты составила 31106 узлов, число элементов составило более 4700: муфта – 1482 элементов; труб по 1564 элементов.

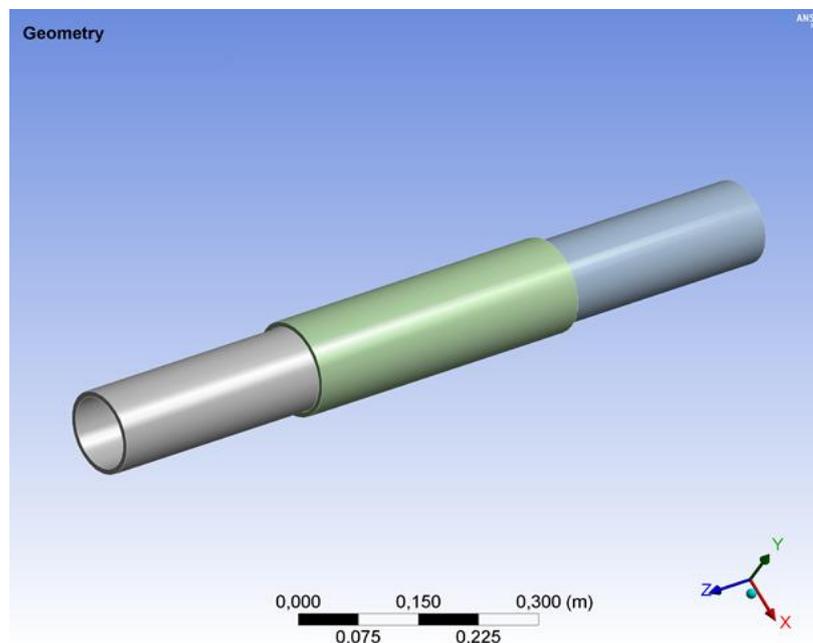


Рисунок 3.22а - Общий вид конструкции муфты

Вторая конструкция муфты имеет ступенчатый профиль и предназначена для соединения промышленных трубопроводов с запорной арматурой, изготовлена из материала с эффектом памяти формы, обладающего повышенной стойкостью к перекачиваемым агрессивным средам. В работе [10] такую муфту рассчитывали классическим способом путем решения задачи Ламе. Предполагали, что также как и в случае первой муфты использовались два проектировочных деформационных параметра ε_n и δ .

Общий вид второй муфты приведен на рисунке 3.22б. Муфта имеет ступенчатого профиля ввиду того что соединяемые части (трубопровод и запорная

арматура) имеют разный диаметр. Акцент расчета ставился на анализе эквивалентного расчетного напряжения для данной конструкции.

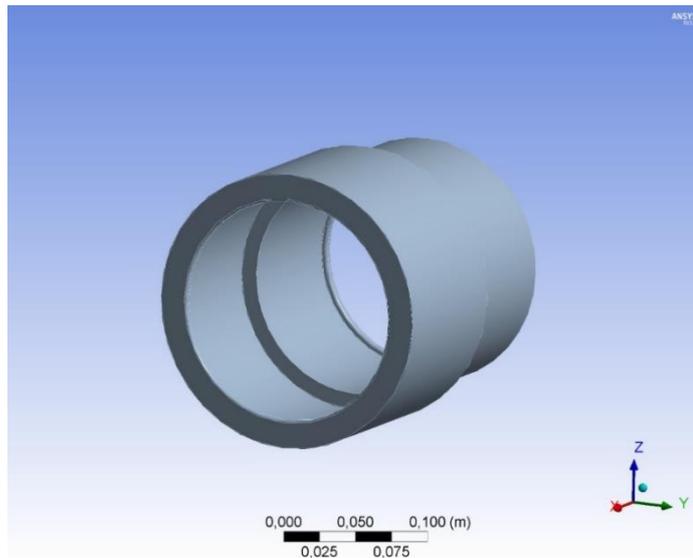


Рисунок 3.22б — Общий вид муфты ступенчатого профиля

Общая вычислительная размерность расчетной модели муфты ступенчатого профиля составила 23180 узлов, число элементов составило более 11900: муфта – 4458 элементов; труба – 3776; задвижка – 3685.

Построение геометрических тел муфт и трубопроводов проводилось на базе Geometry при использовании подраздела Sketch на основе полученных данных во 2 главе.

Для построения цилиндрических тел трубопроводов и муфты применялись элементарные геометрические тела Circle с заданными размерами, которым в последствии придавалась трёхмерная цилиндрическая форма необходимой толщины при помощи команды Extrude.

Впоследствии каждое (из трёх) геометрических тел соединялось в общую конструкцию «трубопровод-трубопровод-муфта».

Для создания ступенчатой муфты применялась криволинейная поверхность, выполненная при помощи команды Line. После создания данной поверхности ей придаётся объём командой Revolve с указанием оси, вокруг которой будет выстраиваться объект и расстояния до неё. В итоге получаем пространственный объект, изображённый на рисунке 3.23.

Для обеих конструкций задавалась величина зазора δ в соответствии с расчётами в предыдущих параграфах.

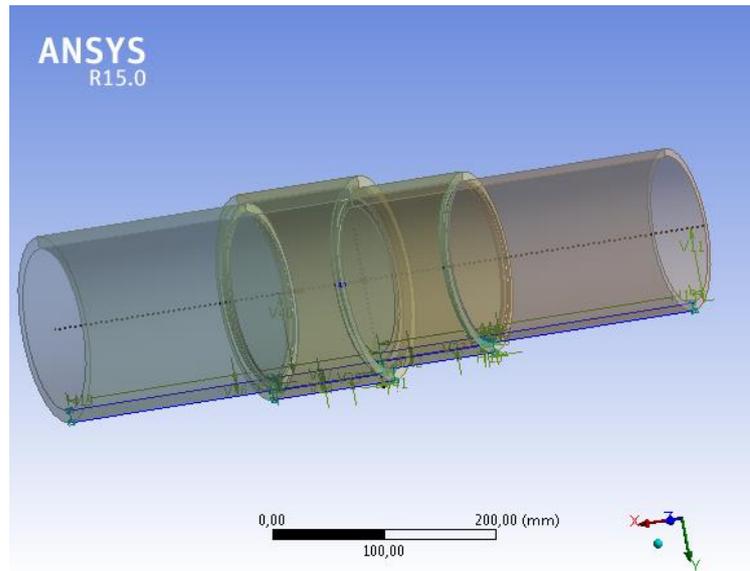


Рисунок 3.23 – Пример построения сложной цилиндрической конструкции «труба-муфта-труба»

3.2.3 Создание конечно-элементной сетки

Дальнейшая работа проводилась на базе Model.

Применяя сеточный препроцессор Mesh генерируем сетку конечных элементов, которая служит основой для создания математической модели работы конструкции. Следует отметить, что для соединения с плоской муфтой служит регулярная гексаэдрическая сетка, для соединения со ступенчатой муфтой – регулярная тетраэдрическая сетка (рисунок 3.24).

3.2.4 Задание граничных условий и контактных пар

Постановка краевых условий производится в модуле Mechanical, постановка контактных условий проходила в автоматическом режиме. Взаимодействие тел осуществлялось режимом Bonded - целевая и контактная поверхности сцепляются по всем направлениям.

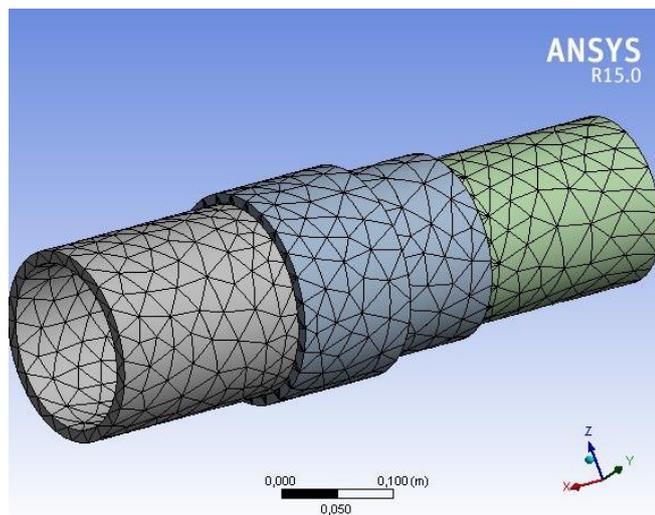


Рисунок 3.24 — Пример конечно-элементного разбиения конструкции регулярной тетраэдрической сеткой

Для обеих конструкций муфт, в данном случае, краевые условия одинаковы. Ограничение перемещений конструкции выполнено по всем возможным направлениям с помощью команды `Fixed support`. Поверхности, к которым применили жёсткие закрепления, являются торцевые части трубопроводов.

Также, во внутренней поверхности труб, задается давление жидкости `Hydrostatic Pressure`, соответствующее реальному давлению на промышленных системах (15 МПа).

Для моделирования эффекта памяти формы используется среда `Engineering Data`, в которой задаются группы параметров `Shape memory effect` и `Superelasticity`.

Материал создаем со свойством сверхупругости с константами, взятыми из экспериментальных данных. Начальные и граничные условия задачи определены исходя из реальных условий проведения эксперимента.

В итоге реализуется ЭПФ для никелида титана – происходит процесс накопления деформации, а затем её высвобождения; при нагреве происходит радиальное перемещение муфты на величину Δn с последующим обжатием трубопроводов и генерацией реактивных напряжений в месте контакта.

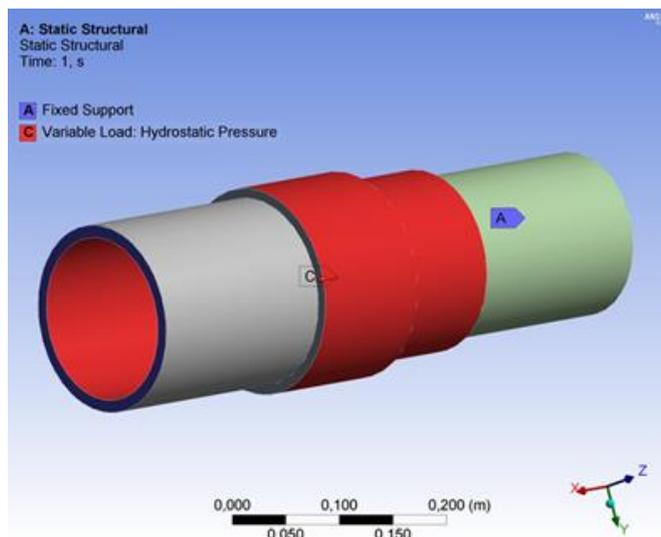


Рисунок 3.25 — Пример задания граничных условий на модели расчета

На рисунке 3.25 обозначение A – ограничение смещения конструкции (отсутствие осевых перемещений вдоль оси Z); значения контактных давлений между внутренней поверхностью муфты, трубой и патрубком задвижки, находили при помощи инструментов ANSYS: путем сжатия муфты на определённый процент (эффект памяти формы), таким образом достигалось обжатие соединяемых деталей муфтой, в результате которого были получены значения эквивалентных напряжений, указанных в таблице 3.5; обозначение C – внутреннее гидростатическое давление жидкости, составило 15 МПа.

Нагрузки от собственного веса в ANSYS учитываются автоматически при задании плотности материалов и ускорения свободного падения.

3.2.5 Обработка полученных результатов

На рисунке 3.26 изображены эквивалентные напряжения всей конструкции в сборе для муфты, соединяемой две трубы одного диаметра. Исходя из данных, которые отражены на рисунке 3.27, видно, что напряжения на поверхности стальных труб, примерно равны 300 МПа. Данные показатели удовлетворяют условиям, приведённым в [10].

