ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ И ГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ – ГАЗПРОМ ВНИИГАЗ

На правах рукописи

An

ЕЛФИМОВ АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ТРУБ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Специальность – 25.00.19 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ

> Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> > Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Александр Сергеевич Кузьбожев

Москва – 2019

оглавление

ВВЕДЕНИЕ
1. ОБЗОР И АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА
ТРУБ, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ К НАГРУЗКЕ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ГАЗОПРОВОДОВ НА
ПРОЧНОСТЬ
1.1 Анализ особенностей сталей труб, использованных при сооружении магистрального
газопровода Бованенково – Ухта10
1.1.1 Этапы развития производства сталей для магистральных газопроводов10
1.1.2 Основные особенности труб для магистрального газопровода Бованенково – Ухта15
1.2 Сущность и тенденции изменения характеристик физико-механических свойств металла
труб при механическом статическом нагружении17
1.3. Анализ методов оценки физико-механических свойств и напряженного состояния
металлических конструкций
1.3.1. Рентгеновские, ультразвуковые и тепловые методы
1.3.2. Методы, основанные на магнитоупругом эффекте
1.3.3. Анализ результатов исследований состояния металлоконструкций по коэрцитивной
силе
1.4 Выводы по главе 140
2. ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ТРУБ, РАЗРУШЕННЫХ В ПРОЦЕССЕ
ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ И ГЕРМЕТИЧНОСТЬ 41
2.1. Объект исследований41
2.2. Исследования изломов в очагах разрушения газопровода46
2.3. Определение химического состава металла труб48
2.4. Определение твердости металла труб и оценка по ним характеристик механических
свойств
2.5. Выводы по главе 2
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ВЗАИМОСВЯЗИ
МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРУБАХ ИЗ СТАЛЕЙ К60, К65 С ИХ
КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛОЙ
3.1. Особенности напряженно-деформированного состояния магистральных
газопроводов
3.2. Методика испытаний60
3.2.1. Назначение

3.2.2. Сущность метода испытаний	60
3.2.3. Оборудование и приборы	60
3.2.4. Образцы для испытаний	60
3.2.5. Подготовка к испытаниям	61
3.2.6. Проведение испытаний	66
3.2.7. Обработка результатов испытаний	66
3.3. Характеристики образцов	67
3.3.1. Геометрические размеры	67
3.3.2. Характеристики механических свойств	72
3.3.3. Результаты измерения исходных значений коэрцитивной силы	79
3.4. Обоснование параметров изгибающей нагрузки	91
3.5. Результаты испытания образцов и их анализ	100
3.5.1. Результаты исследования влияния немагнитного покрытия на значения коэри	цитивной
силы	100
3.5.2. Результаты измерения коэрцитивной силы при упругом деформировании об	бразцов и
их анализ	102
3.5.3. Изменение коэрцитивной силы при пластических деформациях металла	105
3.6. Выводы по главе 3	115
4. РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ ОПРЕД	ЕЛЕНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ГАЗОПРОВОДАХ	118
4.1. Обоснование градуировочных зависимостей для определения меха	нических
напряжений в газопроводе по коэрцитивной силе	118
4.2. Методика оценки напряженно-деформированного состояния газопрово	одов по
магнитным характеристикам металла	125
4.2.1. Подготовка и проведение измерений	125
4.2.2. Расчет механических напряжений по результатам определения пространс	твенного
положения трубопровода	126
4.2.3. Оценка соответствия параметров напряженно-деформированного с	остояния
трубопроводов нормативным требованиям	129
4.3. Опробование методики определения механических напряжений по коэрцитив	ной силе
на стенде, моделирующем изгиб газопровода	130
4.4. Выводы по главе 4	137

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРОБОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПЕНКИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ТРУБ В ПРОЦЕССЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ ГАЗОПРОВОДА БОВАНЕНКОВО – УХТА 139 5.1. Обоснование выбора участков газопроводов для контроля свойств металла труб при 5.2. Характеристика объектов исследований.....142 5.4. Анализ характеристик напряженно-деформированного состояния газопровода при проведении пневматических испытаний.....151 5.4.2. Расчет параметров напряженно-деформированного состояния газопровода на участке 5.5. Оценка особенностей изменения физико-механических характеристик металла сварных швов и околошовных зон труб в процессе пневматических испытаний магистрального 5.5.1. Анализ особенностей изменения физико-механических характеристик металла труб в окрестности кольцевых сварных швов.....160 5.5.2. Анализ результатов определения характеристик механических свойств по твердости......162 5.5.3. Результаты предварительных лабораторных исследований магнитных свойств металла труб в окрестности сварного шва......165 5.5.4. Результаты контроля качества сварных соелинений ультразвуковым И радиографическим методами171 5.5.5. Магнитный контроль металла сварных соединений труб......172 5.5.6. Результаты магнитного контроля материала труб и сварных кольцевых швов..........174

введение

Актуальность темы.

С применением при строительстве магистральных газопроводов новых высокопрочных труб и увеличением величины рабочего давления с 5,5 до 11,8 МПа изменяются и требования к испытаниям их на прочность при введении в эксплуатацию. При этом вопросы обеспечения эффективности и информативности этих испытаний для обеспечения надежности дальнейшей эксплуатации газопроводов становятся все более актуальными. Основными целями испытаний является выявление критических дефектов металла трубы, которые вызывают разрушение при испытательном давлении, для подтверждения заданного запаса прочности при эксплуатации. При планировании испытаний должны быть обеспечены заданные условия нагружения во всех сечениях газопровода, исключающие условия перегрузки с возникновением неконтролируемых пластических деформаций. Особенно актуально это для мест с высокой концентрацией напряжений, например, в сварных швах, и некоторых других локальных элементах трубопроводов.

Поэтому, разработка методов оценки напряженно-деформированного состояния высокопрочных труб газопроводов на основе изменения их механических свойств в рамках планирования режимов, порядка проведения и оценки результатов испытаний являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования.

Степень разработанности темы исследования достаточно высока. При этом есть локальные нерешенные задачи. К ним относится недостаточная разработанность расчетных и экспериментальных методов оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) труб, изготовленных из высокопрочных сталей К60 и К65,в том числе с дефектами в сварных швах.

Расчетные методы оценки НДС, вследствие сложности учета всего комплекса действующих нагрузок, не всегда могут гарантировать высокую точность получаемых результатов. При расчетной оценке напряжений в газопроводе с помощью существующих расчетных методов в ряде случаев может возникать существенная погрешность, связанная с недостоверностью исходных данных, выбором методики расчета и изменяющихся в процессе эксплуатации конструкции условий, определяющих нагрузку.

Использование совокупности расчета и приборного контроля может позволить более достоверно определить фактическое значение напряжений в стенках трубопровода, а значит и правильно оценить воздействующие на газопровод нагрузки. Методы приборной оценки НДС газопроводов к настоящему времени большей частью отработаны на трубных сталях феррито-перлитного класса. Для новых высокопрочных трубных сталей класса К60 (Х70) и К65 (Х80) подобный опыт отсутствует.

Цель работы.

Разработка методов оценки изменения механических свойств металла высокопрочных труб в зависимости от параметров напряженно-деформированного состояния участка газопровода и контроля НДС в рамках планирования режимов, порядка проведения и оценки результатов испытаний газопроводов.

Задачи исследования:

 выполнить на лабораторном стенде экспериментальные исследования и оценить взаимосвязь механических напряжений в трубах, выполненных из высокопрочных сталей К60 и К65, с их магнитными характеристиками;

2) разработать методику оценки параметров НДС трубопроводов, изготовленных из высокопрочных сталей К60 и К65, основанную на учете изменений магнитных характеристик металла, выполнить ее верификацию на полноразмерном трубном стенде;

3) выполнить экспериментальную оценку изменения свойств металла труб при проведении пневматических испытаний газопровода в условиях эксплуатации.

Научная новизна:

Экспериментально подтверждена зависимость анизотропии коэрцитивной силы труб из стали К60, К65 от механических напряжений, полученная с использованием диаграммы «напряжения-деформации» с учетом характеристик механических свойств образцов, описанная линейными функциями на участках упругого деформирования и упрочнения и нелинейной зависимостью – на участке упругопластического деформирования.

Экспериментально на трубном стенде подтверждена закономерность появления анизотропии магнитных свойств металла высокопрочных труб К60 после снятия нагрузки в случае действия упругопластических и пластических деформаций, при этом погрешность определения напряжений, превышающих предел текучести металла труб, составляет 10 – 18 %.

С использованием конечно-элементной модели определена линейная зависимость эквивалентных механических напряжений на границе единичного некритического сферического дефекта сварного шва труб из стали К60, К65 от внутреннего давления в газопроводе, обосновывающая развитие упругопластических или пластических деформаций при заданном уровне испытательного давления 14,7 МПа (1,25 от рабочего).

Экспериментально установлена зависимость изменения магнитных характеристик металла кольцевых сварных швов на одиночных и групповых некритических дефектах после

пневматических испытаний газопровода с 1,25-кратным превышением давления от рабочего, выражающаяся в увеличении значения коэрцитивной силы над кольцевым сварным швом после пневматических испытаний: - до 2,5 % при наличии единичных дефектов, - до 1,5 % при наличии групповых дефектов и снижении ее значения до 4,5 % при их отсутствии.

Теоретическая значимость работы.

Разработанные автором положения, посвященные расчетно-экспериментальному обоснованию методов диагностирования газопроводов, служат основой для совершенствования диагностического и строительного контроля технологических процессов испытаний газопроводов на прочность и герметичность. Полученные результаты позволяют обосновать возможность испытания газопроводов из новых высокопрочных труб внутренним давлением воздуха с 1,25-кратным превышением давления от рабочего, выполнять количественные оценки НДС состояния металла труб с использованием диагностических методов, что в конечном итоге способствует обеспечению надежности газопровода на стадии его эксплуатации.

Практическая ценность работы.

Разработанная расчетная модель механических напряжений, возникающих на границах дефектов в сварных швах труб из сталей К60, К65 позволяет обосновать граничный уровень 1,25-кратного превышения испытательного давления от рабочего, не допускающего развития упругопластических или пластических деформаций в металле труб.

Разработанная методика оценки поведения некритических дефектов в сварных швах труб по магнитным параметрам позволяет установить характер деформаций (упругие, упругопластические), которые испытывал материал трубопровода при его испытании и выполнить селекцию сварных швов по необходимости проведения ремонта.

Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены в ООО «Газпром трансгаз Ухта» при испытании газопровода Бованенково – Ухта.

Личный вклад автора.

Заключается в непосредственной разработке методик проведения лабораторных и натурных экспериментов и испытаний, самостоятельной постановке задач научных исследований, обработке результатов проведенных исследований и получении математических зависимостей.

Автором получены новые теоретические результаты, исследованы процессы развития деформаций в металле труб под воздействием механической нагрузки.

Автор принимал участие в апробации результатов исследований при мониторинге и диагностировании участков газопроводов Бованенково-Ухта и Ухта-Торжок ООО «Газпром трансгаз Ухта» в процессе проведения их испытаний на прочность и герметичность. Автор лично принимал участие в натурных экспериментах во время стендовых испытаний новой трубной продукции для газопровода Бованенково-Ухта.

Методы исследования.

Экспериментальное лабораторное моделирование на образцах из труб, стендовые испытания с применением методов определения твердости (оборудование ПИМ-ДВ-1), математическое моделирование с использованием метода конечных элементов, магнитного метода определения коэрцитивной силы (КРМ-Ц-К2М), геодезического метода.

Положения, выносимые на защиту:

 – расчетно-экспериментальное обоснование метода измерения коэрцитивной силы для определения параметров изменения магнитных свойств образцов из стали К60, К65 под действием изгибающей нагрузки в процессе стендового моделирования;

 – расчетно-экспериментальное обоснование методики оценки изменения физикомеханических характеристик металла кольцевого сварного шва в окрестности некритических дефектов по результатам измерения коэрцитивной силы;

 – расчетно-экспериментальное обоснование методики оценки НДС газопроводов с учетом магнитных характеристик металла.

Степень достоверности результатов и выводов.

Проведена верификация теоретических собственных научных результатов с результатами лабораторного эксперимента и стендового моделирования, а также с результатами теоретических, лабораторных, стендовых и промышленных испытаний других авторов. Получена сходимость результатов не менее 85 %.

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались:

 – на IV Международной научно-технической конференции «Обслуживание и ремонт газонефтепроводов» (6 – 11 окт. 2008 г.);

 – 3-ей Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы трубопроводного транспорта Западной Сибири» (г. Тюмень, 2009 г.);

 – V Международной научно-технической конференции «Обслуживание и ремонт газонефтепроводов» (4 – 9 окт. 2010 г.); – Х Международной научной конференции «Севергеоэкотех» (УГТУ, г. Ухта, 4 – 5 февр. 2010 г.);

– IV Международной научно-технической конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» (GTS-2011), (ВНИИГАЗ, г. Москва, 2011 г.);

 – IX Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России» (РГУНиГ им. И.М. Губкина, г. Москва, 30 янв. – 1 февр. 2012 г.);

– семинарах, деловых встречах, отраслевых совещаниях и научно-технических советах ПАО «Газпром» и его дочерних обществ за период 2008 – 2019 гг.