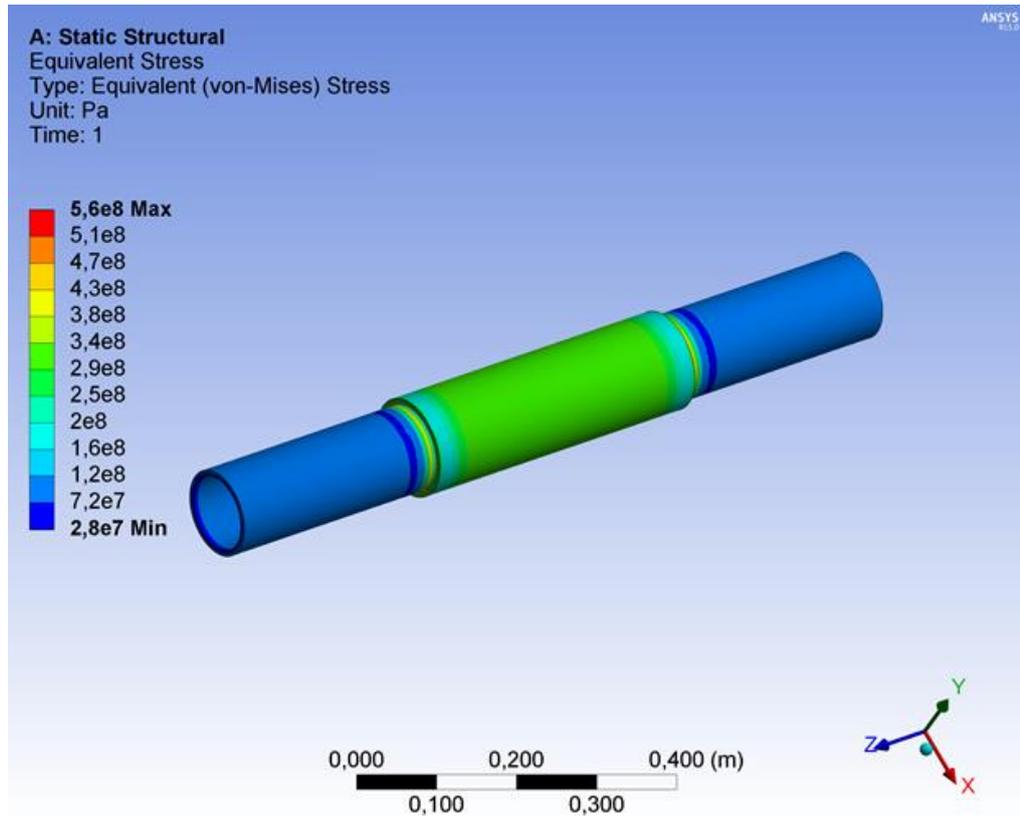


Рисунок 3.26 – Эквивалентные напряжения конструкции

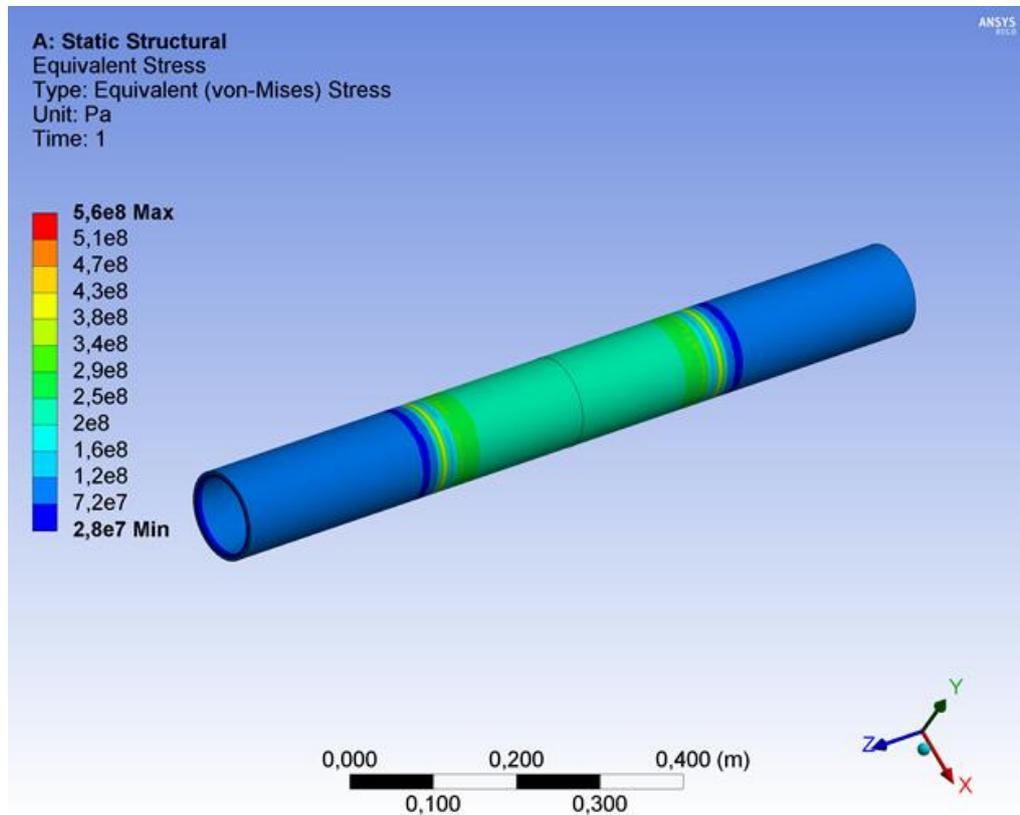


Рисунок 3.27 – Эквивалентные напряжения соединяемых трубопроводов

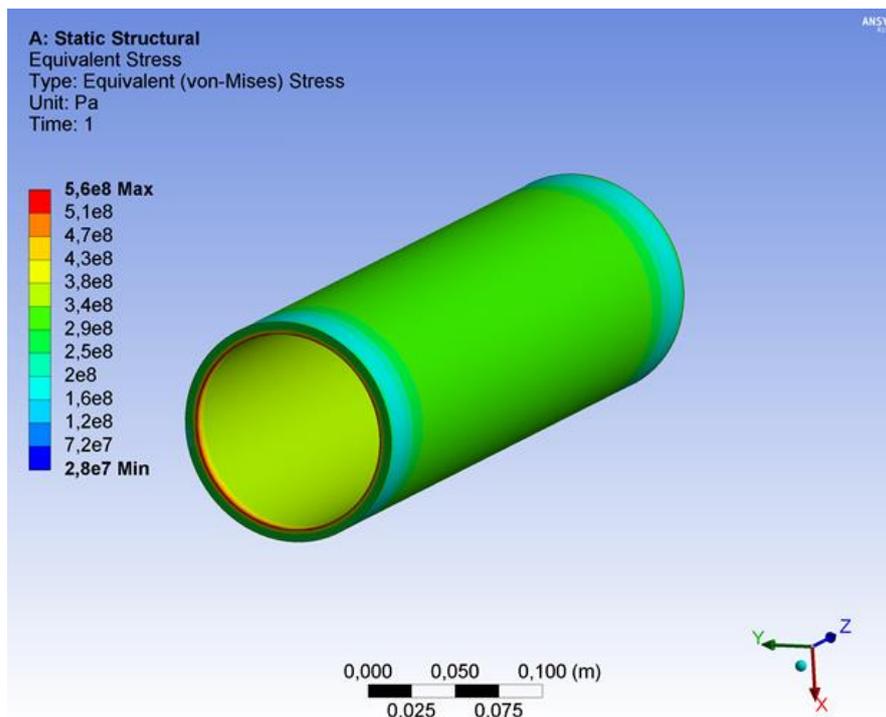


Рисунок 3.28 – Эквивалентные напряжения муфты из никелида титана для соединения труб одинакового диаметра

По рисунку 3.28 определяем средние эквивалентные напряжения на муфте. На внутренней стороне муфты напряжения равны 380 МПа, а на внешней стороне диапазон составляет 300 - 330 МПа. Это удовлетворяет условиям, приведённым в [10].

Общий вид конструкции муфты ступенчатого профиля показан на рисунке 3.29.

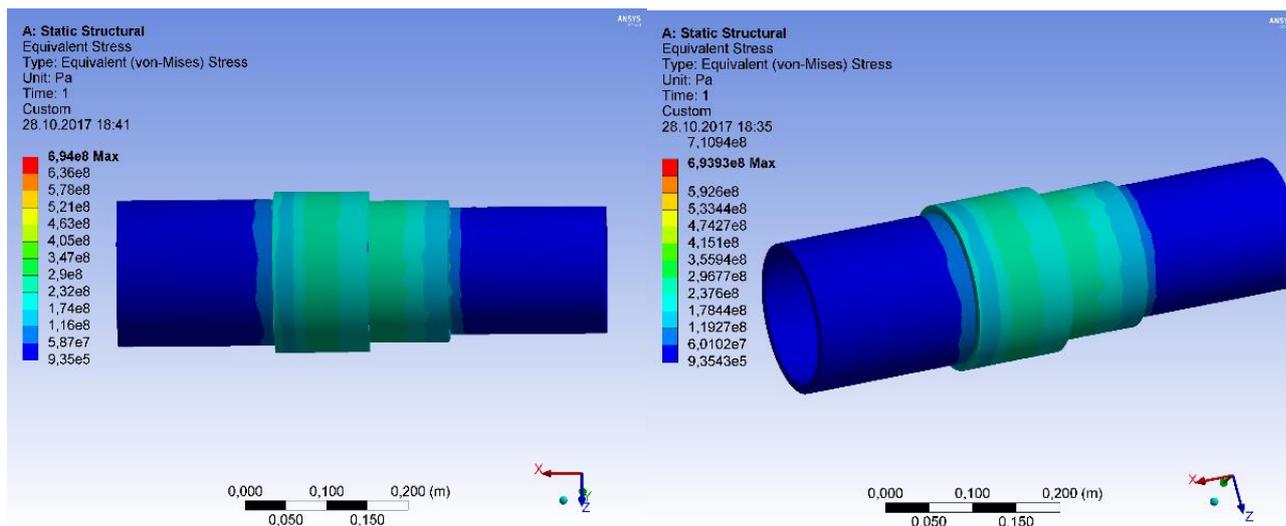


Рисунок 3.29 - Общий вид конструкции «задвижка – муфта – труба»

Согласно расчёта контактных напряжений обжимного усилия муфты, они равны 30 МПа. Полученные данные (процент памяти ε_n , зазор δ) подтверждают значения, определенные в [43].

Данная расчётная схема смоделирована в ANSYS при внутреннем давлении 30 МПа.

Графические представления моделирования отображены на нижеследующих рисунках.

На рисунке 3.30 изображены эквивалентные напряжения в муфте, которые показывают распределение напряжения по внутренней и внешней поверхности конструкции, их численное значение находится в диапазоне 130 – 250 МПа, что не превышает расчетные значения.

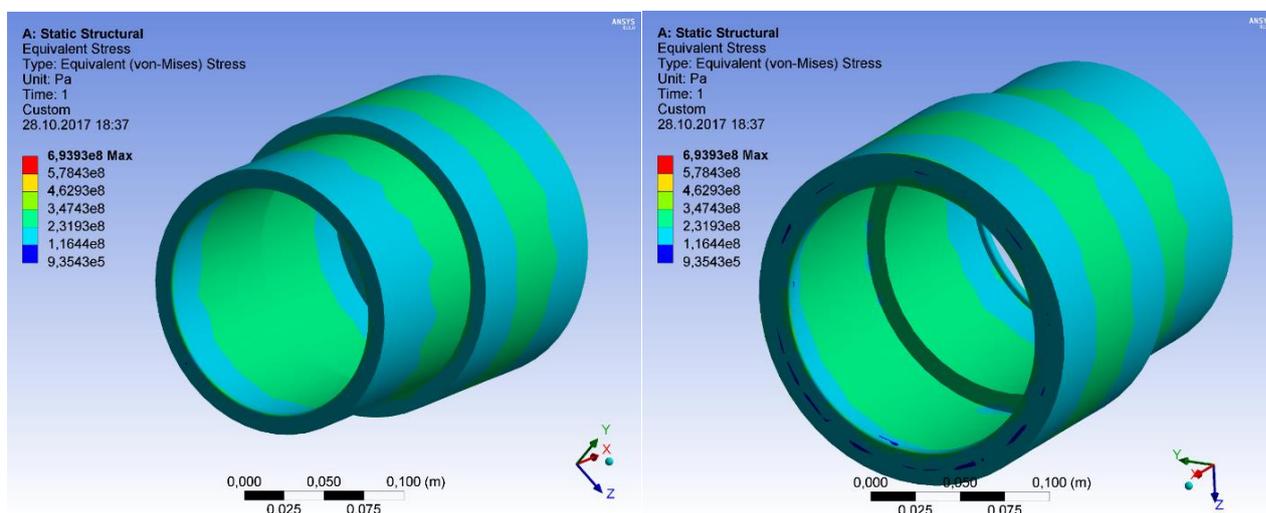


Рисунок 3.30 - Эквивалентные напряжения на муфте ступенчатого профиля

На рисунке 3.31 изображены эквивалентные напряжения на трубопроводе и патрубке, которые имеют значение в диапазоне 65 – 150 МПа, что соответствует расчётным значениям.