Соответствие паспорту специальности.

Представленная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ», а именно области исследования по пунктам:

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.

4. Разработка теории конструктивной и системной надежности нефтегазо-проводных систем, в том числе для сложных климатических условий.

6. Разработка и усовершенствование методов эксплуатации и технической диагностики оборудования насосных и компрессорных станций, линейной части трубопроводов и методов защиты их от коррозии.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 13 работ, из них 5 в ведущих рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, содержит 203 страницы текста, 87 рисунков, 34 таблицы и список литературы из 140 наименований.

1. ОБЗОР И АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ТРУБ, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ К НАГРУЗКЕ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ГАЗОПРОВОДОВ НА ПРОЧНОСТЬ

1.1 Анализ особенностей сталей труб, использованных при сооружении магистрального газопровода Бованенково – Ухта

1.1.1 Этапы развития производства сталей для магистральных газопроводов

Газопроводные трубы в процессе эксплуатации работают в условиях, существенно отличающихся от условий работы других металлоконструкций: суровый климат, воздействие постоянных и циклических нагрузок, а также аккумулирование большого количества упругой энергии сжатого газа.

Надежность и долговечность эксплуатации трубопроводов зависит от качества металла труб. Требования, предъявляемые к металлу труб, сводятся к тому, что металл должен иметь максимально возможную прочность, обладать высокой вязкостью и сопротивлением вязкому и хрупкому разрушениям при температурах строительства и эксплуатации, а также иметь хорошую пластичность и свариваемость.

Низколегированные стали, относящиеся к первому поколению сталей для газопроводных труб большого диаметра, содержали в качестве основных легирующих элементов марганец и кремний, образующие с железом твердые растворы замещения. Степень упрочнения от легирования указанными элементами в пределах, не допускающих существенного ухудшения пластичности, вязкости и свариваемости, относительно невелика. На низколегированных сталях этого типа достигли уровня прочности 500 – 520 МПа в сочетании с удовлетворительной пластичностью. Их эксплуатация может осуществляться до температуры минус 5 °C. Этим требованиям отвечает сталь 17ГС, предназначавшаяся для труб диаметром 530 – 820 мм и используемая в горячекатаном состоянии. Практика массового изготовления труб из стали 17ГС подтвердила, что эта сталь технологична и относится к классу хорошо свариваемых [75].

Сталь скорректированного состава (с увеличенным содержанием марганца до 1,15 – 1,55 %) получила наименование 17Г1С. Исследования показали, что нормализованная сталь 17Г1С хорошо сопротивляется образованию трещин и надрывов при жесткой пластической деформации, обладает низким температурным порогом хладноломкости, а также достаточно однородными механическими свойствами при статическом растяжении вдоль и

поперек оси прокатки листа. После холодной деформации и старения ударная вязкость стали 17Г1С снижается, однако она остается все же на достаточно высоком уровне. Потеря ударной вязкости в результате старения составляет 25 – 41 %. Результаты широкого промышленного применения этой стали показали, что изготовление ее не вызывает технологических затруднений, а свойства листовой стали и готовых труб из нее получаются достаточно стабильными. Поэтому сталь 17Г1С долгие годы являлась основной для изготовления труб диаметром 1020 и 1220 мм.

В связи с необходимостью дальнейшего повышения вязких свойств стали 17Г1С было введено ограничение содержания в ней серы и фосфора: не более 0,020 и 0,025 %. Такая сталь получила название 17Г1С-У. Изменение содержания примесей позволило заметно повысить ударную вязкость. Переход на производство газопроводных труб из стали 17Г1С и затем 17Г1С-У позволил значительно повысить работоспособность труб и сократить число отказов на газо- и нефтепроводах из-за качества основного металла.

Разновидностью стали 17ГС является сталь 12Г2С, разработанная для изготовления горячекатаных газопроводных труб диаметром 530, 720 и 1020 мм (взамен стали 14ГС). Сталь всегда обеспечивала стабильность механических и технологических характеристик. В стали 12Г2С повышено содержание марганца и кремния по сравнению со сталью 14ГС. Нормализованная сталь 12Г2С характеризуется повышенным сопротивлением разрушению при оценке по ударной вязкости и волокнистости в изломе. Комплекс вязких свойств при отрицательной температуре позволил применять сталь 12Г2С для труб северного исполнения.

Рассмотренные стали с твердорастворным упрочнением можно отнести к первому поколению отечественных сталей для газо- и нефтепроводных труб большого диаметра. В зарубежных стандартах им соответствуют стали класса X52 по APJ 5LX с содержанием углерода до 0,20 %, марганца до 1,35 % и с добавками ванадия (0,04 – 0,08 %) или ниобия (до 0,04 %).

Накопленный опыт производства и применения сталей рассмотренного типа для газопроводных труб показал, что дальнейшее повышение их прочностных свойств с одновременным улучшением сопротивления разрушению только за счет увеличения содержания углерода и элементов, образующих твердые растворы замещения, не представляется возможным из-за резкого ухудшения вязкости, хладостойкости и свариваемости. Более высокие значения характеристик прочности и вязкости без снижения свариваемости оказалось возможным получить за счет карбидного или карбонитридного упрочнения введением микролегирующих добавок ванадия, ниобия и азота. В результате этих работ [25, 90, 91, 112, 116, 120] были разработаны низколегированные стали второго поколения для труб большого диаметра с временным сопротивлением, равным 540 – 600 МПа.

На базе стали 17Г1С для спиральношовных труб была разработана сталь 17Г2СФ, содержащая 0,05 % ванадия и 0,01 – 0,03 % титана. Введение карбидообразующего элемента ванадия позволило повысить прочность стали до 540 МПа при сохранении ударной вязкости на достаточно высоком уровне. Сталь 17Г2СФ характеризуется мелкозернистым строением (балл зерна 8 – 9). Она обладает хорошей технологичностью в трубном переделе (формовка, сварка по обычной технологии). Вместе с тем, трубы, изготовленные из этой стали Волжским трубным заводом, наиболее часто разрушались по причине стресс-коррозии. Это привело к необходимости замещения этих труб в действующих газопроводах. Например, в ООО «Газпром трансгаз Ухта» поэтапно была выполнена замена 76 км термоупрочненных труб 1220 × 10,5 мм, изготовленных Волжским трубным заводом из стали 17Г2СФ.

Для прямошовных труб была разработана сталь 14Г2СФБ, содержащая до 0,04 % ниобия. Уровень временного сопротивления у этой стали после нормализации составлял 550 МПа в сочетании с высокой пластичностью, вязкостью и хладостойкостью.

На следующем этапе развития технологии производства труб для магистральных трубопроводов эффективным решением, обеспечивающим повышение прочности материала, стало карбонитридное упрочнение. Присутствие дисперсных частиц вызывает существенное измельчение зерна и умеренное дисперсионное твердение. Благодаря мелкозернистости структуры вязкие и пластические свойства стали сохраняются на достаточно высоком уровне даже при значительном повышении прочности [23]. Трубные стали с карбонитридами ванадия (17Г2АФ, 17Г2САФ, 14ГАФ-У, 15Г2АФЮ и др.) имеют различное содержание углерода, кремния, алюминия. В качестве обязательных микролегирующих элементов они содержат ванадий (0,05 – 0,12 %) и азот (0,015 – 0,025 %). Стали с карбонитридным упрочнением характеризуются повышенной мелкозернистостью и более развитой субзеренной структурой феррита, чем стали без карбонитридообразующих элементов. Важным качеством сталей с карбонитридным упрочнением является сохранение пластичности, вязкости и свариваемости на уровне сталей с твердорастворным упрочнением [92, 97, 109].

При сравнении низколегированных сталей с одинаковой прочностью для труб большого диаметра можно заметить, что при наличии микролегирующих элементов стали характеризуются значительно лучшими показателями ударной вязкости при пониженных температурах, пластичностью и более низкой переходной температурой хрупкого разрушения. Так, например, сталь 15Г2АФЮ выгодно отличается от других сталей с карбонитридным упрочнением близкого состава повышенной вязкостью и хладостойкостью, пластичностью, улуч-

шенной свариваемостью и более высоким металлургическим качеством. Это было достигнуто путем совершенствования состава стали по отдельным элементам, а также технологических параметров выплавки и термообработки. Серию низколегированных сталей с карбонитридным упрочнением, обладающих более высокой прочностью, чем стали с твердорастворным упрочнением, можно охарактеризовать как второе поколение трубных сталей.

В дальнейшем технические требования, предъявляемые к трубам, были существенно ужесточены и расширены. Основными показателями были определены критерии, оценивающие сопротивление хрупкому и вязкому разрушениям: ударная вязкость на образцах с острым надрезом при минус 15 °C должна быть не менее 80 Дж/см², волокнистая составляющая в изломе образцов DWTT – не менее 80 %. Для решения новых задач потребовались и новые проблемы: снижение подходы к решению содержания серы до 0,004 – 0,006 %, совместное использование карбонитридного и субструктурного упрочнения. В дальнейшем работа была продолжена в направлении создания сталей контролируемой прокатки, так называемых малоперлитных, обладающих уникальным сочетанием высокой хладостойкости, прочности, ударной вязкости и повышенной свариваемостью, не содержащих дефицитных элементов, в первую очередь молибдена. Эти стали относятся к третьему поколению конструкционных сталей для газопроводных труб большого диаметра.

Концепция создания малоперлитных сталей, имеющих временное сопротивление 550 - 590 МПа, предусматривает снижение величины их углеродного эквивалента с целью повышения высокой свариваемости путем уменьшения содержания углерода до 0,10 – 0,13 %, что в 1,5 – 2 раза ниже, чем в нормализованных сталях аналогичного назначения. Получение необходимой прочности в малоперлитных сталях достигается благодаря введению микродобавок ванадия, ниобия и титана в сумме 0,10 – 0,15 %. Эти добавки способны вызвать эффект дисперсионного упрочнения за счет образования при охлаждении после прокатки чрезвычайно мелких (~ 2 – 10 нм) частиц карбонитридных фаз указанных элементов. При рациональном микролегировании эти элементы кроме упрочняющего воздействия способствуют смещению в сторону отрицательных температур переходной температуры хрупкого разрушения и повышения ударной вязкости стали при испытании в области температур вязкохрупкого перехода.

Структура и свойства малоперлитных сталей формируются под непосредственным воздействием горячей пластической деформации с большими суммарными обжатиями в нижней части γ-области и в смешанной (γ – α)-области. Это принципиально отличает их от традиционных нормализованных или термически улучшаемых трубных сталей, подвергаемых после горячей прокатки нормализации или закалке с отпуском. Их окончательная струк-

тура образуется в результате $\gamma \to \alpha$ -превращения недеформированного аустенита или разложения при отпуске игольчатых продуктов его распада.

Процесс контролируемой прокатки представляет собой высокотемпературную термомеханическую обработку с воздушным охлаждением применительно к низколегированным сталям. Основное назначение контролируемой прокатки, являющейся завершающей стадией технологического процесса, заключается в получении дисперсной зеренной структуры с развитой субструктурой. Это в сочетании с карбонитридным упрочнением обеспечивает благоприятное соотношение прочностных, пластических и вязких свойств. В процессе контролируемой прокатки структура и свойства малоперлитных сталей в значительной степени формируются под влиянием пластической деформации с большими суммарными обжатиями в нижней части (γ + α)-области и в межкритической (γ + α)-области.

В работах [27, 76 – 78, 110] показано, что в сталях контролируемой прокатки улучшены все показатели, характеризующие вязкость и пластичность, а именно: способность к пластической деформации в холодном состоянии при статическом и динамическом нагружениях, ударная вязкость в области вязкого и смешанного разрушения, переходная температура хрупкого разрушения и свариваемость. Эти стали отвечают требованиям к сталям для газопроводных труб категории прочности X65 – X70.

Повышение временного сопротивления с 590 до 640 – 690 МПа потребовало перехода от сталей феррито-перлитного класса к сталям с микроструктурой, состоящей из смеси полигонального и игольчатого феррита (малоуглеродистого верхнего бейнита), либо со структурой, состоящей из 100 % игольчатого феррита. Наличие субструктуры игольчатого феррита с высокой плотностью дислокаций, а также упрочнение выделениями дисперсных карбонитридных фаз придают стали высокую прочность. Игольчатый феррит формируется после контролируемой прокатки из рекристаллизованного мелкозернистого аустенита, что обеспечивает ему мелкозернистое строение и высокое сопротивление хрупкому разрушению.

Для получения высокой ударной вязкости и сопротивления хрупкому разрушению содержание углерода в сталях со структурой игольчатого феррита понижено еще в большей степени, чем в малоперлитных сталях, и составляет менее 0,06 – 0,03 %. Создание таких сталей невозможно без устранения вредного влияния примесей, в первую очередь серы, на их свойства. Современные технологические мероприятия, освоенные на металлургических заводах при выплавке и внепечной обработке стали, позволили снизить содержание серы до уровня менее 0,003 – 0,001 % и нейтрализовать влияние остаточных сульфидных включений за счет придания им глобулярной формы, введения кальция или редкоземельных металлов. В перспективе, резервом в этом направлении можно считать более полное рафинирование металла от других примесей (фосфора, азота и водорода), повышение однородности его химического состава, уменьшение ликвационных явлений при затвердевании непрерывнолитых слябов или слитков, повышение чистоты по неметаллическим включениям (оксиды, силикаты и др.).

1.1.2 Основные особенности труб для магистрального газопровода Бованенково – Ухта

МГ Бованенково – Ухта сооружен из труб, изготовленных из сталей классов прочности К60 (Х70) и К65 (Х80). Трубы имеют наружное антикоррозионное и внутреннее гладкостное покрытие. Для экономии металла и снижения стоимости строительства при сохранении надежности трубопроводов были повышены требования к трубам по прочности, ударной вязкости, хладостойкости и свариваемости. Достижение новых установленных требований стало возможно только при переходе от традиционной для трубных сталей контролируемой прокатки феррито-перлитной структуры к более мелкой феррито-бейнитной структуре. В этом случае ферритное зерно со средним размером \approx 5 мкм заменяется бейнитным с размером \approx 1 мкм. Для получения мелкозернистой феррито-бейнитной структуры (рисунок 1.1) при производстве стали используют контролируемую прокатку с ускоренным охлаждением, рисунок 1.2.



Рисунок 1.1 – Структура стали К65 (продольный шлиф, увеличение × 800)



Рисунок 1.2 – Изменение структуры стали К65 в процессе ее производства

Кроме этого, для получения у сталей К60 и К65 феррито-бейнитной структуры уменьшено содержание углерода до 0,07 %, а также использованы легирующие элементы (марганец, молибден, никель, хром), снижающие температуру $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения и тормозящие перлитную реакцию. Химический состав сталей К60 и К65 приведен в таблице 1.1. Следует отметить, что эквивалент углерода у этих сталей равен 0,43 – 0,45, т. е. по показателю эквивалента углерода трубы из сталей К60 и К65 относятся к ограниченно свариваемым.

Таблица 1.1 – Химический сос	став сталей К60 и К65
------------------------------	-----------------------

Сталь	Химический состав, %								
	С	Mn	Mo	V	Nb	Ti	Ν	S	Р
K60 (X70)	0,07	1,60	0,30	0,05	0,05	0,02	до 0,006	до 0,002	до 0,010
K65 (X80)	0,07	1,85	0,30	0,05	0,05	0,02	до 0,006	до 0,002	до 0,010

Благодаря используемой технологии производства сталей К60 и К65 происходит не только повышение их прочностных свойств, но и обеспечение высоких пластических свойств. Нормативные значения основных характеристик труб из сталей К60 и К65 сведены в таблицу 1.2.

Класс прочности	Временное сопротивление ов, МПа	Предел текучести σ _т , МПа	Ударная вязкость основного металла при температуре – 40 °C, Дж/см ²	σ _т /σ _в , не более	Относительное удлинение, δ5, %, не менее
К60	590	485	63	0,93	18
К65	640	555	70	0,92	18

Таблица 1.2 – Нормативные значения основных характеристик труб из сталей К60 и К65

Несмотря на повышение прочностных свойств материала толщина стенки труб МГ Бованенково – Ухта выросла до двух раз по сравнению с толщиной стенки труб эксплуатирующихся МГ. Данные о сортаменте труб МГ Бованенково – Ухта приведены в таблице 1.3. Повышение толщины стенки труб обусловлено увеличением рабочего давления с 5,4 и 7,4 до 11,8 МПа.

Класс прочности Толщина Наружный диаметр Область применения стали стенки, мм К60 26,4 Участки категории Н 23.0 Участки категории Н 1420 К65 27,7 Участки категории С 33,4 Участки категории В 27,2 Участки категории С 1220 К60 32,6 Участки категории В 1020 К60 27.3 Участки категории В

Таблица 1.3 – Сортамент труб на участках МГ Бованенково – Ухта

Следует отметить, что вследствие повышения прочности конструкционного материала происходит резкое повышение его чувствительности к концентраторам напряжения, например, дефектам, и к любым технологическим воздействиям, прежде всего к сварке, а также резкое повышение чувствительности материала к воздействию активных сред.

1.2 Сущность и тенденции изменения характеристик физико-механических свойств металла труб при механическом статическом нагружении

При проведении пневматических испытаний газопровода внутренним давлением трубные стали могут изменять характеристики физико-механических свойств металла труб.

Это может выражаться в изменении прочностных свойств, пластичности, что в последующем, при эксплуатации газопровода может изменить показатели сопротивления материала труб хрупкому разрушению [24]. Негативными являются тенденции уменьшения характеристик данных свойств.

Обычно при эксплуатации газопроводов и их последующем ремонте ориентируются на исходные свойства трубных сталей, указанные в сертификатах качества на трубы, в то время как возможное изменение свойств металла в процессе проведения пневматических испытаний и при последующей эксплуатации может потребовать корректировки режимов эксплуатации или, например, режимов сварочных работ при выполнении ремонтных работ на газопроводах.

Сущность изменения свойств металла труб при воздействии статической механической нагрузки описывается теорией деформационного старения (ДС) [118].

ДС принято называть изменение свойств металла, происходящее во времени после холодной или «теплой» пластической деформации. Наиболее важными следствиями ДС стали являются эффекты упрочнения и охрупчивания.

Если указанные эффекты наблюдаются в основном при выдержке после деформации, то такое старение называют статическим, а если в течение самой деформации, то динамическим.

Теория ДС в общем виде исходит из двух основных положений, многократно подтвержденных практикой.

Изменение свойств стали, характерное для ДС, происходит только в том случае, если:

а) в металл деформацией введено определенное количество «свежих» дислокаций;

б) концентрация примесных атомов, которые могут эффективно взаимодействовать с этими дислокациями, превышает 1 · 10–4 % (по массе).

Следовательно, в основе механизма процесса ДС должен лежать механизм взаимодействия примесных атомов с дислокациями, которые введены деформацией. Формальным итогом этого взаимодействия является изменение расположения примесных атомов в объеме металла после ДС по сравнению с тем их расположением, которое существовало сразу после деформации.

После ДС распределение примесных атомов в основном следует распределению дислокаций, дислокационной структуре, созданной деформацией.

ДС протекает во времени и является многостадийным процессом. В порядке очередности возможны следующие стадии деформационного старения:

а) стадия упорядочения;

б) стадия образования атмосфер;

в) стадия сегрегации;

г) стадия выделения.

Искусственное ДС обычно приводит к такому же изменению твердости, как и естественное соответствующей продолжительности [118].

Последнее согласуется также с тем, что искусственное старение, следующее за весьма продолжительным (до восьми месяцев) естественным, как правило, дополнительно повышает твердость.

Изменение свойств при статическом растяжении в процессе ДС исследовано наиболее детально. В том случае, когда направление предварительной и окончательной (после старения) деформации совпадает, удается удовлетворительно связать изменение определенных свойств со стадиями, в том числе ранними стадиями ДС.

На одном и том же образце возможно получить разнообразные свойства, характеризующие сопротивление различным деформациям, процесс упрочнения при деформации, сопротивление разрушению, а также косвенные сведения о поведении дислокаций. Эти свойства часто хорошо коррелируют с другими, в том числе эксплуатационными.

Поэтому испытание на статическое растяжение (с записью технической и получением истинной диаграмм растяжения) использовано в преобладающем числе работ, исследующих изменение механических свойств при ДС, а также причины этого изменения.

Степень предварительной пластической деформации (СППД) заметно изменяет характер диаграммы растяжения стали (рисунок 1.3). При этом относительное удлинение образца снижается на значение предварительной деформации $\varepsilon^{(A)}$, а предел текучести возрастает до значения $\sigma^{(A)}$.

Временное сопротивление стали после предварительной деформации $\sigma_{B}^{(\mu c)}$ не изменяется и равно временному сопротивлению стали в исходном состоянии $\sigma_{B}^{(\mu c)}$. Эти закономерности справедливы, когда время τ_{c} после деформации до последующего нагружения достаточно мало.



а



б

а, б – условные и истинная диаграммы растяжения соответственно; 1 – исходное состояние материала; 2 – предварительная деформация; 3 – ДС Рисунок 1.3 – Влияние предварительной пластической деформации на параметры прямой упрочнения

да (ДС) способствует дополнительному упрочнению стали: $\sigma_{T}^{(AC)} > \sigma_{T}^{(A)} > \sigma_{T}^{(\mu)} > \sigma_{T}^{(\mu)}$ и $\sigma_{B}^{(AC)} > \sigma_{B}^{(\mu)} = \sigma_{B}^{(\mu C)}$. Таким образом, предварительная деформация и ДС приводят к сближению значений предела текучести и временного сопротивления. Отношение предела текучести к временному сопротивлению, как и ранее, будем обозначать через Ктв. Очевидно, что параметр Ктв в исходном состоянии меньше, чем после ДС ($K_{TB}^{(\mu C)} > K_{TB}^{(\mu C)}$). Пластические характеристики и, в частности, относительное удлинение деформационно состаренной $\delta^{(\mu C)}$, деформированной $\delta^{(\mu C)}$ и отожженной $\delta^{(\mu C)}$ стали распределяются в следующей последовательности: $\delta^{(\mu C)} < \delta^{(\mu C)}$. Характерной особенностью диаграммы растяжения деформационно состаренной стали является наличие (или появление) площадки текучести ($\ell^{(\mu C)} > \ell^{(\mu C)}$). ДС снижает коэффициент деформационного упрочнения $m(m^{(\mu C)} < m^{(\mu C)})_{\mu}$ равномерную деформацию $\varepsilon_{B}(\varepsilon_{B}^{(\mu C)} < \varepsilon_{B}^{(\mu C)})_{\mu}$. При этом константы прочности С и интенсивность напряжений σ_{B} находятся в обратном соотношении: $C^{(\mu C)} > C^{(\mu C)}; \sigma_{B}^{(\mu C)} > \varepsilon_{B}^{(\mu C)}$ (см. рисунок 1.3, б).

Применительно к высокопрочной стали категории прочности К65 (X80), из которой изготовлены трубы МГ Бованенково – Ухта, процессы ДС изучены в работе [20] в ходе имитационного эксперимента в соответствии с ГОСТ 7268 [37]. Из основного металла трубы с преимущественно бейнитной структурой вырезались образцы размером $12 \times 12 \times 250$ мм, которые подвергались одноосному растяжению до достижения степени деформации 1; 2; 5 и 10 %. Затем выполнялась термическая обработка образцов при температуре нагрева 250 °C, выдержкой в течение 1 ч с последующим охлаждением на воздухе.

По результатам сравнительных испытаний на растяжение образцов по ГОСТ 1497 с традиционной маркой трубной стали 17ГС установлено, что в процессе ДС у сталей происходит повышение прочностных характеристик и снижение пластичности. Наиболее подвержена изменению свойств трубная сталь 17ГС с ферритно-перлитной структурой и в наименьшей степени сталь категории прочности К65 (X80) с бейнитной структурой. В частности, у стали 17ГС значение предела прочности увеличилось примерно на 25 %, предела текучести – более чем на 47 %, а у стали К65 – соответственно на 9 и 18 %.

Значение относительного удлинения и относительного сужения у стали 17ГС снизились соответственно на 46 и 7 %, а у стали К65 – на 13 и 5 %.

В противном случае блокирование дислокационных структур атомами азота и углеро-

Результаты испытаний на ударную вязкость стали К65 до и после ДС с различной степенью деформации (ГОСТ 9454) показывают, что в результате ДС стали категории прочности К65 с увеличением степени деформации значение ударной вязкости снижается.

Степень ДС оценивали по изменению значений ударной вязкости

$$C = \frac{KCV - KCA}{KCV} \cdot 100 \ \% \tag{1.1}$$

где КСV, КСА – среднее арифметическое значение ударной вязкости стали соответственно в исходном состоянии и после старения МДж/м2.