Уровень напряжения возникающие по телу муфты и соединяемыми частями не превышает полученных ранее значений, и находится в необходимом диапазоне, что подтверждает правильность проведённого расчёта.

Напряжения не превышают предела текучести материала трубы-задвиги-муфты, что также обеспечивает целостность конструкции.

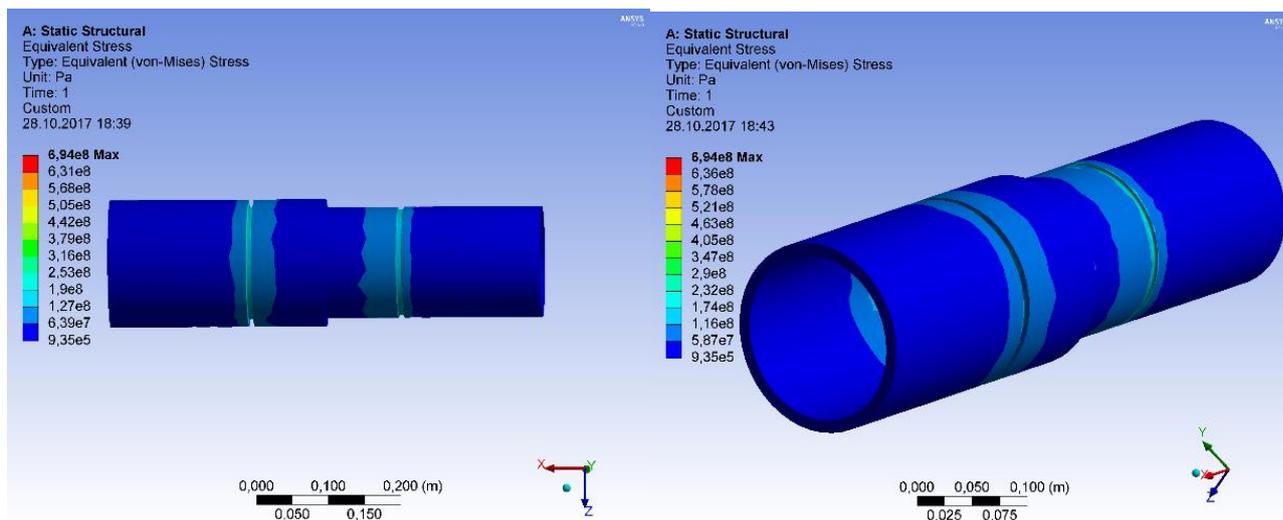


Рисунок 3.31 - Эквивалентные напряжения на трубе и патрубке

3.4 Сопоставление аналитических и численных методов решения задач деформирования цилиндрических оболочек. Вывод критерия обжимной жесткости

По результатам расчета двумя способами: расчетным и методом конечных элементов (МКЭ) была составлена таблица 3.5, в которой приведены численные значения эквивалентных напряжений.

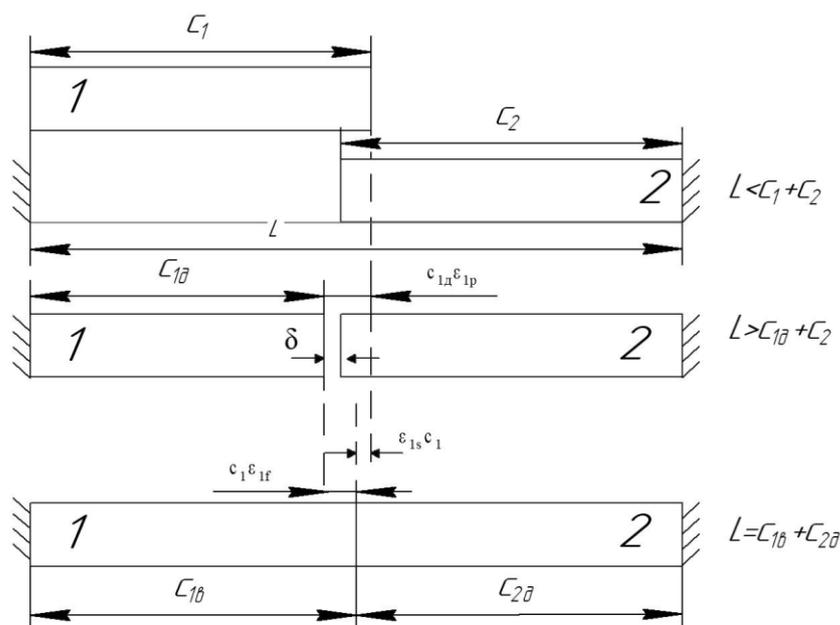
Таблица 3.5 – Сопоставление расчетных данных (эквивалентных напряжений) по методу решения задачи Ламе и ANSYS

Обозначение	Расчет аналитическим методом (Ламе), σ_3 , МПа	МКЭ ANSYS, σ_3 , МПа	Зазор, δ , мм	Деформация, вызываемая ЭПФ, ε_n , %
труба	120	110	0,4-0,8	1,0-1,8
муфта	240	230		
труба	107	104		
муфта	287	280		
задвижка	102	90		
муфта	270	255		
задвижка	97	87		
муфта	296	293		

Исходя из сравнения полученных данных ANSYS с результатами расчетов при помощи решения классической задачи Ламе, видим, что напряжения, найденные аналитически и МКЭ, совпадают с точностью до приемлемой погрешности. Это означает, что предложенные в данной работе и в [43, 85] методы являются взаимодополняющими, приемлемыми и доступными способами проектирования неразъемных соединений, выполненных из материалов с ЭПФ.

В результате проведенного исследования, аналитических и компьютерных расчетов был определен критерий обжимной жесткости системы «муфта из материала с ЭПФ – стальная труба» - g .

Для вывода данного критерия использовалась схема, изображенная на рисунке 3.32 [12].



L – общая длина силового элемента и детали; c_1 – длина силового элемента 1;

c_2 – длина детали 2; $c_{1\delta}$ – длина деформированного силового элемента 1;

$c_{1\delta} \varepsilon_{1p}$ – величина, на которую изменилась длина силового элемента 1;

δ – образовавшийся зазор; $c_1 \varepsilon_{1f}$ – деформация, вызванная ЭПФ;

$\varepsilon_{1s} c_1$ – нереализованная деформация ЭПФ; $c_{1\delta}$ – длина силового элемента 1 после реализации ЭПФ; $c_{2\delta}$ – длина детали 2 после реализации ЭПФ

Рисунок 3.32 - Схема зажима детали (2) силовым элементом (1) из сплава с памятью формы до и после при реализации его термического формовосстановления

$$g = \frac{E_A}{E} \cdot \frac{\varepsilon_{II} \cdot c}{\delta} \quad (3.41)$$

где E_A – модуль Юнга никелида титана, МПа;

E – модуль Юнга стали, МПа;

ε_{II} – деформация, вызванная ЭПФ, %;

c – внутренний радиус муфты из никелида титана, мм;

δ – зазор, между трубопроводом и муфтой, мм.

По построенному пространственному графику (рисунок 3.33) зависимости параметра обжимной жесткости муфты от технологических параметров зазора δ и деформации ε_{II} видно, что, изменяя значения зазора и деформации памяти, вводимый критерий качества обжатия сможет обеспечить надежное соединение муфты и трубы.

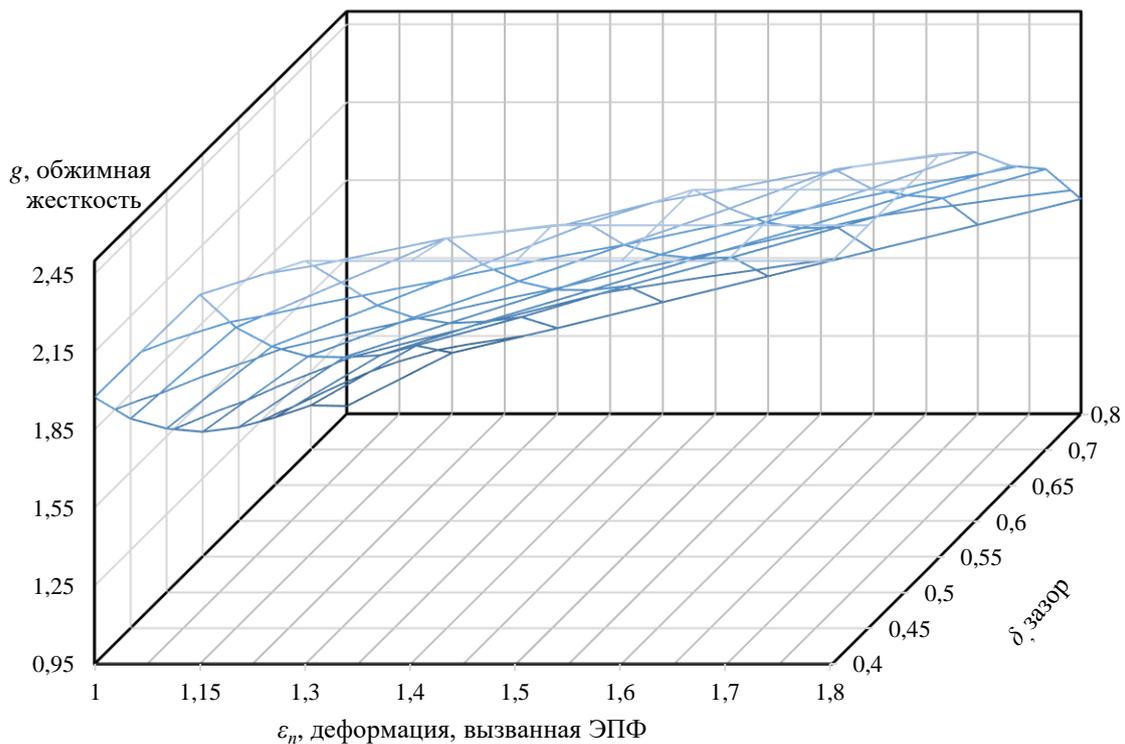


Рисунок 3.33 - Пространственный график зависимости критерия обжимной жесткости муфты от технологических параметров зазора и деформации, вызванной ЭПФ:

$$\text{ЭПФ: } g = f(\varepsilon_{II}, \delta)$$

По данной зависимости критерия обжимной жесткости муфты от технологических параметров: зазора – δ и деформации, вызванной ЭПФ – ε_{II} (3.41)

видно, что если $g < \frac{E_A}{E}$, то обжатия нет, если $g = \frac{E_A}{E}$, то обжатие есть, но нет зажима и если $g > \frac{E_A}{E}$, то зажим обеспечен. Изменяя значения зазора и деформации памяти, вводимый параметр функционального состояния обжатия сможет обеспечить герметичное соединение муфты и трубы.

3.5 Выводы по главе III

Глава посвящена аналитическим и численным методам решения задач деформирования цилиндрических оболочек.

Для определения технологических характеристик (размеры, расчетное давление) разрабатываемых конструкций была адаптирована задача Ламе для толстостенных цилиндров.

Расчитанные возникающие реактивные напряжения по охватываемой поверхности соединяемых частей превышают значения давления перекачиваемой среды, тем самым обеспечивается герметичность зоны соединения.

Ввиду наличия буртика и проточки в муфтовой конструкции были введены коэффициент усиления напряжений и коэффициент загруженности.

Для данного расчета был составлен алгоритм, который можно использовать для расчета других диаметров, соответствующих сортаменту промышленных трубопроводов.

На основе появившейся методики были проведены расчёты, результаты которых имеют графическое отображение. Они показывают зависимость таких параметров как: контактное давление – P_k , эквивалентные напряжения – $\sigma_{эkv}$, проектировочные параметры – ε_n и δ .

Видно, что, варьируя проектировочные параметры можно добиваться высокой герметичности и прочности неразъемных соединений.

По найденным значениям и графикам можно определить параметры муфты для натурального конструирования.

Для учета всех необходимых факторов, влияющих на эксплуатационные способности промысловых трубопроводов в данной исследовательской работе было проведено компьютерное моделирование с использованием метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS.

Алгоритм создания конечно-элементной модели включает в себя 3 этапа. По результатам 3 этапа моделирования, проанализировав НДС участка трубопровода, оценена его несущая способность с учетом совместного влияния всех действующих факторов.

Максимальные напряжения возникают по ободу муфты, минимальные - по трубе и патрубке задвижки, числовые значения превышают значения внутреннего давления (15 МПа), но не превышают пределы прочности, текучести материалов – что говорит о сохранении целостности и прочности конструкции, следовательно, можно утверждать, что предлагаемая модель муфты сможет обеспечить герметичность соединения для давления транспортируемого продукта и будет надежна в эксплуатации.