Результаты сравнительной оценки изменения степени ДС исследованных сталей от температуры показывают, что сталь марки 17ГС проявляет большую склонность к снижению сопротивления хрупкому разрушению в сравнении со сталью класса прочности К65. Это подтверждается высокими значениями степени ДС для стали 17ГС во всем диапазоне температур (рисунок 1.4). Для стали К65 существенное изменение степени ДС наблюдается только при температуре ниже минус 60 °C. В диапазоне от 20 до минус 20 °C степень ДС соответствует значению порядка 10 %.



Рисунок 1.4 – Зависимость степени ДС для сталей марки 17ГС и класса прочности К65 от температуры (по данным Л.А. Ефименко, О.Ю. Елагина [20])

Таким образом, имеются экспериментально подтвержденные данные, что изменение механических свойств металла труб является главным практически важным результатом ДС.

Однако, несмотря на одинаковые тенденции изменения характеристик механических свойств стали при ДС, их углубленное изучение на построенных газопроводах приобретает специфическую важность.

Это обусловлено тем, что на участках газопроводов, эксплуатирующихся в различных климатических, грунтовых и геокриологических условиях, важно иметь индивидуальные критерии характеристик механических свойств металла труб, которые обеспечат эффективное противодействие процессам накопления повреждений вследствие развития ДС при эксплуатации.

Детальное исследование указанных изменений позволяет также развивать и теорию ДС, правильно подходить к методике оценки склонности низкоуглеродистой стали к старению. Для этого необходимо применять методы диагностирования, чувствительные к развитию процессов ДС металла труб.

Измерение твердости при ДС удобно с точки зрения максимально быстрого замера после практически любых видов деформации, а также вследствие простоты самого метода. Например, увеличение твердости при ДС указывает, в частности, на рост коэффициента упрочнения, что связано с определенной стадией закрепления дислокаций. Метод твердости можно использовать и для оценки анизотропии упрочнения.

Определение макротвердости широко применяют для оценки характеристик механических свойств металла нефтегазопроводов, используя при этом различные регрессионные модели. Макротвердость преимущественно характеризует характеристики прочности стали, т. е. ее способность сопротивляться медленно возрастающей статической нагрузке, что вполне достаточно, например, для выбора марки стали, соответствующей данной величине и виду нагрузки. Однако макротвердость напрямую не влияет на способность металла трубопроводов противостоять, например, хрупкому разрушению, что определяется на уровне структурных составляющих стали.

В этом случае наиболее подходит метод определения микротвердости, который применяют для оценки характеристик механических свойств отдельных структурных составляющих многофазных сплавов. По микротвердости можно проследить механизмы преобразований в структуре стали, которые ведут к старению или усталости, и в итоге, к разрушению трубопроводов.

1.3. Анализ методов оценки физико-механических свойств и напряженного состояния металлических конструкций

1.3.1. Рентгеновские, ультразвуковые и тепловые методы

Рентгеновский метод заключается в облучении поверхности контролируемого изделия электромагнитным излучением рентгеновского диапазона и измерении интенсивности рассеиваемого поверхностью излучения. Метод известен давно, широко применяется в рентгеноструктурном анализе и позволяет измерять абсолютную величину напряжений. Использование метода в промышленных условиях долгое время сдерживалось отсутствием достаточных по мощности мобильных источников рентгеновского излучения и соответствующих чувствительных регистраторов. В последние годы эта проблема во многом решена [57, 80, 94]. В качестве источников излучения используют и радиоизотопы [16].

Недостатки метода: малая глубина проникновения рентгеновского излучения для переносных дефектоскопов (до 0,02 мм), сильная зависимость результатов измерения от температуры металла, необходимость защиты персонала от ионизирующего излучения. Погрешность определения напряжений в производственных условиях составляет ± 10 МПа.

Ультразвуковые методы [125, 126], как и рентгеновские, позволяют определять величину напряжений в материале, если известны некоторые физические константы материала. Способ заключается в возбуждении в контролируемом объекте ультразвуковых колебаний и измерении их фазы и амплитуды. В некоторых случаях варьируют частоту колебаний, добиваясь резонанса. Помимо измерения упругих напряжений способ используется при контроле пластической деформации. Значительное число изобретений в данной области направлено на увеличение точности измерения и на контроль повреждений при усталостном нагружении [38, 58, 63, 95].

Основным недостатком метода является необходимость хорошего акустического контакта датчика с поверхностью контролируемого изделия, что особенно трудно обеспечить на искривленных поверхностях и поверхностях, покрытых окалиной.

Принцип теплового метода сводится к тому, что к испытываемому объекту подводится тепло, а затем измеряется распределение температурных полей с помощью тепловизионной аппаратуры. При механическом нагружении какого-либо объекта часть подводимой энергии рассеивается в виде тепла. При нагружении в упругой области количество тепла линейно зависит от величины приложенных напряжений, а начало пластической деформации резко увеличивает выделение тепла. После создания точных средств бесконтактного измерения температуры метод стал применяться для измерения напряжений в металлоконструкциях [66, 127]. Этот метод в общем случае очень прост в применении и дает возможность контроля протяженных поверхностей.

Основные недостатки метода: необходимость очистки исследуемой поверхности от поглощающих излучение покрытий. Погрешность измерения напряжений не превышает ± 20 МПа. Основная область применения метода – измерение величины пластической деформации при статическом или циклическом нагружении.

1.3.2. Методы, основанные на магнитоупругом эффекте

Физической основой для разработки магнитных методов оценки параметров НДС является магнитоупругий эффект – изменение намагниченности тела под действием механических напряжений [26]. При этом изменяются магнитная проницаемость, остаточная намагниченность, коэрцитивная сила, величина магнитострикции и другие магнитные характеристики, которые могут быть приняты в качестве информативных при исследовании напряженного состояния ферромагнитных материалов [45]. С помощью этих методов на сегодняшний день возможно определение одноосного напряженного состояния конструкции, разности главных напряжений и пластической деформации [118].

Стали трубопроводов по магнитным свойствам относятся к ферромагнетикам. Ферромагнетик разбит на определенные области (домены), каждая из которых намагничена до точки насыщения. Домены разделены границами, толщина которых зависит от свойств материала.

В размагниченном состоянии, несмотря на намагниченность каждого домена суммарный магнитный момент ферромагнетика равен нулю. Под действием магнитного поля в ферромагнетике происходит изменение магнитных моментов доменов на направление поля, и ферромагнетик приобретает суммарный магнитный момент, отличный от нуля.

Растяжение поликристаллического образца железа приводит к преимущественной ориентации спонтанной намагниченности вдоль осей намагничивания, близких к направлению растяжения, что вызывает рост начальной магнитной проницаемости в этом направлении и уменьшение ее в перпендикулярном направлении. Для малоуглеродистых сталей наблюдается аналогичная ситуация. Возможность существования связи между структурой, магнитными и механическими свойствами ферромагнитных материалов обусловлена схожим характером взаимодействия с элементами микроструктуры смещающихся доменных стенок, подвижностью которых определяются параметры магнитных структурно-чувствительных характеристик и дислокаций, способность к скольжению которых определяют прочностные и пластические свойства металлов.

Среди магнитных методов определения внутренних напряжений, использующих эффект магнитоупругости, достаточно часто применяются следующие: магнитострикционный метод, коэрцитиметрический метод и метод, основанный на эффекте Баркгаузена [18, 30, 31, 41].

Магнитострикционный метод основан на использовании зависимости магнитострикции от величины приложенных напряжений [32, 73]. Его сущность заключается в следующем: на поверхность элемента конструкции наклеивается тензодатчик, продольная ось которого располагается параллельно действующим усилиям; проводится намагничивание вдоль или поперек оси датчика переменным магнитным полем и дальнейшее измерение продольной или поперечной магнитострикции. О величине внутренних напряжений судят по отношению продольной и поперечной величин магнитострикции.

Магнитострикционный метод обладает высокой чувствительностью, но сложен в реализации. Точность метода мала вследствие его большой чувствительности к структурным свойствам металла, зависит от качества приклейки тензодатчика и температуры.

При намагничивании и перемагничивании ферромагнитных материалов намагниченность представляет собой набор дискретных изменений в виде необратимых скачков намагниченности различной величины [22].

Метод измерения шумов Баркгаузена основан на эффекте перемещения стенок магнитных доменов, представляющих собой области спонтанной намагниченности, каждая из которых намагничена практически до насыщения, при приложении механического усилия к материалу. При этом изменяется намагниченность и пространственные размеры тела как целого. Фиксирование процесса перемещения стенок доменов возможно при помещении катушки из электропроводящей проволоки рядом с образцом. Изменение намагниченности будет индуцировать ток в катушке [104].

Энергетический спектр шумов Баркгаузена находится в диапазоне частот, начинающемся от частоты внешнего намагничивающего поля и расширяющемся в большинстве материалов до 250 – 500 кГц. Этот шум экспоненциально затухает в зависимости от расстояния вглубь от поверхности материала. Основными факторами, определяющими глубину, на которой заметен эффект, являются электропроводность и магнитная проницаемость испытываемого материала, а также частотный диапазон, выбранный для анализа (для стали эта глубина колеблется от 0,01 до 3,00 мм). Интенсивность шумов Баркгаузена зависит от приложенного усилия и микроструктуры материала. Точность определения одно- и двухосных поверхностных напряжений зависит от соответствия микроструктуры калибровочного и испытываемого образцов [65, 108, 122].

В качестве недостатка необходимо отметить, что этот метод существенно зависит от качества подготовки поверхности. В работах [68, 122] показано значительное влияние поверхностно-пластического деформирования на электродвижущую силу скачков Баркгаузена. Так, например, при увеличении напряжений до 400 МПа выходной сигнал изменяется на 60 %, тогда как при наклепе поверхности выходной сигнал может изменяться в десятки и даже сотни раз, что затрудняет использование данного метода для измерения напряжений в реальных металлоконструкциях.

Данный метод реализован в ряде приборов, предназначенных для измерения механических напряжений металлоконструкций. Примером таких приборов могут служить приборы типа «Стресскан», «Роллскан», «Интромат», «Пион» и т. д. Однако, указанные приборы позволяют определять величину напряжений в довольно тонком слое поверхности металла. А поскольку известно, что верхний слой (до 0,2 мм) металла находится в нехарактерном для конструкции напряженном состоянии (наклеп, азотирование, цементация, механические микроцарапины и пр.), то применение данных приборов на практике ограничено.

Использование коэрцитивной силы как одного из магнитных параметров для неразрушающего определения механических напряжений было предложено сравнительно недавно [14, 56]. Для реализации этого метода Захаров В.А. с сотрудниками разработали и изготовили коэрцитиметр с миниатюрными накладными датчиками и сняли кривые зависимости продольной (измеряемой вдоль оси напряжений) и поперечной коэрцитивной силы на стали 10 и 45 как в области упругих, так и в области пластических деформаций.

Измерение коэрцитивной силы осуществлялось следующим образом. Включался и выдерживался в течение 0,1 – 1,0 с постоянный электрический ток в обмотках электромагнита. Этим самым обеспечивалось промагничивание материала на глубину, сравнимую с толщиной полюса электромагнита. Процедура повторялась три раза. Затем следовало автоматическое плавное размагничивание обратным током. Ток, сводящий остаточную намагниченность (магнитную индукцию) до нуля, под полюсами датчика-электромагнита (ток размагничивания) пропорционален коэрцитивной силе. После градуировки прибора по эталонам им можно измерять непосредственно коэрцитивную силу.

В ряде других работ [19, 42, 68, 69, 72, 87 – 89, 99, 101] показана принципиальная возможность использования коэрцитивной силы для целей определения напряжений в металлоконструкциях и рассмотрены основные механизмы зависимости коэрцитивной силы от механических напряжений, а также исследовано влияние структурных факторов на эту зависимость. Более подробно об этих исследованиях будет изложено в разделе 1.3.3 главы 1. Проведенный анализ электромагнитных и магнитных методов измерения напряжений показал, что они имеют следующие особенности.

При использовании переменного тока, подаваемого в датчик, глубина проникновения переменного электромагнитного поля, а, следовательно, толщина слоя металла, от которого можно получить информацию о его напряженном состоянии, зависит от частоты тока и заключена в диапазоне от нескольких миллиметров до долей миллиметра. По этой причине электромагнитные свойства поверхностного слоя металла, в котором уже из-за технологических причин происходит изменение его химического состава по глубине, например, выгорание углерода и др., изменяются и существенно сказываются на результатах определения напряжений. При больших частотах электромагнитного сигнала сказывается даже тонкий слой влаги на поверхности металла. По этой причине применение постоянных или медленно меняющихся магнитных полей имеет несомненное преимущество. В этом случае глубина проникновения магнитного поля может быть доведена до десятка и более миллиметров и определяется в основном размерами намагничивающей системы.

Влияние зазора между изделием и датчиком на результаты измерений становится тем более ощутимым, чем больше величина магнитной индукции, созданной в металле и магнитопроводе датчика. В коэрцитиметрическом методе фиксируется ток в момент, когда магнитная индукция (или намагниченность) равна нулю. В этом случае влияние зазора на результаты измерений минимально.

На результатах измерения напряжений магнитными методами сказывается магнитная и механическая предыстория образца, когда внешними магнитными полями создается магнитная текстура. Если внешнее поле, применяемое при измерении, слабо, то сформировавшаяся текстура не разрушается. Нужно специально прикладывать сильное поле, чтобы разрушить текстуру. И в этом плане является привлекательным коэрцитиметрический метод, в котором изделие вначале намагничивается сильным магнитным полем, разрушая магнитную текстуру.

В лучших вариантах (с учетом зазора) магнитоупругого определения напряжений коэрцитиметрическим методом в материалах известного состава (марки стали) погрешность измерения механических напряжений составляет 10 - 15 %. Современные коэрцитиметры имеют погрешность 1 - 3 %, что открывает возможность повысить в целом точность определения напряжений, используя коэрцитиметрический метод. Кроме того, измерение коэрцитивной силы достаточно экономично и позволяет производить до 10000 циклов измерений без подзарядки прибора. Рассмотренные плюсы коэрцитиметрического метода показывают необходимость его дальнейшего развития для целей диагностики механических напряжений.

Весьма перспективным параметром для контроля механических напряжений является остаточная намагниченность (магнитное поле рассеяния). Однако здесь велика роль внешнего и внутреннего магнитного поля как мешающего фактора, источника систематических и случайных ошибок, т. е. нужны достаточно надежные приемы и методы отстройки от их влияния. При разработке методов измерения напряжений с использованием магнитных полей рассеяния существенное значение должны играть расчетные методы их оценки, однако существующие аналитические зависимости эффекта магнитоупругой памяти от величины напряжений и магнитных свойств магнетиков нуждаются в проверке на разного рода магнитострикционных материалах. Мал и перечень материалов, обладающих ярко выраженной магнитоупругой памятью, ее чувствительностью к напряжению, необходимой механической прочностью, температурной и временной стабильностью.

Известный из литературы пьезомагнитный эффект магнитнополяризованного ферромагнетика (ферромагнетика в остаточно намагниченном состоянии) систематически не исследован при больших напряжениях на конструкционных сталях и редкоземельных сплавах, поэтому неизвестны его возможности в деле измерения напряжений и в магнитной структуроскопии. Не ясна физика пьезомагнитного эффекта остаточно намагниченного ферромагнетика и его связь с магнитными и магнитоупругими параметрами.

Использование магнитоупругой памяти открывает широкие возможности для создания различного рода автономных запоминающих датчиков силы. Однако они в достаточной мере не реализованы как в конструкционном плане, так и в плане защиты от мешающих факторов увеличения точности измерения.

1.3.3. Анализ результатов исследований состояния металлоконструкций по коэрцитивной силе

Коэрцитивная сила, как и другие магнитные характеристики материала, существенно зависит от ряда факторов, в числе которых структура и химический состав материала, размеры контролируемой конструкции, толщины покрытия, наличие трещиноподобных дефектов, а также механические характеристики конструкционных сталей.

Внутренняя структура материала и его реальные механические свойства обусловлены длительным воздействием механических и термических нагрузок, а также агрессивных сред. Влияние различных структурных параметров одновременно на магнитные и механические свойства стимулировало широкое использование магнитных методов для оценки структуры и механических свойств проката [11, 106, 113, 119] и термически упрочненных изделий [21, 62]. Предпосылкой для применения магнитного контроля с целью оценки НДС металлических конструкций является существование определенной связи между структурой, магнитными и механическими свойствами сталей. Так, в малоуглеродистых и низколегированных сталях основным параметром, определяющим их прочностные и магнитные свойства, является средний размер ферритного зерна [18, 60].

Оценка влияния размера зерен на механические и магнитные свойства проводилась во многих работах [29, 33, 40, 121, 124, 132, 137, 140]. Авторы [13, 28, 84, 102, 129, 134] показали, что между коэрцитивной силой и размером зерен феррита и перлита существует обратно пропорциональная связь.

В работах [13, 15, 98, 128, 130, 131, 133, 136, 138, 139] установлено влияние формы цементита в перлите на магнитную жесткость ферромагнетиков, которая возрастает с ростом ширины прослоек цементита и уменьшением расстояния между ними.

В работе [135] изучены магнитные гистерезисные свойства материала, полученного методом механического сплавления цементита. Показано, что сильно деформированный цементит находится в низкокоэрцитивном, а отожженный при 500 °С – в высококоэрцитивном состояниях.

В работе [2] было проведено исследование влияния толщины экспериментальных образцов на результаты коэрцитиметрии. Известно, что промагничивание металла при коэрцитиметрическом методе зависит от размеров датчика, силы тока намагничивания и других характеристик прибора и в большинстве случаев составляет 20 - 30 мм [28]. Толщина исследуемых в работе [2] образцов составляла 5 мм, что более чем в два раза меньше реальной толщины трубопроводов, составляющей обычно 10 - 13 мм. В ходе испытаний было установлено, что уменьшенная толщина лабораторных образцов (5 мм вместо 10 - 13 мм), может изменять значения коэрцитивной силы до 5 %, что меньше допускаемой основной погрешности измерения прибора. В случае необходимости, для учета изменения коэрцитивной силы можно вводить поправку, определяемую с помощью экспериментально полученной зависимости.

Также в работе [2] было проведено исследование влияния немагнитного покрытия на поверхности металла на результаты коэрцитиметрии. Такие исследования особенно важны для магнитного контроля трубопроводных конструкций. Пассивная защита труб от коррозии предполагает применение антикоррозионного покрытия, снижающего вероятность возникновения коррозионных процессов. Удаление покрытия для проведения измерений (в том числе локальное) требует его обязательное восстановление. Качественное восстановление покрытия, связано с необходимостью привлечения значительных материальных и трудовых

ресурсов, особенно на линейной части подземных магистральных нефтегазопроводов. Поэтому было необходимо оценить возможность использования метода без удаления немагнитного покрытия с металла труб.

Данные исследования проводились на ненагруженных образцах. Влияние зазора исследовалось в ходе измерений коэрцитивной силы H_c через слой, имитирующий наличие покрытия на трубе, толщина зазора регулировалась с помощью фрагментов немагнитного материала (полиэтилена), устанавливаемого между ненагруженным образцом и датчиком коэрцитиметра. На рисунке 1.5 представлены результаты проведенных измерений. Исследования в этом направлении в разное время выполнялись и другими исследователями [2, 83, 85, 96, 117].

Известно, что границы образца и другие искажения поверхности (например, трещины) возмущают наведенное магнитное поле в процессе проведения измерений. Этот эффект используется, в частности, в магнитной дефектоскопии [64]. В работе [2] проводилось определение зависимости между показаниями коэрцитивной силы фрагмента трубы и расстоянием до искусственного продольно-ориентированного дефекта.

Анализ полученных данных позволил сделать вывод, что расстояние до дефекта (края объекта) менее 100 мм оказывает влияние на результаты измерений. Значение коэрцитивной силы при приближении к дефекту увеличивается.



Рисунок 1.5 – Влияние толщины h немагнитного покрытия на поверхности образца на значение коэрцитивной силы

В работах [60, 64] были проведены исследования влияния пластичности материала на коэрцитивную силу, авторы изучали зависимость коэрцитивной силы и ДС материала, вследствие чего было установлено, что магнитный метод, основанный на измерении коэрцитивной силы металла, может являться эффективным методом оценки уровня действующих напряжений в конструкции.

В изобретении [10] уровень механических напряжений нагруженной детали предлагается определять по результатам измерения нескольких значений коэрцитивной силы, а именно, коэрцитивной силы H_0 до нагружения, коэрцитивной силы $H_{\rm H}$ нагруженной детали, в направлении, перпендикулярном направлению нагружения, и коэрцитивной силы H_p детали после ее разгрузки, измеренной в направлении нагружения. По отношениям $H_{\rm H}/H_0$, $H_{\rm H}/H_p$ и H_p/H_0 устанавливается значение напряжения σ по отношению к пределу текучести $\sigma_{\rm T}$ следующим образом:

-если (HH/Hp) > 1 и (HH/H0) > 1, то $\sigma < \sigma$ т;

-если (H_H/Hp) > 1 и (Hp/H0) > 1, то $\sigma = \sigma$ т;

-если (HH/Hp) < 1, то $\sigma > \sigma$ т.

В патенте [107] по результатам непрерывного измерения коэрцитивной силы нагружаемого ферромагнетика оценивается наличие и значение остаточных напряжений после возникновения пластической деформации. При наличии остаточных напряжений в процессе приложения к детали возрастающей растягивающей нагрузки происходит не возрастание, а уменьшение коэрцитивной силы. О величине остаточных напряжений судят по значению растягивающих напряжений, соответствующих минимальному значению коэрцитивной силы. Кроме того, в патенте отмечается, что данный способ может быть реализован не только при растяжении детали, но и при ее изгибе. При этом в том случае, когда датчик устанавливают на растянутую сторону детали, то вышеизложенные изменения коэрцитивной силы будут такими же, а когда датчик устанавливают на сжатую зону детали, то характер изменения коэрцитивной силы будет обратным.

В работе [56] показано, что пластическая деформация приводит к появлению АКС разгруженного поликристаллического образца. Возникновение АКС после пластической деформации объясняется возникновением и развитием ориентированных микронапряжений. Если произошла пластическая деформация, и металл находится под действием внешних сил, то зависимость коэрцитивной силы от напряжений испытывает необратимые напряжения. При этом значения коэрцитивной силы после разгружения образца заметно возрастают, а градуировочные кривые, снятые на недеформированном магнетике, оказываются неприменимыми.

В статье [68] на основе проведенных исследований сделан вывод, что оценка внешних упругих напряжений с помощью коэрцитивной силы наиболее эффективна для сжимающих

напряжений при условии, что амплитуда этих напряжений порядка или больше средней величины внутренних напряжений.

В работе [111] исследовано изменение коэрцитивной силы и ее анизотропии от внешних напряжений для малоуглеродистых сталей 15ХСНД, 25ХСНД, 09Г2С (Япония), Х70 (ФРГ), 17ГС. Исследования проводили на призматических образцах толщиной 10 – 16 мм, длиной 300 мм, шириной 70 мм. Для образцов исследованных сталей были получены значения коэрцитивной силы при приложении нагрузки вдоль оси напряжений H_c^{II} и значения коэрцитивной силы, измеренные в направлении, перпендикулярном прикладываемой нагрузке H_c^{II} . Графики зависимостей H_c^{II} и H_c^{II} от напряжений σ приведены на рисунке 1.6.



 2 – сталь 15ХСНД; 3, 4 – сталь 17ГС; 5,6 – сталь 25ХСНД;1, 3, 5 – измерения поперек направления нагрузки; 2, 4, 6 – измерения вдоль направления нагрузки
 Рисунок 1.6 – Зависимость коэрцитивной силы H_c от величины напряжений σ при растяжении для различных сталей

Из рисунка 1.6 следует, что H_c^{\parallel} сначала уменьшается, а затем монотонно растет, H_c^{\perp} только увеличивается. Наклон кривых зависимостей $H_c^{\parallel}(\sigma)$ мало отличается у исследованных сталей, при этом наибольшая глубина падения наблюдается у стали 17ГС и стали 09Г2С. Наклон кривых зависимостей $H_c^{\perp}(\sigma)$ меньше всего у сталей 17ГС и 09Г2С и больше всего у

стали 25ХСНД. Видно, что качественно ход кривых продольной и поперечной коэрцитивной силы идентичен для всех образцов. При нагрузке, превышающей 150 – 200 МПа, зависимость Hc (σ) становится практически линейной.

В статье [103] после обработки результатов испытаний образцов получена формула, применимая для широкого класса конструкционных сталей, позволяющая определять величину механических напряжений по экспериментальным значениям относительной АКС:

$$\frac{H_c^{\perp} - H_c^{II}}{H_c^0} = 0.59 \left(1 - e^{-0.018\sigma}\right) + 11.66 \cdot 10^{-10} \sigma$$
(1.2)

где H_c^0 – коэрцитивная сила в ненагруженном состоянии.

Расчеты показали, что во всем интервале экспериментальных нагрузок от 50 до 250 МПа погрешность определения напряжений не превышает 20 %. Максимальное значение ошибки, составившее 24 %, получено при нагрузке 300 МПа [111].