В результате проведенного исследования, аналитических и компьютерных расчетов был определён безразмерный параметр обжимной жесткости системы «муфта из материала с ЭПФ – стальная труба».

ГЛАВА 4 ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ, СБОРКА И ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ МУФТ ИЗ НИКЕЛИДА ТИТАНА

Существующий опыт эксплуатации термомеханических соединений (ТМС) [53, 92, 93] из материалов с памятью формы свидетельствует о их высокой прочности и герметичности [70, 79, 95].

Термомеханические соединения трубопроводов успешно конкурируют с традиционными сварными и механическими соединениями гидрогазовых коммуникаций благодаря высокому уровню эксплуатационной надёжности и обширным технологическим возможностям. ТМС имеют возможность соединять трубопроводы разного диаметра, из различных материалов и сплавов, в том числе неметаллов и композиционных материалов, в широком диапазоне размеров и допусков, а наличие погрешностей при монтаже и отклонениях форм не является для них критичным.

4.1 Низкотемпературное деформирование муфтовых конструкций

Проводимые ранее исследования деформируемости сплавов NiTi в зоне мартенситной неупругости [79, 95] выявили, что материалы с памятью формы, аналогично конструкционным материалам, следуют тем же закономерностям пластического деформирования. Следовательно, процесс дорнования муфт из сплава ТН-1 можно рассматривать как калибрование втулок из конструкционных материалов, которое заключается в том, что инструмент проталкивается через обрабатываемое отверстие меньших размеров. Вследствие пластических деформаций диаметр обрабатываемого отверстия увеличивается [11, 20]. Давление на обрабатываемую поверхность, передаваемую рабочей частью дорна, характеризуется абсолютным натягом дорнования.

Процесс дорнования происходит следующим образом (рисунок 4.1): втулка из NiTi, вместе с дорном охлаждается до температуры деформирования T_d . В устройстве для дорнования муфт прошивка проталкивается до упора, а затем извлекается из

муфты. При последующем нагреве, в результате обратного мартенситного перехода, материал втулки возвращается к исходному состоянию и заполняет проточки прошивки. Для того, чтобы материал муфты «запомнил» необходимый сформированный профиль, производится термомеханическая тренировка в несколько циклов.

Для удаления прошивки, втулка с прошивкой в приспособлении вновь охлаждается до температуры, при которой производилось деформирование, и внешним усилием выталкивается в обратном направлении. Втулка подвергается визуальному контролю. Прошивки многократно используются для формирования втулок.

Для реализации термомеханического возврата муфты необходимо подвергнуть предварительному деформированию (для ТМС данный процесс называется дорнованием или раздачей). Подразумевается, что нижняя граница эксплуатационной температуры ТМС не пересекает значения ниже точки замерзания воды, так как ТМС проектируется на работу в отапливаемых помещениях.

В связи с этим, интервал прямого мартенситного превращения для выбранного материала ТН-1 лежит ниже этой точки и составляет минус $10 \div$ минус 40°C .

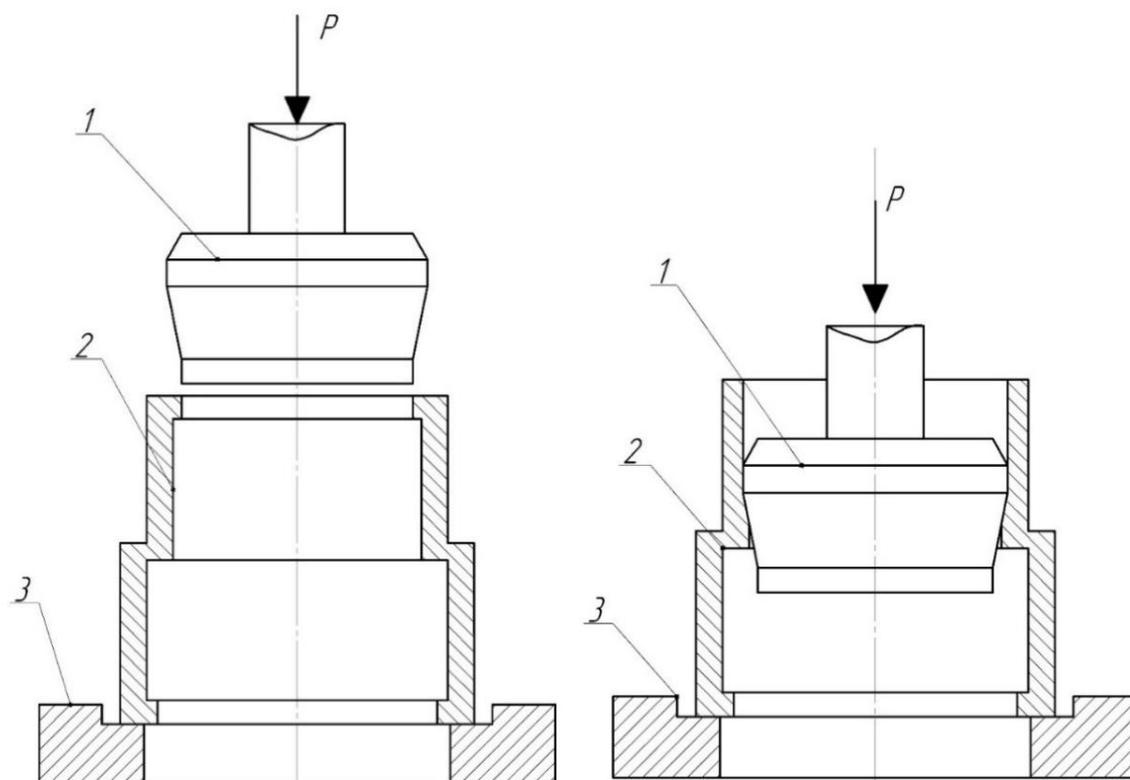
Для радиальной раздачи муфты с таким интервалом температур необходимо использовать хладагент. В качестве хладагента целесообразно использовать диоксид углерода в твердом состоянии (сухой лед). Данное вещество отличается относительно низкой стоимостью, нетоксичностью, пожаро- и взрывобезопасностью. Сухой лед не отличается агрессивным воздействием на материал муфты, а также трубопроводной обвязки. Для равномерного охлаждения муфты целесообразно использовать, охлаждённый сухим льдом, спирт, в котором необходимо проводить процесс деформации.

Радиальную раздачу муфты (дорнование) подразумевается проводить с помощью конических прошивок с заходным и обратным конусом (рисунок 4.1). Данное решение позволяет исключить осевую деформацию муфты при дорновании, при этом степень заданной деформации ε будет составлять $0,9 \div 0,95$, а усилия дорнования будут незначительны по сравнению с другими методами.

Материалом для деформирующих прошивок могут служить инструментальные стали X12M, ХВГ с твёрдостью $HRC \geq 65$.

Процесс дорнования муфты ограничен и по скорости, и по времени. В результате деформации выделяется тепло, которое приводит к постепенному нагреву муфты и переходу материала в аустенит, что спровоцирует частичное или полное восстановление её размеров сразу же после деформации. Также может произойти процесс формирования термически необратимой пластичной деформации, если, в результате избыточного выделения тепла, процесс дорнования будет проходить в аустенитном состоянии. Наиболее теплогенерирующей зоной образца при процессе деформирования прошивкой будет являться деформируемые поверхности (буртики) толщиной $0,05 \div 0,1$ мм, расположенные на концах муфты.

Чем больше разность между температурой деформирования материала муфты T_d и температурой начала обратного мартенситного превращения A_n тем больше допустимая скорость прохождения дорна.



1 – рабочий инструмент; 2 – муфта; 3 – опора

Рисунок 4.1 – Технологическая схема радиальной раздачи муфты конической прошивкой

4.1.1 Определение величины усилия дорнования

При проектировании оснастки для рационального выбора деформирующего инструмента и проверки его на прочность и устойчивость необходимо определить величину усилия дорнования [20, 65] по формуле:

$$P = P_c + P_m + P_d = (K_1 + K_2 + K_3) \cdot F \quad (4.1)$$

- где P_c – усилие упругой и пластической деформации сплава муфты, кН;
 P_m – усилие, обусловленное трением между прошивкой и муфтой, кН;
 P_d – усилие, связанное с потерями из-за неравномерности деформации при прошивке, кН;
 F – площадь поперечного сечения муфты, $F = 0,785 \cdot (D^2 - B^2)$, м².

Соответственно, величины K_1 , K_2 , K_3 определяются как:

$$K_1 = \frac{1 + f_{mp} \cdot \operatorname{tg} \alpha}{1 - f_{mp} \cdot \operatorname{tg} \alpha} \cdot \sigma_i \ln(1 + \varepsilon_i) \quad (4.2)$$

$$K_2 = 2 \cdot \sigma_i \cdot f_{mp} \cdot b / B \quad (4.3)$$

$$K_3 = 0,28 \cdot \sigma_i \cdot (2 \cdot \operatorname{tg} \alpha + f_{mp}) \quad (4.4)$$

- где σ_i , ε_i – интенсивность напряжений и деформаций при дорновании муфты в зоне калибрующего пояса инструмента, МПа;
 D , B – наружный и внутренний диаметр муфты, мм;
 f_{mp} – коэффициент трения;
 α – угол заходного конуса прошивки, град;
 b – фактическая длина контакта дорна с обрабатываемой поверхностью муфты, мм.

В соответствии с рисунком 4.2 величина b равна:

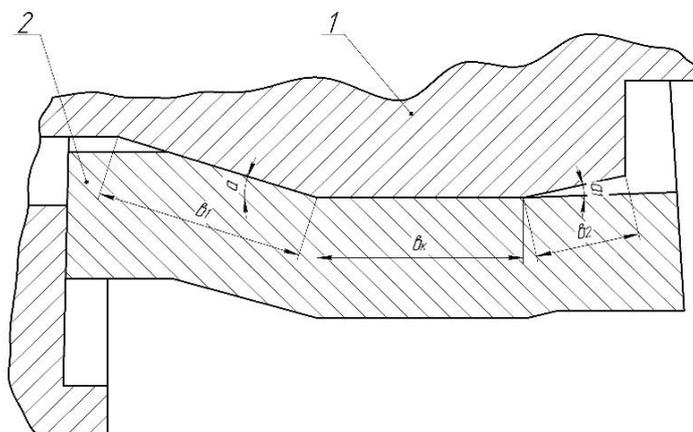
$$b = b_k + b_1 + b_2 \quad (4.5)$$

При этом:

$$b_1 = \frac{(d_k - B)}{2 \cdot \sin \alpha} \quad (4.6)$$

$$b_2 = \frac{d_k \cdot \varepsilon_e}{2 \cdot \sin \alpha_1} \quad (4.7)$$

где d_k, b_k – диаметр и ширина калибрующего пояса прошивки, мм;
 ε_e – величина упругого восстановления муфты, % ;
 α_1 – угол обратного конуса дорна, град.



1 – дорн; 2 - муфта

Рисунок 4.2 – Схема определения фактической площади контакта дорна с деформируемой муфтой

4.1.2 Алгоритм определения тепловой энергии при дорновании ТМС

Тепловыделение при дорновании ТМС само по себе определяется как негативный процесс, но его можно минимизировать по средствам снижения скорости, и соответственно, интенсивности деформации. Движением двойников внутри пластин мартенсита при деформации указывает на выделяющееся количество тепла, что также определяется упрочнением материала и трением между прошивкой и обрабатываемой поверхностью муфты [70, 77].

Логично предполагать, что наиболее теплогенерирующей зоной муфты при прохождении дорна являются участки, подвергающиеся максимальным деформациям. В данном случае такими участками являются буртики, расположенные на торцах муфты.

Температуру T_1 в очаге деформации можно найти из равенства количества тепла, выделяющегося при дорновании и поглощаемого поверхностным слоем раздаваемой муфты объемом V_D за определенный промежуток времени Δt [20, 30].

$$T_1 = P \cdot L / c_p \cdot E_M \cdot V_D \cdot \rho \quad (L = v \cdot \Delta t), \quad (4.8)$$

- где P – величина усилия дорнования, кН;
 L – длина рабочей части муфты, мм;
 c_p – удельная теплоемкость сплава муфты при температуре деформации T_∂ , Дж/г·град;
 E_M – механический эквивалент тепла;
 V_D – объем муфты, мм³;
 v – скорость деформации (прошивки муфты), мм/сек.

При постоянном коэффициенте теплопроводности λ количество тепла в единицу времени для цилиндрической стенки равно:

$$Q = 2 \cdot \lambda \cdot F \cdot (T_1 - T_2) / D \cdot \ln\left(\frac{D}{B}\right) \quad (4.9)$$

- где T_2 – температура на наружной поверхности муфты, К;

Теплообмен путём конвекции идёт при передаче тепла от стенки в окружающую среду [54]. При температуре спирта, охлажденного сухим льдом T_0 , °К имеем:

$$Q = \beta \cdot F \cdot (T_2 - T_0) \quad (4.10)$$

- где β – коэффициент теплоотдачи;

Остывание деформируемых муфт осуществляется в спирте, охлаждаемым твёрдой углекислотой. Смоделировав этот процесс теплоотдачи в бесконечном объёме при условии, что температура жидкости постоянна, а подводимое тепло расходуется на парообразование, получим, коэффициент теплоотдачи (β) и предельную тепловую нагрузку (q_n) в условиях естественной конвекции:

$$\beta = 6,9 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\gamma r}{\gamma - \gamma'} \right)^{0,033} \left(\frac{\gamma}{\sigma'_s} \right)^{1/3} \frac{\lambda^{3/4} q^{0,7}}{\eta^{0,45} c^{0,12} T_s^{0,37}} \quad (4.11)$$

$$q_n = 4,7 \cdot 10^{-3} \frac{\lambda^{0,4} (\gamma - \gamma')^{0,48} (\gamma r)^{0,36} T_s^{0,32} \sigma_s^{0,21}}{\gamma^{0,31} \eta^{0,14} c^{0,08}} \quad (4.12)$$

- где γ, γ' – удельный вес жидкости и пара, н/м³;
 σ'_s – поверхностное натяжение жидкости, МПа;
 η – коэффициент вязкости, сек/м;

- T_s – абсолютная температура насыщением, °К;
 λ – коэффициент теплопроводности, Дж/н·град;
 r – теплота парообразования, Дж/н;
 q – удельный тепловой поток, Дж/м·час.

Приравняем выражения (4.8), (4.9) и подставим значения температуры T_1 получаем:

$$T_2 = \frac{1}{1 + \xi} \cdot \left(T_0 + \frac{P \cdot \xi \cdot v \cdot \Delta t}{E_M \cdot C_P \cdot \rho \cdot V_D} \right) \quad (4.13)$$

при обозначении

$$\xi = 2 \cdot \lambda \cdot \beta \cdot D \cdot \ln \left(\frac{D}{B} \right) \quad (4.14)$$

В результате расчётов получаем диаграмму (рисунок 4.3) для температуры стенки муфты при вариативности скоростей дорнования, заштрихованная область обозначает заданный интервал температур прямого мартенситного превращения.

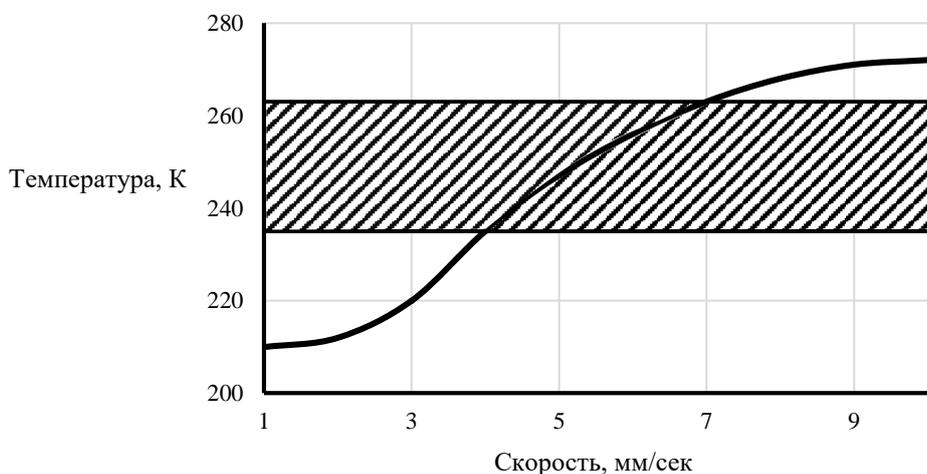


Рисунок 4.3 – Диаграмма зависимости температуры на наружной поверхности муфты от скорости её прошивки

Согласно проведённым расчётам по определению усилий при дорновании муфт, выделившейся при этом температуры, анализу исследований в области применения различных смазочных материалов и прошивок, можно определить

технологические параметры для дорнования муфт из ТН-1 для трубопроводов различных диаметров (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Расчётные значения усилий дорнования и температур стенки муфты при вариативности скоростей прошивки

№ п/п	Скорость прошивки, мм/сек	Усилие деформирования, кН	Температура наружной поверхности муфты, К
1	1,0	61,6	210
2	2,0	63,6	212
3	3,0	65,6	220
4	4,0	67,5	235
5	5,0	69,5	247
6	6,0	71,5	256
7	7,0	73,4	263
8	8,0	75,4	268
9	9,0	77,4	271
10	10,0	79,3	272

4.1.3 Выбор смазочных материалов для дорнования ТМС

Радиальная раздача муфтовой конструкции коническими прошивками при околоригенных температурах весьма неблагоприятна ввиду воздействия трения, которое возрастает с понижением температуры. Для исключения отрицательного эффекта коэффициента трения необходимо применять смазочные материалы.

Очевидно, что применение органических и минеральных смазок в условиях температур, которые намного ниже температуры замерзания, нецелесообразно. Применение парафинов и слоистых материалов, таких как графит, приводит к проблеме трудоемкости удаления данных веществ с поверхности образца и рабочего тела.

Поэтому при криогенных и околоригенных температурах целесообразно использовать мягкие гальванические покрытия, наносимые на рабочую поверхность дорна и выполняющие функции смазки. Толщина покрытия также существенно влияет на характер и результат процесса деформации.

В таблице 4.2 приведены результаты экспериментальных исследований влияния смазочного материала и толщины его покрытия, а также скорости дорнования на величину усилий деформации и качество обработки муфт из сплава ТН-1 [96].

Таблица 4.2 – Усилия дорнования и качество обработки при однократном применении прошивок для радиальной раздачи муфт в зависимости от материала и толщины мягкого гальванического покрытия, а также скорости деформации

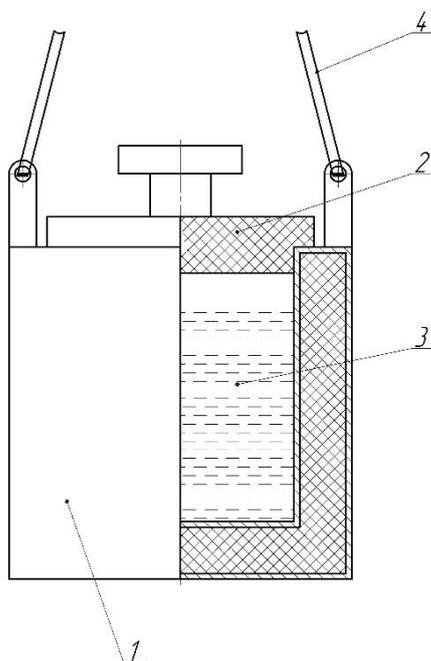
Материал покрытия	Скорость прошивки в мм/сек	Толщина покрытия в мкм	Усилие деформирования в КН				Виды дефектов после деформации
			P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	
кадмий	0,167	2÷6	9,3	10,9	11,2	11,8	без дефектов частич выкрашив. срез пояска
		10÷20	9,7	12,5	13,8	14,0	
		20÷50	10,6	13,9	22,6	36,0	
кадмий	0,67	2÷6	9,1	12,6	15,9	21,8	без дефектов частич. выкрашив. срез пояска
		10÷20	9,8	13,4	17,5	28,0	
		20÷50	9,4	15,7	21,3	30,2	
цинк	0,167	2÷6	8,6	12,4	12,3	8,6	без дефектов частич. выкрашив. частичный срез
		10÷20	8,4	12,4	12,4	13,8	
		20÷50	8,5	12,3	12,3	18,4	
цинк	0,67	2÷6	8,5	12,4	12,5	8,5	без дефектов частич. выкрашив. частичный срез
		10÷20	8,6	12,7	12,6	14,8	
		20÷50	8,5	12,0	13,5	19,2	
медь	0,167	2÷6	9,3	13,8	18,0	26,8	частичный срез срез всех поясков разрушение муфты
		10÷20	9,2	13,4	19,6	30,5	
		20÷50	8,9	15,8	23,0	–	
медь	0,67	2÷6	9,1	14,2	28,6	37,0	срез всех поясков разрушение муфты разрушение муфты
		10÷20	9,6	15,1	28,9	–	
		20÷50	9,4	16,8	31,0	–	
свинец	0,167	2÷6	8,7	12,6	12,4	9,5	без дефектов без дефектов частичный срез
		10÷20	8,5	12,3	12,3	11,6	
		20÷50	8,5	13,8	16,8	13,2	
свинец	0,67	2÷6	8,9	12,3	12,6	9,2	без дефектов без дефектов частич. выкрашив.
		10÷20	8,4	12,7	12,9	14,8	
		20÷50	8,4	12,5	12,4	16,2	
серебро	0,167	2÷6	8,9	13,0	17,4	26,0	частич. выкрашив. частичный срез срез пояска
		10÷20	9,1	13,2	18,7	29,0	
		20÷50	9,0	14,8	21,0	30,2	
серебро	0,67	2÷6	8,7	12,4	22,4	29,0	частич. выкрашив. частичный срез срез пояска
		10÷20	9,0	14,6	26,8	30,6	
		20÷50	9,2	15,7	28,5	31,5	

Согласно таблице 4.2 наиболее подходящими для применения являются покрытия из цинка и кадмия, они обладают гексагональной кристаллической

решеткой и имеют относительно низкую адгезию по отношению к сплавам ТН-1К и ТН-1. Оптимальная толщина покрытия составляет $2\div 6$ мкм.

4.2 Технология монтажа термомеханического соединения из NiTi

Для осуществления транспортировки ТМС к месту монтажа необходимо использовать специализированные транспортировочные сосуды (рисунок 4.4). Сосуд имеет широкое горло для обеспечения доступа к муфте и охлаждения элементов оснастки необходимых для успешного монтажа муфты на трубопровод.



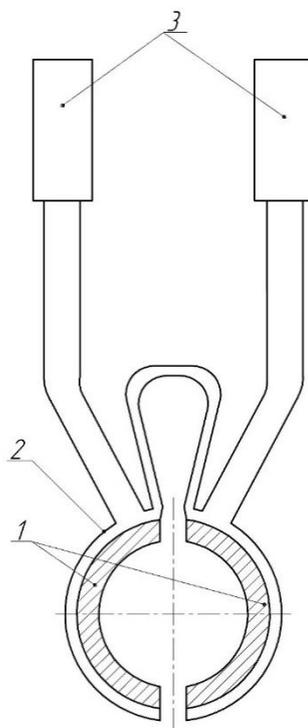
1 – корпус; 2 – крышка; 3 – хладагент; 4 – ремень для переноски

Рисунок 4.4 - Сосуд для хранения и транспортировки термомеханической муфты для трубопроводов

Емкость состоит из двух сосудов внутреннего и внешнего, выполненных из алюминия или нержавеющей стали. Для сокращения тепловых потерь используют дополнительной слой теплоизоляции внутреннего сосуда. Для снижения конвекционной теплопередачи к крышке прикрепляют пенопластовый цилиндр, который негерметично закрывает горловину. Вакуумную полость откачивают до давления 10 Па.

Для монтажа ТМС на трубопровод применяется специальный монтажный ключ (рисунок 4.5). Монтажный ключ выполняет две функции: применяется для осуществления легкого извлечения и насаживания муфты; предотвращает быстрый нагрев муфты во время монтажа.

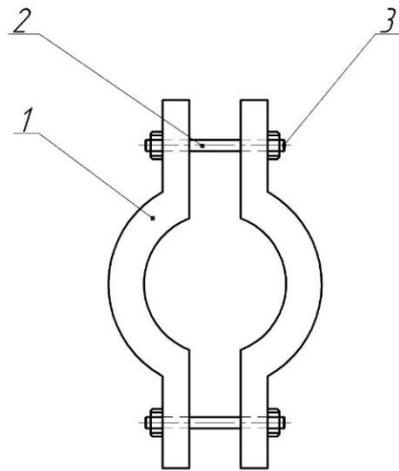
Особенностью данного ключа являются его монтажные губки, которые изготавливаются из материала с большой теплоемкостью. Данные губки перед осуществлением захвата монтируемой муфты активно охлаждаются до температуры минус 100°С и ниже. Данный процесс поможет обеспечить незначительный нагрев муфты во время монтажа, следовательно, увеличит допустимое время для качественного монтажа.