В работе [59] предложено оценивать относительный ($\sigma/\sigma \tau$) уровень напряженного состояния металлоконструкций по относительной АКС в виде $(H_c^{\perp} - H_c^{II})/(H_c^{\perp} + H_c^{II})$, используя следующую формулу:

$$\frac{H_c^{\perp} - H_c^{II}}{H_c^{\perp} + H_c^{II}} = 27.1 \cdot th \left(0.045 \frac{\sigma}{\sigma_m}\right)$$

$$(1.3)$$

В этом случае отпадает необходимость измерения коэрцитивной силы ненагруженного металла, что далеко не всегда возможно при работе с уже нагруженным материалом. Кроме того, даже при отсутствии данных о фактических значениях механических характеристик контролируемого материала будет получена информация о том, как далеко по нагрузке находится материал от его предела текучести от.

Выражение (1.3) позволяет с достаточной для практики точностью определять нагруженность металлоконструкций. Экспериментальные точки довольно плотно ложатся вблизи расчетной кривой (рисунок 1.7). Погрешность измерения напряжений составляет ± 20 %. При этом использование безразмерного параметра $(H_c^{\perp} - H_c^{\parallel})/(H_c^{\perp} + H_c^{\parallel})$ позволяет определять не только растягивающие, но и сжимающие напряжения. При этом приведенная зависимость является симметричной, несмотря на то, что зависимости $H_c^{\parallel}(\sigma)$ и $H_c^{\perp}(\sigma)$ несимметричны.



Рисунок 1.7 – Зависимость относительной АКС $(H_c^{\perp} - H_c^{\parallel})/(H_c^{\perp} + H_c^{\parallel})$ от величины приведенных напряжений σ/σ_T

В работах [2 – 7, 82, 86, 100] было исследовано влияние растягивающей нагрузки на показания коэрцитиметра. Исследования проводились на призматических образцах, изготовленных из фрагментов аварийных труб и труб аварийного запаса. Материал образцов – сталь 17Г1С. Размеры образцов: толщина 5 мм, длина – 280 мм, ширина – 50 мм. Образцы подвергали растяжению на разрывной машине MP-100. Нагружение производили ступенчато с шагом 20 МПа до достижения напряжениями 80 % от нормативного значения предела текучести. На каждом шаге нагружения фиксировали значения коэрцитивной силы в четырех вза-имно перпендикулярных направлениях. По результатам исследований были получены зависимости коэрцитивной силы от механических напряжений (рисунок 1.8).

Из рисунка 1.8 видно, что с ростом напряжений происходит более заметное изменение H_c^{\perp} , хотя известно, что для плоских образцов, подвергнутых одноосному растяжению, механические напряжения возникают только в направлении действия растягивающей нагрузки.



Рисунок 1.8 – Зависимость коэрцитивной силы от параметров напряженного состояния при одноосном растяжении плоского образца

Поскольку значения коэрцитивной силы, полученные при намагничивании вдоль действия растягивающей нагрузки и в направлении, перпендикулярном растягивающему усилию, по разному изменяются с ростом напряжений, то в работе было рассмотрено изменение АКС, которую вычисляли по следующей формуле:

$$\Delta H_c = (H_{c1}^{\perp} + H_{c2}^{\perp})/2 - (H_{c1}^{II} + H_{c2}^{II})/2, \qquad (1.4)$$

где Δ Hc – AKC, A/м; H_{c1}^{\perp} и H_{c2}^{\perp} – значения коэрцитивной силы в направлении перпендикулярном действующей нагрузке, A/м; H_{c1}^{\parallel} и H_{c2}^{\parallel} – значения коэрцитивной силы, полученные при направлении намагничивания вдоль оси действия растягивающей нагрузки, A/м.

Зависимость АКС от параметров напряженного состояния для рассматриваемых образцов имеет возрастающий характер. Пример такой зависимости представлен на рисунке 1.9.

По результатам проведенной работы была определена функциональная зависимость изменения АКС от величины растягивающих напряжений. Полученные результаты легли в основу нормативного документа МР 1209 – 05 «Методика определения механических напряжений в технологических трубопроводах компрессорных станций по коэрцитивной силе материала», разработанного и внедренного в ООО «Севергазпром» в 2005 году [85].


Рисунок 1.9 – Зависимость величины АКС от параметров напряженного состояния при одноосном растяжении плоского образца

В работах [12, 71] исследовано влияние плоского напряженного состояния на характер изменения коэрцитивной силы. В работе [12] в качестве объекта исследования использовался лабораторный образец, представляющий собой трубу наружным диаметром 140 мм с толщиной стенки 1,4 мм. Нагрузка создавалась путем нагнетания машинного масла во внутреннюю полость трубы ручным насосом. В процессе нагружения осуществляли измерение коэрцитивной силы поперек и вдоль оси трубного образца при каждом подъеме давления на 0,5 МПа (5 кгс/см²). Предельное значение давления составило 5 МПа (50 кгс/см²). При таком изменении внутреннего давления на каждом шаге нагружения кольцевые и продольные напряжения увеличивались на 25,3 и 12,7 МПа соответственно, а предельные значения напряжений составили 253,6 и 126,8 МПа. Корреляционный анализ результатов показал (рисунок 1.10), что для данной модели применение коэрцитиметрического метода при растягивающих нагрузках эффективно лишь для напряжений, величина которых не превышает 50 % от предела текучести (участок 1). Коэрцитивная сила равномерно убывает с ростом напряжений вплоть до 175 МПа, коэффициент корреляции между значениями коэрцитивной силы и значениями напряжений на данном участке k = 0,98 (практически функциональная зависимость). Далее показания коэрцитиметра не реагируют на изменение напряжений. Коэффициент корреляции на участке 2 близок к нулю.

В ходе проведенной работы подтверждено, что положительная деформация материала приводит к снижению коэрцитивной силы, измеренной в направлении этой деформации, в то время как отрицательные значения деформаций приводят к увеличению показаний коэрцитиметра.

37



Рисунок 1.10 – Изменение коэрцитивной силы металла модели трубопровода при увеличении напряжений, возникающих под действием внутреннего давления

Кроме этого, в ходе испытаний осуществляли нагружение модели крутящим моментом, создающим в металле модели касательные напряжения, и проверку установленных зависимостей изменения коэрцитивной силы и ее анизотропии.

В работе [71] исследования выполняли на экспериментальном стенде, который позволяет моделировать пять вариантов НДС, вызванных чистым изгибом, чистым кручением и совместным действием изгиба с кручением. Трубный элемент стенда имеет следующие параметры: наружный диаметр 325 мм, толщина стенки 8 мм, материал – сталь 14ХГС. Нагружение трубного элемента стенда осуществляли с помощью ручных домкратов.

В ходе выполненных исследований было установлено следующее (рисунок 1.11).

Коэрцитивная сила H_c^{μ} практически не зависит от интенсивности напряжений при сдвиге, заметно убывает при растяжении и при растяжении со сдвигом, и возрастает при сжатии и сжатии со сдвигом. Коэрцитивная сила H_c^{μ} практически не зависит от интенсивности напряжений при сжатии и растяжении, несколько возрастает при растяжении со сдвигом и убывает при сжатии со сдвигом и чистом сдвиге. При этом наиболее заметное изменение коэрцитивной силы происходит при чистом сдвиге. Материалы, представленные в настоящем разделе, показывают, что коэрцитивная сила может быть использована для анализа НДС малоуглеродистых трубных сталей [50].

Оценка напряжений возможна как при одноосном, так и при сложном, вызывающем, например, плосконапряженное состояние, нагружении.



при растяжении; 2 – при растяжении со сдвигом; 3 – при чистом сдвиге;
4 – при сжатии со сдвигом; 5 – при сжатии

Рисунок 1.11 – Изменение коэрцитивной силы $H_c^{II}(a)$ и $H_c^{\perp}(b)$ в зависимости от вида нагружения трубного элемента экспериментального стенда

Наиболее высокая точность определения уровня действующих напряжений достигается в том случае, когда известны коэрцитивная сила контролируемой стали в ненагруженном состоянии, а также значения ее механических характеристик. При отсутствии этих данных погрешность выполняемой оценки возрастает, а сама оценка сводится к анализу уровня напряжений в конструкции по отношению к значению предела текучести материала.

1.4 Выводы по главе 1

В ходе проведенных исследований было выполнено следующее:

 – сравнительный анализ свойств высокопрочных сталей К60, К65 и сталей, использованных ранее при изготовлении труб для МГ;

 – аналитический обзор методов неразрушающего контроля, используемых для оценки
НДС металлических конструкций, и исследований, направленных на оценку НДС металлических конструкций по значению коэрцитивной силы металла.

При оценке возможности эксплуатации трубопроводов с заданным уровнем надежности необходимо обладать информацией о механических напряжениях, возникающих в стенке труб от совокупности всех действующих нагрузок. Участки МГ с напряжениями в стенках труб, превышающими значения, регламентируемые нормами, относятся к категории потенциально опасных по причине снижения вероятности безотказной работы объекта. Превышение напряжениями значения предела текучести металла многократно повышает вероятность разрушения трубопровода, появления и развития дефектов.

МГ Бованенково – Ухта сооружен из труб, изготовленных из сталей классов прочности K60 (X70) и K65 (X80). Трубы имеют наружное антикоррозионное и внутреннее гладкостное покрытие. Стали K60 и K65 имеют высокое временное сопротивление (не менее 590 и 640 МПа соответственно) и достаточную пластичность. Повышение временного сопротивления и обеспечение других установленных требований стало возможно только при уменьшении содержания углерода в 2 - 3 раза (до 0,07 %) по сравнению с нормализованными трубными сталями первого поколения и при переходе от традиционной для трубных сталей контролируемой прокатки феррито-перлитной структуры к более мелкой феррито-бейнитной структуре. По показателю эквивалента углерода трубы из сталей K60 и K65 относятся к ограниченно свариваемым.

Обзор по методам неразрушающего контроля, используемым для оценки НДС металлических конструкций, показал, что коэрцитивная сила может быть достаточно эффективно использована для анализа НДС малоуглеродистых трубных сталей. Оценка напряжений возможна как при одноосном, так и при сложном, вызывающем, например, плосконапряженное состояние, нагружениях. Наиболее высокая точность определения уровня действующих напряжений достигается при наличии градуировочных зависимостей, а также в том случае, когда известны коэрцитивная сила контролируемой стали в ненагруженном состоянии и значения ее механических характеристик. При отсутствии этих данных погрешность выполняемой оценки возрастает, а сама оценка сводится к анализу уровня напряжений в конструкции по отношению к значению предела текучести материала.

2. ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ТРУБ, РАЗРУШЕННЫХ В ПРОЦЕССЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ И ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

2.1. Объект исследований

При проведении пневматических испытаний воздухом 6 мая 2006 г. участка 448 – 505 км произошло разрушение на лупинге МГ Пунга – Ухта – Грязовец (5-я нитка) при испытательном давлении 8 МПа (80,76 кгс/см²). В результате обследования места разрушения было установлено, что разрушилось восемь участков газопровода на длине 1298 м, протяженностью от 23 до 160 м (рисунок 2.1) [49, 52].



<image><image><page-footer>

Рисунок 2.1 – Общий вид разрушенных участков с вертолета (а, б)

Участок 1 находится на расстоянии 100 м от кранового узла на 448 км. Последующие участки разрушенных труб находятся относительно друг друга на расстояниях от 14 до 364 м. Разрушение трубопровода на участках сопровождалось как выбросом фрагментов труб (максимальное количество фрагментов – десять на участке 1), так и раскрытием труб в траншее (участки 5 и 8). Максимальная дальность разлета фрагментов составила 106 м.

Участок 1.

Разрушившийся участок 1 общей длиной 160 м (рисунок 2.2, а) смонтирован из труб производства Германии (Маннесманн) и Италии с толщиной стенки 15,5; 18,0; 19,5 и 20,1 мм в заводской изоляции. При разрушении образовалось десять кусков трубных фрагментов. Разлет кусков составил до 106 м, отрыв происходил по кольцевым сварным швам и основному металлу труб. Линия разрыва с северного конца проходит на 8 ч, с южного – на 1 ч, как по продольному сварному шву, так и по основному металлу. В середине участка имеются еще две зоны разрыва длиной примерно по 30 м. Между зонами разрыва находятся участки нераскрытых деформированных труб длиной 4 – 5 м.

Участок 2.

Разрушившийся участок 2 общей длиной 70 м (рисунок 2.2, б) смонтирован из труб с толщиной стенки 16,5 и 19,5 мм, фактически измеренная толщина стенки труб после пластической деформации составила от 15,5 до 18,7 мм. Изоляция труб заводская. Одна труба покрыта пленкой. Линия разрыва с северной стороны имеет протяженность 47 м и проходит на 5 ч. С южной стороны линия разрыва длиной 16 м закольцевалась на расстоянии 4 м от кольцевого сварного шва. При разрушении образовалось три фрагмента труб длиной от 11 до 29 м. Разлет кусков составил 35 м.

Участок 3.