1 – сменные полувтулки; 2 – зажимные пластины; 3 - рукоятки

Рисунок 4.5 – Конструкция ключа для осуществления сборки ТМС

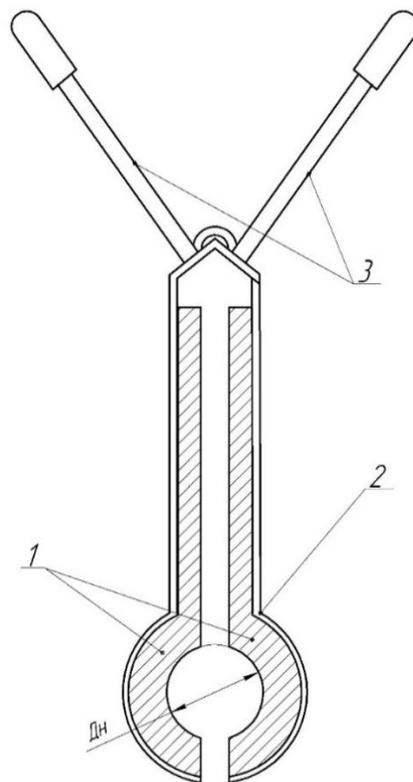
Для контроля правильности установки муфты ТМС перед сборкой на законцовках соединяемых трубопроводов устанавливают вспомогательные хомуты-ограничители (рисунок 4.6).



1 – хомут; 2 – шпильки; 3 - гайки

Рисунок 4.6 – Конструкция хомута ограничителя

Концы соединяемых трубопроводов непосредственно перед установкой муфты необходимо охладить специальным трубоохладителем, конструкция которого представлена на рисунке 4.7.



1 – охлаждающие пластины; 2 – корпус; 3 - рукоятки

Рисунок 4.7 – Конструкция трубоохладителя

Данная процедура необходима для исключения быстрого нагрева холодной деформированной муфты от относительно теплой трубы за счёт интенсивного теплообмена, что может привести к преждевременному формовосстановлению муфты.

Кроме того, с помощью трубоохладителя осуществляется увеличение технологического зазора между муфтой и трубой в следствии термического сжатия труб.

Контактные пластины трубоохладителя, как и монтажные губки ключа для установки ТМС, изготавливаются из материала с большой теплопроводностью. Трубоохладитель выдерживают в хладагенте несколько минут и устанавливают на концы трубопроводов (при необходимости данную операцию проводят несколько раз). Таким образом, можно обеспечить глубокое охлаждение трубопровода и увеличить допустимое для монтажа время.

Монтаж ТМС осуществляется следующим образом (рисунок 4.8):

1. Подготовка необходимого для монтажа оборудования, подготовка соединяемых трубопроводов, разметка места установки ТМС, обеспечение радиального и осевого перемещение трубопроводов при сборке.

2. После разметки места установки муфты на один из трубопроводов устанавливается хомут-ограничитель. Он позволит произвести монтаж муфты наиболее точно.

3. За несколько циклов производится захолаживание концов трубопроводов трубоохладителями, до достижения минимальной температуры.

4. Полуштулки монтажного ключа охлаждаются в хладагенте в течении нескольких минут параллельно процедуре захолаживания концов трубопроводов. По окончанию захолаживания трубопроводов полуштулки монтажного ключа раскрываются и в них помещается деформированная муфта. Ключ с муфтой остается в контейнере с хладагентом.

5. Концы труб освобождаются от охладителей. Труба без хомута-ограничителя оттягивается на необходимое расстояние для свободного перемещения монтажного ключа с муфтой.

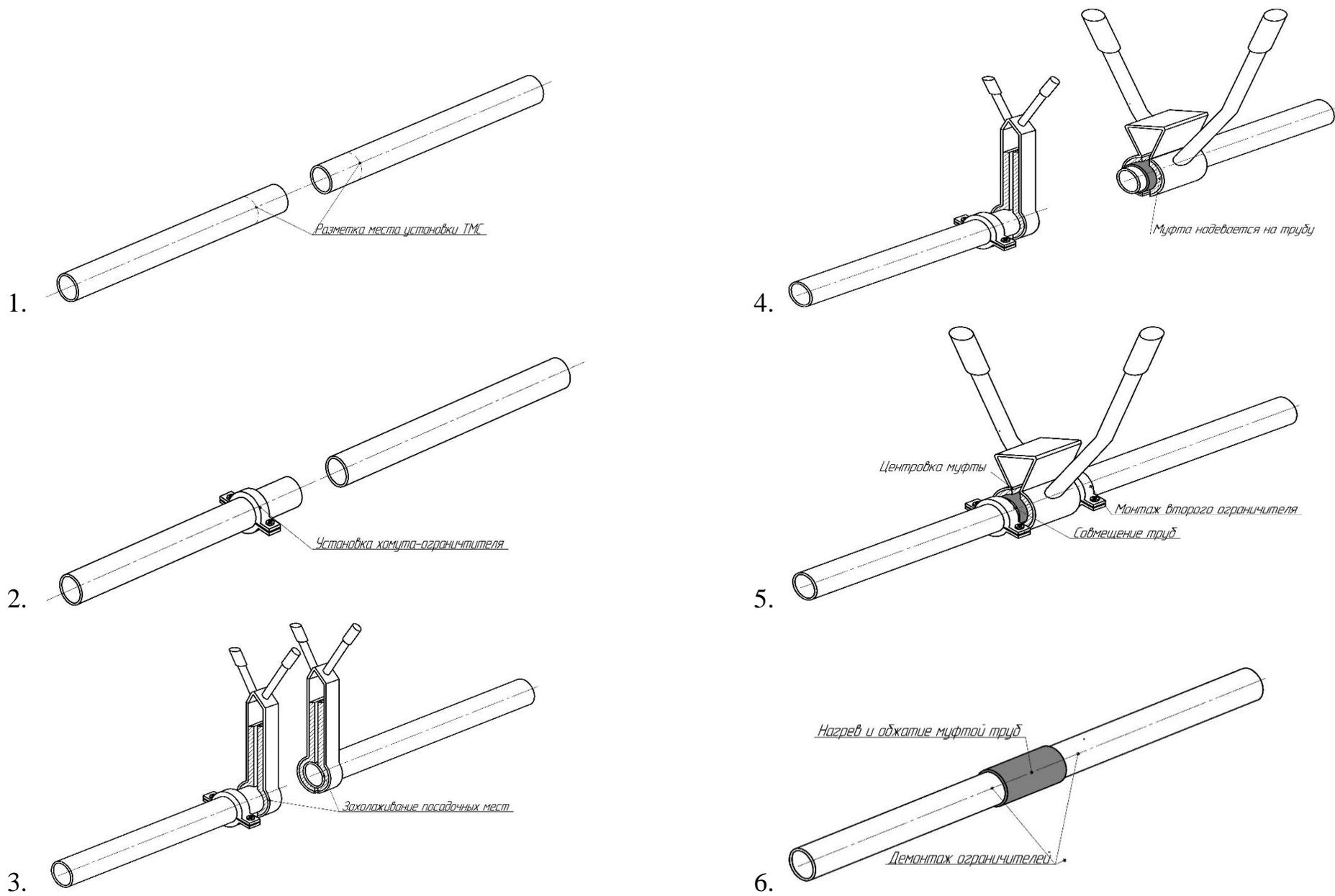


Рисунок 4.8 – Схема процесса монтажа ТМС на трубопроводы

6. Клещи переносятся из контейнера к оттянутой трубе, и муфта надевается на неё, так чтобы торец трубы вышел из муфты на несколько миллиметров. Торцы труб совмещаются соосно, и муфта с помощью клещей перемещается до упора в ограничитель.

7. На другой трубе также устанавливается хомут ограничитель, для предотвращения осевого смещения муфты, и муфта высвобождается из клещей. Далее муфта нагревается до температур обратного мартенситного превращение, происходит обжатие муфтой труб.

При соблюдении правил монтажа муфта обеспечит надёжное термомеханическое соединение с трубопроводом.

4.3 Выводы по главе IV

1. Разработана технология изготовления муфт ТМС диаметрами до 150 мм, которая включает в себя операции дорнования, низкотемпературного деформирования и формирования внутреннего профиля муфты сложной формы;

2. При исследовании существующих способов и механизмов для дорнования муфтовых конструкций была разработана технологическая операция формирования внутренней поверхности муфты сложной формы и определена оснастка и приспособления для осуществления данного процесса для ТМС из NiTi;

3. На основании расчётов выбран оптимальный режим процесса дорнования заготовки, при котором усилия дорнования P не превышают 66 кН, скорость дорнования v составляет 1-3 мм/сек, что обеспечивает поддержание температуры стенки муфты в диапазоне мартенситного состояния ($M_k = \text{минус } 40 \text{ }^\circ\text{C}$);

4. Разработан технологический процесс сборки соединения ТМС. Предложены специальные монтажные приспособления для проведения более точной сборки и контроля центровки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой законченную научную работу, приведены, разработанные автором, теоретические и практические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение научной задачи разработки обоснованного технического решения по созданию технологичных и эффективных соединений для промышленных трубопроводов систем сбора и подготовки углеводородного сырья.

1. На основе проведённого экспериментального исследования установлено, что термомеханические характеристики сплава ТН-1, близкого к эквиатомному ($\text{Ni}50,75\%\text{Ti}49,25\%$), являются оптимальными из исследованных образцов для обеспечения герметичного обжатия муфтой в интервале рабочих температур;

2. Произведен расчёт конструктивных параметров муфтового соединения из никелида титана путём адаптации задачи Ламе для толстостенных цилиндров;

3. Реализована конечно-элементная модель муфты в интерфейсе ANSYS, показывающая распределение возникающих напряжений в муфте и соединяемых частях;

4. Найденные напряжения из аналитического расчёта и компьютерного моделирования в ANSYS, показали схожие результаты, по которым можно утверждать о достоверности проведённых исследований. На основании проведённых аналитических и компьютерных вычислений предложен критерий обжимной жёсткости g , который позволяет количественно оценить степень обжатия муфтового соединения;

5. Разработана технология монтажа муфты из никелида титана на промышленные трубопроводы.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АГЗУ	–	автоматизированная групповая замерная установка;
БНГ	–	блок напорной гребенки;
ГЗУ	–	групповая замерная установка;
МКЭ	–	метод конечных элементов;
МП	–	мартенситный переход;
НДС	–	напряженно-деформированное состояние;
НПС	–	насосная перекачивающая станция;
ОПФ	–	обратимая память формы;
ОЦКП	–	ортогональный центрально-композиционный план второго порядка;
ППП	–	пластичность прямого превращения;
ПТ	–	промысловый трубопроводов;
РФ	–	Российская Федерация;
ТМС	–	термомеханическое соединение;
ТЭК	–	топливно-энергетический комплекс;
ЭПФ	–	эффект памяти формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 2041283 МПК С22 F1/00, В 22 F3/24. Способ деформирования муфт из сплава с эффектом памяти формы и устройство для его осуществления / А. М. Фирсов, Н. А. Кобылкин, С. В. Бардадымов. – № 4876387/02 ; заявл. 22.10.1990 ; опубл. 09.08.1995.
2. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Наука, 1976. – 279 с.
3. Андронов И. Н. Эффекты обратимого формоизменения никелида титана при термоциклировании / И. Н. Андронов, С. К. Овчинников // Деформация и разрушение материалов. – 2005. – № 5. – С. 28-30.
4. Андронов, И. Н. Влияние предварительного термоциклирования на физико-механическое поведение медномарганцевых композиций в условиях проявления обратимой памяти формы / И. Н. Андронов, В. А. Лихачев // Известия вузов. Цветная металлургия. – 1986. – № 2. – С. 97-102.
5. Андронов, И. Н. Влияние термомеханической обработки на энергоемкость сплава ТН-1 / И.Н. Андронов, Р.А. Вербаховская // Заводская лаборатория – 2007. – № 9. – Т. 73. – С. 67-70.
6. Андронов, И. Н. Влияние термомеханической тренировки на поведение сплава ТН-1 в условиях проявления циклической памяти формы / И. Н. Андронов, С. В. Крючков, С. К. Овчинников // Вестник СамГТУ. Физико-математические науки. – Самара : СамГУ. – 2004. – № 27. – С. 97-100.
7. Андронов, И. Н. Влияние термомеханической тренировки на поведение сплава ТН-1 в условиях проявления циклической памяти формы / И. Н. Андронов, С. В. Крючков, С. К. Овчинников // Вестник Самарского гос. ун-та. Физ-мат. – Самара : Изд-во СамГУ, 2005. – С. 95-100.

8. Андронов, И. Н. Влияние термомеханической тренировки на поведение сплава ТН-1 в условиях реализации многократно-обратимой памяти формы в свободном состоянии / И. Н. Андронов, С. В. Крючков, С. К. Овчинников // Научные труды VI Международного симпозиума «Современные проблемы прочности» им. В. А. Лихачева (20-24 октября 2003 г.) : т. 2 / под редакцией В. Г. Малинина. – Великий Новгород, 2003. – С. 173-177.

9. Андронов, И. Н. Закономерности поведения никелида титана в условиях производства механической работы / И. Н. Андронов, Н. П. Богданов, Н. А. Северова // Современные вопросы физики материалов: материалы XXXII семинара «Актуальные проблемы прочности», посвященного памяти В.А. Лихачева. – Санкт-Петербург : 1997. – С. 178-182.

10. Андронов, И. Н. Использование соединения из материала с памятью в качестве функционального элемента водоводов высокого давления / И. Н. Андронов, Е. В. Семиткина // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2016. – №10. – С.45-49.

11. Андронов, И. Н. Компьютерное моделирование НДС неразъемного конструкционного соединения с эффектом памяти формы в интерфейсе Ansys / И. Н. Андронов, Е. В. Семиткина // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2018. – №6. – С.47-52.

12. Андронов, И. Н. Моделирование силового воздействия в сплавах с мартенситной неупругостью / И. Н. Андронов, Н. П. Богданов, Е. В. Семиткина // Физико-математическое моделирование систем. XVIII Международный семинар (30 июня 2017 г.). – Воронеж : ВГТУ, 2017. – С. 179-184.

13. Андронов, И. Н. Применение муфты переменного диаметра из материала с памятью в качестве соединительного элемента на промысловых трубопроводах / И. Н. Андронов, Е. В. Семиткина // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море – 2017. - № 11. - С. 20 - 25.

14. Андронов, И.Н. Влияние характера термоциклирования и знака нагружения на величину фазовых модулей никелида титана / И. Н. Андронов, Н. П. Богданов, А. В. Тарсин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – № 4, Том. 75, С. 42 – 44.
15. Бабаев, С. Г. Надежность нефтепромыслового оборудования / С. Г. Бабаев. – Москва : Недра, 1987. – 263 с.
16. Бледнова, Ж.М. Роль сплавов с эффектом памяти формы в современном машиностроении / Бледнова Ж.М., Степаненко М.А. — Краснодар: Кубанский гос. технологический ун-т, 2012. — 69 с.
17. Большая советская энциклопедия. Том 3 / Главный редактор А. М. Прохоров. – 3–е изд. – Москва : Советская энциклопедия, 1977. – 624 с.
18. Большев, Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – Москва : Наука, 1983. – 416 с.
19. Борисенкова, Е. А. Причины преждевременного выхода из строя клиновых задвижек на нефтяных месторождениях Российской Федерации / Е. А. Борисенкова // Вестник арматурщика. – 2015. – №7. – С. 46-48.
20. Бояршинов, С. В. Основы строительной механики машин / С. В. Бояршинов. - Москва : Машиностроение, 1973. – 456 с.
21. Ведомость оценки проведенной экспертизы за 2015 год // ООО «ТСК «УралТрансСтрой» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://tsk-uts.ru/page/26/>, свободный. – (Дата обращения: 20.09.2018).
22. Вербаховская, Р. А. Влияние термомеханического воздействия на деформационные процессы в сплаве ТН-1 : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : специальность 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела» : защищена 02.11.2007 / Р. А. Вербаховская ; научный руководитель И. Н. Андронов ; Ухтинский государственный технический университет. – Ухта : Изд-во УГТУ, 2007. -132 с. – Место защиты: Московский государственный институт электроники и математики.

23. Влияние осевого деформирования и осевых нагрузок на работоспособность никелида титана в условиях кручения / И. Н. Андронов [и др.] // Физика прочности и пластичности материалов: тезисы докладов XIV Международная конференция (27 – 30 июня 1995 г.). – Самара : Изд-во СГТУ, 1995. – С. 306-307.

24. ВСН 008-88. Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Противокоррозионная и тепловая изоляция. – Москва : Изд-во ВНИИСТ, 1990. – 102 с

25. Ганыш, С. М. Экспериментальное определение параметров диаграммы фазовых переходов для сплава с эффектом памяти формы / С. М. Ганыш, С. С. Гаврюшин, И. Н. Андронов // Машиностроение. – 2012. – № 11. – С. 79-83.

26. ГОСТ 1050-2013.Metalлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. – Введён 01.01.2015 – Москва : Стандартиформ. – 34 с.

27. ГОСТ 21345-2005. Краны шаровые, конусные и цилиндрические на номинальное давление не более PN 250. Общие технические условия. – Введён 01.04.2008 – Москва : Стандартиформ, 2008. – 19 с.

28. ГОСТ 28338-89. Соединения трубопроводов и арматура. Номинальные диаметры. – Введён 01.01.1991 – Москва : Издательство Стандартов. – 3 с.

29. ГОСТ 55990-2014. Месторождения нефтяные и газонефтяные. Промысловые трубопроводы. Нормы проектирования. – Введён 01.12.2014 – Москва : Стандартиформ, 2014. – 90 с.

30. Григолюк, Э. И. Контактные задачи теории пластин и оболочек / Э. И. Григолюк, В. М. Толкачёв. – Москва : Машиностроение, 1980, 416 с.

31. Журавлёв, В. Н. Сплавы с термомеханической памятью и их применение в медицине / В. Н. Журавлёв. – Екатеринбург : Изд-во УрО РАН, 2000. – 150 с.

32. Закономерности генерации реактивных напряжений в сплаве TiNi / В. А. Лихачев, А. Н. Мастерова, А. Н. Маршалкин, Ю. И. Макаров // Проблемы прочности. – 1983. – № 4. – С. 72-74.

33. Зборщик, А. М. Новые материалы в металлургии : конспект лекций / А. М. Зборщик. – Донецк : Изд-во ДонНТУ, 2008. – 253 с.
34. Казаков, Ю. Б. Методы планирования эксперимента в электромеханике : метод. указания к выполнению лаб. работ / Ю. Б. Казаков, А. И. Тихонов. – Иваново : Изд-во ИГЭУ, 2001. – 28 с.
35. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика / А. И. Кобзарь. – Москва : Физматлит, 2006. - 816 с.
36. Кожаева, А. В. Противокоррозионная защита промышленных трубопроводов в ОАО АНК «Башнефть» / А. В. Кожаева // Инженерная практика. – 2014. – № 6. – С. 48-57.
37. Коновалов, М. Н. Повышение эффективности силового привода лесозаготовительного оборудования применением материалов с эффектом памяти формы : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : специальность 05.21.01: «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : защищена 23.12.2006 / М. Н. Коновалов ; научный руководитель И. Н. Андронов ; Ухтинский государственный технический университет. – Ухта : Изд-во УГТУ, 2006. - 135 с. – Место защиты: Петрозаводский государственный университет.
38. Коптева, В. Б. Фланцевые соединения: конструкции, размеры, расчёт на прочность: методические указания / В. Б. Коптева, А. А. Коптев. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2011. – 27 с.
39. Корепанова, В. С. Расчётно-экспериментальный метод определения деформационных характеристик при переходных процессах в сплавах с памятью формы : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : специальность 01.02.04 «Механика деформируемого твёрдого тела» : защищена 30.11.2011 / В. С. Корепанова ; научный руководитель И. Н. Андронов ; Ухтинский государственный технический университет. – Ухта : Изд-во МГОУ, 2011. - 147 с. – Место защиты: Московский государственный открытый университет имени В. С. Черномырдина.

40. Корнилов, И. И. Никелид титана и другие сплавы с эффектом "памяти" : монография / И. И. Корнилов, О. К. Белоусов, Е. В. Качур. – Москва : Наука, 1977. – 178 с.

41. Коршак, А. А. Трубопроводный транспорт нефти, нефтепродуктов и газа : учебное пособие / А. А. Коршак, А. М. Нечваль. – Уфа : ДизайнПолиграфСервис, 2005. – 516 с.

42. Коэффициенты трения покоя и скольжения для наиболее распространенных материалов // Технические таблицы [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/Frication/FrictionToVariousPairs/>, свободный. – (Дата обращения: 20.10.2016).

43. Лихачев, В. А. Эффект памяти формы / В. А. Лихачев // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 3. – С. 107-114.

44. Лихачёв, В. А. Эффект памяти формы / В. А. Лихачёв, С. Л. Кузьмин, З. П. Каменцева. – Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1987. – 216 с.

45. Магистральные трубопроводы для нефти, газа и нефтепродуктов // РГК «Палюр» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://rgk-palur.ru/magistralnye-truboprovody-istoriya-razvitiya-i-vozniknoveniya/>, свободный. – (Дата обращения: 20.03.2018).

46. Макаров, В. Ф. К методике моделирования напряженно-деформированного состояния при ультразвуковой упрочняющей финишной обработке / В. Ф. Макаров, А. Х. Половинкин // XIV международная научно-техническая конференция в г. Севастополе : сборник трудов. Т. 3. – Донецк : ДонНТУ, 2007. – С. 225-229.

47. Малинин, В. Г. Моделирование процессов создания термомеханических соединений с помощью муфт из материалов с памятью формы методами структурно-аналитической мезомеханики / В. Г. Малинин, Ю. Ю. Муссауи // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – №3 (311). – С. 36-47.

48. Малинин, Г. В. Деформация мартенситной неупругости при сложных траекториях изотермического нагружения в материалах с эффектом памяти формы / Г. В. Малинин // Строительство и реконструкция. – 2012. – № 6 (44). – С. 88-96.

49. Малинин, Г. В. Применение метода конечных элементов для расчета статически неопределимой стержневой системы, выполненной из материала с эффектом памяти формы / Г. В. Малинин // Фундаментальные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 4 (312). - С. 3-10.

50. Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести : учебник / Н. Н. Малинин. - 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1975. - 399 с.

51. Мартенситный тип обратимой памяти формы в устройстве систолического размера кольца митрального клапана / И. Н. Андронов, Р. А. Вербатовская, И. Н. Данилов, В. С. Корепанова // Заводская лаборатория. – 2010. – № 8. – С. 38-42.

52. Материалы с эффектом памяти формы: справочник / под редакцией В. А. Лихачева . – Санкт-Петербург : Изд-во НИИХ СПбГУ, 1997. – 424 с.

53. Махутов, Н. А. Безопасные соединения трубопроводов с эффектом памяти формы / Н. А. Махутов, С. В. Шишкин— Москва : ИМАШ РАН, 1999. – 504 с.

54. Михеев, М. А. Краткий курс теплопередачи : учебник / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Москва : Ленинград : Госэнергоиздат, 1960. – 206 с.

55. Мовчан, А. А. Микромеханический подход к описанию деформации мартенситных превращений в сплавах с памятью формы / А. А. Мовчан // Известия Академии наук. Механика твёрдого тела. – 1995. - № 1. – С. 197-205.

56. Моделирование напряженно-деформированного состояния неразъемного муфтового соединения композитных металлопластмассовых труб / Т. И. Лаптева, Д. Х. Чумарин, А. В. Слюсаренко, В. М. Айдуганов // Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 3. – С. 79–81.

57. Нгуен Ван Тхуан. Моделирование структур метастабильных состояний в сплавах с эффектом памяти формы на основе NiAl и NiTi : диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук : специальность 01.04.07 «Физика конденсированного состояния» : защищена 31.10.2007 / Нгуен Ван Тхуан; научный руководитель В. С. Крапошин ; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана. – Москва : Изв-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. - 155 с. – Место защиты: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана.

58. Низьев, С. Г. О противокоррозионной защите магистральных и промышленных трубопроводов современными полимерными покрытиями / С. Г. Низьев // Территория НЕФТЕГАЗ – 2009. – № 10. – С. 34-43.