Длина разрушившегося участка 45 м (рисунок 2.2, в). Толщина стенки деформированных труб, измеренная после разрушения, составляет 15,5 – 15,7 мм. При разрушении образовался один фрагмент труб длиной 29 м, который был выброшен в сторону от оси трубопровода на 45 м. Линия разрыва с южной стороны проходит по продольному сварному шву на 9 ч. В середине участка находится нераскрытый деформированный участок трубы длиной 10 м.



а



Г





д е а – участок № 1; б – участок № 2; в – участок № 3; г – участок № 4; д – участок № 5; е – участок № 6 Рисунок 2.2 – Общий вид разрушенных участков

В

Участок 4.

Длина разрушенного участка 133 м (рисунок 2.2, г). Толщина стенки деформированных труб после разрушения составляет от 15,0 до 16,5 мм. Изоляция заводского нанесения. При разрушении образовалось шесть фрагментов труб длиной до 34 м с разлетом от оси трубопровода до 90 м. Отрыв фрагментов произошел по кольцевым сварным швам и основному металлу труб. Линия разрыва с южной стороны на 1,5 трубах расположена на 12 ч и переходит по кольцевому сварному шву на следующие две трубы на 8,5 ч. Между зонами разрыва имеются три участка неразорвавшихся труб.

Участок 5.

Длина разрушившегося участка 23 м (рисунок 2.2, д). Толщина стенки деформированных труб 16,0 – 16,5 мм. Изоляция заводского нанесения. Разрушение произошло на длине 23 м без отрыва от прилегающих плеч. Линия разрыва средней трубы проходит по продольному сварному шву на 9 ч.

Участок 6.

Длина разрушенного участка 36 м (рисунок 2.2, е). Толщина стенки деформированных труб составляет 16,5 – 17,5 мм. Изоляционное покрытие пленочное и заводского нанесения. При разрушении образовалось три фрагмента труб с выбросом до 20 м. Линия разрыва на южном конце волнообразная и располагается на 2 – 3 ч. На северном конце разрушение фрагмента длиной 12 – 13 м произошло без отрыва от трубопровода.

Участок 7.

Длина разрушенного участка 124 м (рисунок 2.3, а). Толщина стенки труб от 16,5 до 20,0 мм. При разрушении образовалось пять фрагментов труб. Разлет кусков до 10 м. Отрыв произошел по кольцевому сварному шву и основному металлу трубы. Линия разрыва на северном конце прошла на 9,5 – 10,0 ч по продольному сварному шву средней трубы и закольцевалась по кольцевому сварному шву без раскрытия третьей трубы. С южной стороны первая труба имеет многочисленные прямолинейные и волнообразные линии разрыва, как по продольному сварному шву, так и по основному металлу. Между зонами разрыва имеются два участка длиной 22,5 и 13,0 м нераскрытых деформированных труб.

Участок 8.

Длина разрушенного участка составляет 48 м (рисунок 2.3, б). Образовалось два фрагмента труб, оставшихся в траншее с водой. Участок состоит из труб с толщиной стенки от 16,5 до 18,3 мм. Изоляция пленочная, местами сохранилась на трубах. На первом фрагменте (южный конец) произошло раскрытие трубы вдоль образующей без отрыва. На втором фрагменте (северный конец) расположен язык дорыва.





а

б

а – участок № 7; б – участок № 8
Рисунок 2.3 – Общий вид разрушенных участков

Линия разрыва с волокнистым шиферным изломом проходит параллельно оси трубы на 1 ч по сварному шву заваренного технологического окна. На северном конце линия разрыва закольцевалась на расстоянии 1 м от кольцевого сварного шва, на южном конце разрыв остановился на расстоянии 3 м после кольцевого сварного шва. Остаточная толщина стенки на линии разрыва составляет от 13,9 до 15,5 мм.

На всех разрушенных трубах изломы вдоль линии разрушения (кроме очагов) идентичны. На тонкостенных трубах (номинальная толщина стенки по сертификату – 16,5 мм) излом определен как волокнистый шиферный с утяжкой металла вдоль кромки разрыва до 8 мм. Излом на толстостенных трубах (номинальная толщина стенки – 17,5 – 20,0 мм) вязкий с утяжкой на 1 – 2 мм.

Линия разрыва проходит либо вдоль оси трубы по основному металлу, либо по линии сплавления продольных сварных швов. На всем протяжении разрушенных участков №№ 1 – 7 все трубы вошли в глубокую пластику. На это указывает разнотолщинность труб до 2,0 – 2,5 мм, разрыв заводской изоляции на ленты вдоль образующей, волнообразный характер линии разрыва, увеличение периметра труб, наличие гофр и изгибов. Такая пластическая деформация труб возможна в результате избыточного внутреннего давления, намного превышающего испытательное. Между разрушенными участками № 7 и № 8 протяженностью 380 м остаточная деформация труб не выявлена.

2.2. Исследования изломов в очагах разрушения газопровода

При проведении исследований по определению причин разрушения лупинга МГ применяли метод визуального анализа изломов. Метод заключается в осмотре изломов с помощью лупы с семикратным увеличением. При помощи визуального метода изучаются поверхности изломов и характер деформации вблизи линии разрушения, поскольку изломы и остаточная деформация являются единственными объективными свидетелями процесса разрушения, который происходит при аварии на МГ.

Обследование линии излома и состояния наружной поверхности разрушенных труб позволило выявить четыре очага разрушения, расположенных на участках № 1, 6, 7 и 8 (ри-сунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Очаги разрушения на участках № 1 (а) и № 6 (б)

На фрагменте 1-5 (участок № 1) длиной 11 м, состоящем из одной трубы раскрытой вдоль оси, линия разрыва является ступенчатой. Обследование линии излома позволило выявить очаг разрушения. Очагом определен (согласно ВРД 39-1.2-054-2002) участок с волокнистым шиферным изломом с утяжкой металла вдоль кромки разрыва (рисунок 2.5, а). Очаг длиной 1,5 м расположен на расстоянии 3,5 м от кольцевого сварного шва. Толщина стенки вдоль кромки разрыва 7,5 мм, основного металла 15,6 мм. Вдоль всей линии разрыва обнаружены дефекты в изломе: множественные расслоения и расщепления металла, окисленные поры и пустоты (рисунок 2.5, б, в).



а – волокнистый шиферный излом; б – расслоения; в – окисленные зоны

Рисунок 2.5 – Виды изломов на участке № 1

На фрагменте 6-3 (участок № 6) по шеврону на изломе («елочка») определен очаг разрушения длиной 0,6 м, находящийся на околошовной зоне продольного сварного шва на расстоянии 1,2 м от кольцевого сварного шва.

На фрагменте 7-2 (участок № 7) по схождению шевронного узора определена зона хрупкого разрушения, идущая по линии сплавления продольного сварного шва, являющаяся очагом разрушения на данном участке (рисунок 2.6). Очаг длиной 1,8 м расположен на расстоянии 1,2 м от кольцевого сварного шва. Визуальный осмотр показал наличие технологических дефектов в сварном шве (поры, раковины, непровары).



Рисунок 2.6 – Излом на участке № 7 (шеврон «елочка»)

Очаг на участке № 1 явился началом разрушения данного участка. Очаги на участках №№ 6 и 7, идущие по зоне термического влияния продольных сварных швов, являются вторичными и послужили началом локальных разрывов трубопровода на данных участках. Каждый вид разрушения сопровождается образованием характерного для него вида поверхности разрушения (излома), который в зависимости от типа прилагаемой нагрузки и типа разрушения может весьма значительно видоизменяться.

Изломы в очагах на участках №№ 6, 7 и 8 являются хрупкими и образовались в результате разрушения при отсутствии заметной пластической деформации. Излом в очаге на участке № 1 является волокнистым и характеризуется наличием значительной деформации зерен, обусловившей вытяжку их волокна. Значительная деформация, предшествующая образованию волокнистого вязкого излома, вызывает изменение формы и размеров поперечного сечения стенки трубы, наиболее заметное вблизи излома.

Тип нагружения при вязком разрушении – однократная ударная нагрузка. Разрушение происходит в результате непрерывного увеличения нагрузки, приводящего к росту напряжений вплоть до предела прочности стали.

2.3. Определение химического состава металла труб

Химический состав стали определяли методом оптико-эмиссионной спектроскопии на приборе ARC MET 930. Измерения проводили на темплете № 1, вырезанном из очага разрушения с наружной и внутренней поверхностей трубы, интервалы полученных значений и сертификатные данные представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав стали

Сталь производства		Содержание элементов, масс. %								
MANNESMANROHREN	C	Mn	Si	Ni	Cr	Nb	V	Мо	Al	Cu
Исследуемая сталь	0,120 – 0,140	1,510 – 1,560	0,260 – 0,280	0,039 – 0,064	0,002 – 0,004	0,028 – 0,040	0,060 – 0,070	0,007 – 0,040	0,022 – 0,027	0,014 0,032
Сертификат	0,09	1,60	0,34	0,04	0,04	0,036	0,17	0,06	0,05	0,01

Анализ полученных данных показал, что имеются некоторые отклонения по химическому составу стали. Определено повышенное содержание углерода, что является неблагоприятным с точки зрения сопротивляемости хрупкому разрушению, т. к. углерод оказывает упрочняющее влияние и уменьшает способность стали сопротивляться развитию трещин. Содержание кремния и марганца, наоборот, ниже нормы, что тоже отрицательно сказывается на свойствах металла. Кремний и марганец являются основными раскислителями в стали, и их недостаток влияет на пластические характеристики (снижение относительного удлинения при разрыве). Основные карбидообразующие элементы (ниобий, ванадий и молибден) также содержатся в меньшем количестве, чем должно быть по сертификату качества. В сталях контролируемой прокатки, к которым относится исследуемая сталь, даже незначительное отклонение по химическому составу приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик.

2.4. Определение твердости металла труб и оценка по ним характеристик механических свойств

Измерения твердости проводили с целью предварительной оценки механических свойств основного металла.

Твердометрия проводилась в лабораторных условиях по методу Бринелля механическим прибором «ТБП – 5013» согласно ГОСТ 9012, предварительно проверенным на эталонах твердости. Диаметр шарика 5 мм, испытательная нагрузка 750 кг.

Измерения прибором «ТБП – 5013» делали на темплетах, зачищенных с помощью наждачной бумаги до $R_z = 40$ по основному металлу трубы с наружной и внутренней поверхностей, а также по металлу кольца наплавки.

Результаты измерений приведены на рисунках 2.7 – 2.9.

Анализ результатов измерений показал следующее. Значения твердости на образцах № № 1, 2 (участок № 1) находятся в интервале от 191 до 256 НВ.

Следует отметить повышенные значения твердости на наружной стороне образца (внешняя поверхность трубы).

Также заметна существенно увеличенная твердость на наружной стороне образца вдоль кромки разрыва (218 – 256 HB).

Повышенные значения твердости указывают на деформационное упрочнение металла на наружной поверхности трубы вблизи линии разрушения.

Значения твердости на образце № 3 (участок № 8), измеренные вдоль кромки разрыва, по основному металлу находятся в интервале от 157 до 203 НВ, что соответствует твердости трубных сталей данного класса.



1 – наружная сторона (кромка); 2 – внутренняя сторона (кромка); 3 – наружная сторона (основной металл); 4 – внутренняя сторона (основной металл)
Рисунок 2.7 – Твердость металла труб, образец № 1 (участок № 1)

50



1 – наружная сторона (кромка), 2 – внутренняя сторона (кромка), 3 – наружная сторона (основной металл), 4 – внутренняя сторона (основной металл)
Рисунок 2.8 – Твердость металла труб, образец № 2 (участок № 1)



1 – наружная сторона (кромка); 2 – внутренняя сторона (кромка); 3 – наружная сторона (основной металл); 4 – внутренняя сторона (основной металл)
Рисунок 2.9 – Твердость металла труб, образец № 3 (участок № 8)

Также были определены характеристики механических свойств металла газопровода по тведости прибором ПИМ-ДВ-1. Прибор предназначен для измерений механических свойств материалов по диаграмме вдавливания неразрушающим методом.

Отклонение значений характеристик механических свойств, определенных на приборе и испытаниями на растяжение по ГОСТ 1497 не более, %:

- предела текучести: \pm 7;

- временного сопротивления: ± 5 ;

– относительного удлинения: ± 10.

Измерения проводили на образцах, изготовленных для металлографии. Образцы 1 – 4 вырезаны вблизи очага разрушения на участке № 1, образцы 5 – 6 – в зоне очага на участке № 8 (образец 5-1 – металл трубы МГ).

Для удобства сравнения полученных результатов с данными сертификата на трубы производства «MANNESMANROHREN – WERKE» составлена таблица 2.2.