59. Особенности проектирования антикоррозионной защиты промышленных трубопроводов / И. А. Щербинина, П. Ю. Денисова, В. Ф. Зараева, Д. А. Болотова // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 2. – С. 30-32.

60. ПБ 03-576-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. – Введён 11.06.2003. – Москва : НТЦ «Промышленная безопасность». – 96 с.

61. Переходные деформационные процессы и эффект термомеханической обработки в сплаве ТН-1, инициированные термоциклированием при переменных напряжениях / И. Н. Андронов, Р. А. Вербаховская, И. Н. Данилов, В. С. Корепанова, Е. В. Пластинина // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – № 10. – Т. 76. – С. 28-31.

62. Петров, А. А. Функциональные свойства никелида титана при термомеханических воздействиях, характерных для активных устройств: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : специальность 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела» : защищена 27.01.2005 / А. А. Петров ; научный руководитель А. И. Разов ; Санкт-Петербургский государственный университет. – Санкт-Петербург : НИИХ СПбГУ, 2005. - 114 с. – Место защиты: Институт проблем машиноведения РАН.

63. Правила по эксплуатации, ревизии, ремонту и отбраковке нефтепромысловых трубопроводов : РД 39-132-94 : введён в действие с 01.07.1994 Госгортехнадзора России от 27. 10-03/337; утверждён Министерством топлива и энергетики РФ от 30.12.1993/ Федеральный горный и промышленный надзор России (Госгортехнадзор России). – Москва : НПО ОБТ, 1994. – 357 с.

64. Промысловые трубопроводы и оборудование: учебное пособие для вузов/ Ф. М. Мустафин [и др.] – Москва : Недра, 2004. – 662 с.

65. Проскураков, Ю. Г. Упрочняюще-калибрующие методы обработки : справ. пособие / Ю. Г. Проскураков. - Москва : Машиностроение, 1965. - 208 с.

66. Противокоррозионная защита магистральных трубопроводов и промысловых объектов: учебно-практическое пособие по вопросам теории и расчета / А. В. Конев [и др.]. – Тюмень : Изд-во ТюмГНГУ, 2003. – 211 с.

67. Пушин, В. Г. Предпереходные явления и мартенситные превращения / В. Г. Пушин, В. В. Кондратьев, В. Н. Хачин. – Екатеринбург : Изд-во УрО РАН, 1998. – 368 с.

68. Расчёт термомеханического соединения методами структурно-аналитической теории / А. Е. Волков, В. А. Лихачёв, Ю. Ф. Слуцкер // Актуальные проблемы прочности. Материалы XXVII Межреспубликанского семинара. – Ухта : ГКП УКМЭ «Геоцентр», 1992. – С. 31-43.

69. Савченко, Н. Ю. Оценка надежности муфтовых соединений полиэтиленовых трубопроводов : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : специальность 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазоводов, баз и хранилищ» : защищена 24.12.2013 / Н. Ю. Савченко ; научный руководитель В. А. Иванов ; Тюменский государственный нефтегазовый университет. – Тюмень : Изд-во ТюмГНУ, 2013. - 117 с. – Место защиты: Тюменский государственный нефтегазовый университет.

70. Сапожников, В. М. Прочность и испытания трубопроводов гидросистем самолетов и вертолетов/ В. М. Сапожников, Г. С. Лагосюк. - Москва : Машиностроение, 1973. – 274 с.

71. Сваровская, Н. А. Подготовка, транспорт и хранение скважинной продукции: учебное пособие / Н. А. Сваровская. - Томск: Изд-во ТПУ, 2004. -268 с.
72. Севастьянов, М. И. Технологические трубопроводы нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов: справочное пособие / М. И. Севастьянов ; под ред. канд. техн. наук М. А. Берлина. – Москва : Химия, 1972. — 312 с.
73. СНиП 3.05.05-84 Технологическое оборудование и технологические трубопроводы. — Москва : ФГУП ЦПП, 2005. – 31 с.
74. Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов / В. Г. Блохин, О. П. Глудкин, А. И. Гуров, М. А. Ханин. – Москва : Радио и связь, 1997. – 232 с.
75. СП 3411697 Инструкция по проектированию, строительству и реконструкции промышленных нефтегазопроводов. – М.: ВНИСТ, 1997– 285 с.
76. Сплавы с эффектом памяти формы / К. Ооцука [и др.] ; под редакцией Х. Фунакубо ; перевод с японского. – Москва : Металлургия, 1990. – 224 с.
77. Справочник по физико-техническим основам криогенной техники / под редакцией И. И. Новикова. – Москва : Наука, 1976. – 208 с.
78. Сталь 17Г1С - характеристика, химический состав, свойства, твердость // ООО «Спецметаллсервис» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://s-metall.com.ua/index/stal_17g1s/0-139/, свободный. (Дата обращения: 20.09.2016).
79. Степнов, М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник / М. Н. Степнов. – Москва : Машиностроение, 1972. – 232 с.
80. Структурный механизм генерации и изотермической релаксации реактивного напряжения в термически и термомеханически обработанном никелиде титана / И. Ю. Хмелевская [и др.] // Актуальные проблемы прочности. Механизмы деформации и разрушения перспективных материалов : материалы XXXV семинара. – Псков, 1999. – С. 456-462.
81. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей: справочное пособие / В. В. Бродский [и др.] ; под общей редакцией В. В. Налимова. – Москва : Металлургия, 1982. – 752 с.

82. Таранов, Р. А. Повышение безопасности нефтепромысловых трубопроводов на основе совершенствования технологии монтажа : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : специальность 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность (по отраслям)» : защищена 24.12.2013 / Р. А. Таранов ; научный руководитель А. А. Александров; Институт проблем транспорта энергоресурсов. – Уфа : ИПТЭР, 2015. – 140 с. – Место защиты: Институт проблем транспорта энергоресурсов.

83. Технология производства и свойства сплавов с эффектом памяти формы // Украинская ассоциация сталеплавильщиков [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://uas.su/books/newmaterial/102/razdel102.php/>, свободный. – (Дата обращения: 10.03.2017).

84. Транспорт скважинной продукции : учебное пособие / Н. В. Чухарева, А. В. Рудаченко, А. Ф. Бархатов, Д. В. Федин. – Томск : Изд-во ТПУ, 2011. – 357 с.

85. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов : учебник / В. И. Феодосьев. - 10-е изд., перераб. и доп. – Москва : МГТУ, 1999. – 592 с.

86. Филиппов, В. В. Технологические трубопроводы и трубопроводная арматура: учеб. пособие / В. В. Филиппов. – Самара : СамГТУ, 2014. – 66 с.

87. Функциональные материалы с эффектом памяти формы : учебное пособие / М. Ю. Коллеров [и др.] – Москва : ИНФРА-М, 2016. - 140 с.

88. Хамханов, К. М. Основы планирования эксперимента: методическое пособие / К. М. Хамханов. – Улан-Удэ : Изд-во ВСГТУ, 2001. – 50 с.

89. Хасьянова, Д. У. Технологическое обеспечение качества изготовления муфт ТМС и сборки трубопроводов: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : специальность 05.02.08 «Технология машиностроения» : защищена 31.05.2012 / Д. У. Хасьянова ; научный руководитель А. Ю. Албагачиев ; Московский государственный университет приборостроения и информатики. – Москва : ДЕЛЬТА-ЦЕНТР, 2012. – 115 с. – Место защиты: Московский государственный университет приборостроения и информатики.

90. Хачин, В. Н. Мартенситная неупругость В2 соединений титана : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / В. Н. Хачин. – Томск, 1987. – 278 с.
91. Циклическая память формы сплава CuAlMn в условиях сложного нагружения / И. Н. Андронов [и др.] // Актуальные проблемы прочности : материалы XXIV Всесоюзного семинара. – Днепропетровск : ДХТИ, 1990. – С. 149-151.
92. Чернов, Д. Б. Принципы конструкционного применения материалов с термомеханической памятью / Д. Б. Чернов. – Москва : НИИСУ, 1984. - 150 с.
93. Чернов, Д. Б. Термомеханическая память и методы её определения / Д. Б. Чернов. – Москва : НИИСУ, 1982. – 146 с.
94. Чигарев, А. В. ANSYS для инженеров : справочное пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. - Москва : Машиностроение, 2004. - 512 с.
95. Шишкин, С. В. О применении сплавов с памятью формы в специальных силовых устройствах / Н. А. Махутов, С. В. Шишкин // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2003. – № 5. – С. 87-94.
96. Шишкин, С. В. Расчет и проектирование силовых конструкций на сплавах с эффектом памяти формы : учебное пособие / С. В. Шишкин, Н. А. Махутов. – Москва : Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2007. – 412 с.
97. Шрейбер, Г. К. Конструкционные материалы в нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности: справочное пособие / Г. К. Шрейбер, С. М. Перлин, Б. Ф. Шибряев. – Москва : Машиностроение, 1969. – 396 с.
98. Эффект памяти формы и их применение в медицине / В. Э. Гюнтер [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1992. – 742 с.
99. Эффекты обратимой памяти формы и термоциклического возврата деформации в сплаве ТН-1 / И. Н. Андронов, Р.А. Вербаховская [и др.] // Заводская лаборатория – 2007. – № 2. – Т. 73. – С. 64-67.
100. Явление многократно-обратимой памяти формы и реактивные напряжения в сплаве ТН-1 / И. Н. Андронов, А. С. Гуревич, В. А. Лихачев, П. И. Недбаев // Актуальные проблемы прочности : материалы XXIV Всесоюзного семинара. – Днепропетровск: ДХТИ, 1990. – С. 147-148.

101. Active protective coatings. New-generation coatings for metals / edited by A. E. Hughes, J. M. C. Mol, M. L. Zheludkevich, R.G. Buchheit. – Heidelberg : Springer Netherlands, 2016. – 428 p.
102. ISO 21809-3:2008. Petroleum and natural gas industries. External coatings for buried or submerged pipelines used in pipeline transportation systems. Part 3: Field joint coatings. – Режим доступа : <https://www.sis.se/api/document/preview/913933/>.
103. Johnson, A. D. «Training» phenomena in NITINOL / A. D. Johnson // Proceedings of NITINOL heat engine conference (September 26-27 1978). – 1978. – P. 1-22.
104. Liu, H. Pipeline engineering / H. Liu. – New York : Lewis publishers, 2003. – 448 p.
105. Miyazaki, S. Effect of cyclic deformation on the pseudo elasticity characteristics of TiNi alloys / S. Miyazaki, T. Imai, Y. Igo // Metallurgical and Materials Transactions A. – 1986. – V. 17. – № 1. – P. 115-120.
106. Moaveni, S. Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS / S. Moaveni. – London: Pearson, 2008. – 898 p.
107. Otsuka, K. Mechanism of shape memory effect and superelasticity / K. Otsuka, C. M. Wayman // Shape memory materials. – Cambridge: Cambridge University PRESS, 1998. – P. 27-47.
108. Otsuka, K. Shape memory materials / K. Otsuka, C.M. Wayman. – Cambridge: Cambridge University PRESS, 1998. – 284 p.
109. Shape Memory Alloys: Fundamentals, Modeling, Applications / V. Brailovski, S. Prokosnkin, P. Terriault, F. Trochu. – Montreal : ETS Publ., 2003. – P. 851.
110. Singh, R. Pipeline integrity handbook: risk management and evaluation / R. Singh. – Amsterdam : Elsevier INC, 2014. – 308 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



АКТ
о внедрении в учебный процесс
результатов диссертационного исследования, выполненного
Семиткиной Екатериной Владимировной на тему
«ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
МУФТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ МАТЕРИАЛА С ЭФФЕКТОМ
ПАМЯТИ ФОРМЫ ДЛЯ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ»

Настоящим актом подтверждается факт введения с 11.02.2019 результатов, полученных в ходе выполнения диссертационного исследования, в образовательный процесс, реализуемый ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет» по направлению подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело» (уровень бакалавриата) в рамках дисциплин «Технология трубопроводостроительных материалов» и «Технологии сварки трубопроводов и резервуаров».

Методика проведения экспериментальных лабораторных исследований используется при проведении лабораторных работ: «Определение основных механических характеристик металла трубопроводов при испытаниях на растяжение», «Методы исследования металлов. Металлографический анализ». В рамках практических занятий решаются задачи по расчёту обжимной жесткости муфтовых конструкции для соединения технологических трубопроводов при проектировании объектов нефтегазового комплекса.

Директор ИГНиТТ

Н. П. Демченко

Начальник учебного отдела

А. Б. Мяндина

Начальник учебно-методического
управления

Д. В. Евстифеев