								Отно-
								си-
	Номер	Іомер	Предел	Предел		Тверлость	Твер-	тель-
	образна	щение,	текучести,	прочности,	$\sigma_{0,2}/\sigma_{\scriptscriptstyle B}$	НВ	дость,	ное
C	• • F J	МКМ	MIIa	MHa			ΗV	удли-
								нение,
								%
	1	81,5	674	871	0,774	256	263	16
	2	85,1	643	840	0,765	148	155	16
Исследуе-	3	90,2	601	797	0,754	237	243	17
мая сталь	4	90,8	597	793	0,753	236	242	17
	5-1	104,4	507	701	0,723	213	218	19
	6	103,4	512	707	0,724	214	219	19
					He			
Сертификат	—	-	438 - 493	634 - 655	более	—	_	25
					0,800			

Таблица 2.2 – Характеристики механических свойств образцов (прибор ПИМ-ДВ-1)

Сравнение характеристик, полученных в ходе испытаний, с данными, приведенными в сертификате, свидетельствует о том, что для всех образцов показатели прочности превышают регламентируемые на 28 – 35 % на участке № 1, на участке № 8 – на 9,5 %.

В то же время показатель пластичности (относительное удлинение после разрыва δ) снижен на 29 % на участке № 1 и на 17 % на участке № 8. Показатели твердости по Бринеллю и Виккерсу также являются повышенными. Это указывает на упрочнение стали вблизи очагов разрушений. Отношение предела текучести к временному сопротивлению (σ0,2/σв) согласно СП 36.13330 (актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*) должно быть не более 0,8. Для всех образцов отношение соответствует нормам.

2.5. Выводы по главе 2

Выполнен анализ свойств металла, параметров и характеристик труб газопровода, разрушенного в процессе пневматических испытаний на прочность и герметичность. Выявлено четыре очага разрушения на трубах фирмы «MANNESMANROHREN – WERKE», которые локализованы, как по основному металлу труб, так и по зоне термического влияния продольных сварных швов, которые являются вторичными и послужили началом локальных разрывов трубопровода на данных участках.

Констатировано наличие локальных участков труб в очагах разрушения, которые характеризуются ухудшением пластических свойств металла труб. В частности, значения твердости (участок № 1) находятся в интервале 191 – 256 НВ, вдоль кромки разрыва 218 – 256 НВ. Повышенные значения твердости указывают на деформационное упрочнение металла на наружной поверхности трубы вблизи линии разрушения. При этом значения предела прочности металла труб завышен до 35 %, а относительное удлинение после разрыва снижено до 29 %.

Причиной разрушения газопровода при пневматических испытаниях послужил спонтанный быстродействующий неконтролируемый рост внутреннего испытательного давления до критических величин, при этом свойства металла труб на локальных участках оказались недостаточными для противостояния данной нагрузке.

Рассмотренный в гл. 2 эпизод пневматических испытаний газопроводов на прочность и герметичность очевидно продемонстрировал необходимость дополнительного оперативного контроля параметров нагружения металла труб газопровода непосредственно (синхронно) в ходе подъема внутреннего давления, в том числе не только по внутреннему давлению, но и по изменению параметров металла труб в ходе нагружения. Это даст возможность оперативноного управления параметрами роста испытательной нагрузки, не доводя ее до критических величин, соответствующих разрушению газопровода [46].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРУБАХ ИЗ СТАЛЕЙ К60, К65 С ИХ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛОЙ

3.1. Особенности напряженно-деформированного состояния магистральных газопроводов

Магистральные газопроводы на стадии эксплуатации находятся в условиях объемного напряженного состояния, составляющими компонентами которого являются кольцевые (σ_{кц}), продольные (σ_{пр}) и радиальные (σ_r) напряжения, рисунок 3.1.



1 – труба; 2 – элементарная площадка



Функциональные зависимости для вышеназванных напряжений имеют вид:

$$\sigma_{\mathrm{KII}} = f(\mathbf{p}; \, \delta; \, \mathbf{D}_{\mathrm{H}}); \tag{3.1}$$

$$\sigma_{np} = f(p; \delta; D_{H}; \Delta T; \rho); \qquad (3.2)$$

$$\sigma_r = f(p), \tag{3.3}$$

где p – внутреннее давление в газопроводе; δ – толщина стенки трубы; D_н – наружный диаметр трубы; ΔT – разница между температурой транспортируемого газа и температурой наружного воздуха при замыкании сваренных плетей труб в единую нитку; ρ – радиус изгиба оси участка газопровода.

Степень опасности такого напряженного состояния оценивается по величине эквивалентных напряжений (о_{экв}), определяемых по одной из существующих теорий прочности.

Специфической особенностью магистральных газопроводов является незначительная величина радиальных напряжений σ_r по сравнению с другими компонентами сложного напряженного состояния. Исходя из установленных норм на проектирование доля радиальных напряжений σ_r в стенках газопроводных труб не превышает 4 % от уровня кольцевых напряжений $\sigma_{\kappa\mu}$. По этой причине радиальные напряжения σ_r не учитываются в инженерных расчетах МГ, то есть рассматривается не объемное, а плоское напряженное состояние в каждой точке трубопровода. Эквивалентные напряжения $\sigma_{3\kappa B}$ в этом случае, в соответствии с энергетической теорией прочности, вычисляется по формуле:

$$\sigma_{\scriptscriptstyle \mathcal{H}\mathcal{B}} = \sqrt{\sigma_{\kappa \mu}^2 - \sigma_{\kappa \mu} \sigma_{np} + \sigma_{np}^2} \ . \tag{3.4}$$

Кольцевые напряжения от внутреннего давления $\sigma_{\kappa n}$, МПа, определяют по формуле:

$$\sigma_{\kappa u} = p(D_{\mu} - 2\delta) / (2\delta). \tag{3.5}$$

Максимальные суммарные продольные напряжения σ_{np} определяют в соответствии с правилами строительной механики. В частности, для прямолинейных и упруго-изогнутых участков газопроводов при отсутствии продольных и поперечных перемещений трубы, просадок и пучения грунта максимальные суммарные продольные напряжения от воздействия внутреннего давления, температурного перепада и упругого изгиба σ_{np} , МПа, определяют по формуле:

$$\sigma_{np} = \mu \sigma_{\kappa \mu} - \alpha_t E \Delta t \pm \frac{E D_{\mu}}{2\rho}, \qquad (3.6)$$

где μ – коэффициент Пуассона; α_t – коэффициент линейного расширения металла труб, 1/град; Е – модуль упругости материала труб, МПа; Δt – температурный перепад, °C, определяемый по формуле:

$$\Delta t = t_c - t_g \,, \tag{3.7}$$

 t_c – максимальная температура стенки трубы на стадии эксплуатации газопровода, °C; t_B – температура наружного воздуха при окончательной сборке (захлесте) участка МГ, °C; ρ – минимальный радиус упругого изгиба оси газопровода, м.

Модуль деформации Е и коэффициент поперечной деформации µ материала труб следует определять в зависимости от значений эквивалентных напряжений и деформаций в конкретной элементарной площадке сечения трубопровода с учетом диаграммы

деформирования материала труб в координатах «напряжение – деформация».

Диаграмму σ – є представляют в виде трех участков: участок упругой работы, упругопластической работы и упрочнения, рисунок 3.2. При этом на участках упругой работы и упрочнения диаграмму описывают линейными функциями, а на участке упругопластической работы – в виде нелинейной зависимости. В качестве базиса принимают четыре точки диаграммы, соответствующие началу координат (точка О), пределу пропорциональности (точка А), условному пределу текучести (точка В) и временному сопротивлению (точка С).



Рисунок 3.2 – Диаграмма деформирования материала труб

Линейные участки диаграммы $\sigma - \varepsilon$ описывали следующими выражениями: – на участке упругой работы, т. е. при $0 \le \varepsilon \le \varepsilon_n$

$$\sigma = E_0 \varepsilon \,, \tag{3.8}$$

– на участке упрочнения, т. е. при $\varepsilon_{0,2} \le \varepsilon \le \varepsilon_{\scriptscriptstyle B}$

$$\sigma = \sigma_{0,2} + E_1(\varepsilon - \varepsilon_{0,2}), \qquad (3.9)$$

где E₀ – модуль упругости материала, принимаемый равным 206000 МПа; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести материала, МПа; $\varepsilon_n = 0.7\sigma_{0,2}/E_0$; $\varepsilon_{0,2} = 0.002 + \sigma_{0,2}/E_0$; $\varepsilon_s = 0.2\delta_5$; $E_1 = (\sigma_s - \sigma_{0,2})/(\varepsilon_s - \varepsilon_{0,2})$; σ_B – временное сопротивление (предел прочности) материала, МПа.

Нелинейный участок диаграммы $\sigma - \epsilon$, т. е. при $\epsilon_n < \epsilon < \epsilon_{0,2}$, описывали следующей

зависимостью:

$$\sigma = 0,7\sigma_{0,2} + E_0(\varepsilon - \varepsilon_n) + a_2(\varepsilon - \varepsilon_n)^{a_3}, \qquad (3.10)$$

где

$$e \qquad a_2 = -\left(E_0(\varepsilon_{0,2} - \varepsilon_n) - 0.3\sigma_{0,2})(\varepsilon_{0,2} - \varepsilon_n)^{-a_3}; \ a_3 = (1 - E_1 / E_0) / (1 - 0.3\sigma_{0,2} / (E_0(\varepsilon_{0,2} - \varepsilon_n)))\right).$$

Значения координат точек диаграммы, находящихся на границах ее характерных участков, для нормативных характеристик сталей К60 и К65, применявшиеся при строительстве газопровода Бованенково – Ухта, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения деформаций и напряжений на границах участков диаграммы σ – ε трубных сталей К60 и К65

Сталь	επ, %	σп, МПа	ε _{0,2} , %	σ _{0,2} , МПа	Е1, МПа	σв, МПа
К60	0,165	339,5	0,435	485,0	2946	590
К65	0,189	388,5	0,469	555	2715	640

При сооружении линейной части магистрального газопровода (МГ) Бованенково – Ухта использовались трубы наружным диаметром 1420 мм (кроме участка подводного перехода через Байдарацкую губу). При этом основная часть трассы МГ Бованенково – Ухта проектом отнесена к категории «С», где использовались трубы из стали К65 с толщиной стенки 27,7 мм, и лишь на отдельных участках – к категории «Н», где были применены трубы из стали К60 с толщиной стенки 26,4 мм. Уровень напряженного состояния труб МГ Бованенково – Ухта при рабочем давлении, равном 11,8 МПа и при испытании давлением, превышающим рабочее давление в 1,25 раз (14,7 МПа) показан в таблицах 3.2 и 3.3. Расчеты выполнены при значении температурного перепада ∆t, равном 30 °C. Результаты проведенных расчетов показывают, что при испытании МГ Бованенково – Ухта давлением, превышающем рабочее в 1,25 раза, металл труб с толщиной стенки 27,7 мм и не имеющих дефектов или других концентраторов напряжений, например, сварных швов, подвержен упругим деформациям даже на участках прокладки упругим изгибом, допускаемым существующими нормами. При этом отношение эквивалентных напряжений к нормативному значению предела текучести металла труб составляет 0,458 – 0,614 при эксплуатационном давлении и 0,572 – 0,716 при испытательном давлении.

Металл труб с толщиной стенки 26,4 мм при испытании подвержен упругопластическим деформациям даже на прямолинейных участках. При этом отношение эквивалентных напряжений к нормативному значению предела текучести на участках прокладки упругим изгибом может составлять до 0,85. На стадии эксплуатации металл труб с толщиной стенки 26,4 мм подвержен упругим деформациям.

δ, мм <mark>σ_{кц},</mark> МПа	Зона		σ _{пр} , МПа, при ρ, м				σ _{экв} , МПа, при ρ, м					
	МΠа	труб	x	1500	2000	2500	3000	x	1500	2000	2500	3000
При эксплуатации (р = 11,8 МПа)												
777	200.7	р	13,0	110,5	86,2	71,5	61,8	284,4	254,1	258,6	262,3	265,2
27,7	290,7	с	13,0	-84,5	-60,1	-45,5	-35,7	284,4	340,8	324,9	315,9	310,1
26.4	26,4 305,5	р	17,5	115,0	90,6	76,0	66,3	297,2	267,3	271,8	275,5	278,4
20,4		с	17,5	-80,0	-55,6	-41,0	-31,2	297,2	352,4	336,8	328,0	322,3
				При	испыта	нии (р	= 14,7 N	ИПа)				
777	362 1	р	34,5	132,0	107,6	93,0	83,2	346,1	317,4	322,1	325,7	328,5
27,7	302,1	с	34,5	-63,0	-38,7	-24,0	-14,3	346,1	397,4	382,9	374,7	369,4
26.4	380.6	р	40,0	137,5	113,2	98,5	88,8	362,3	333,8	338,6	342,2	344,9
20,4	380,0	с	40,0	-57,5	-33,1	-18,5	-8,7	362,3	412,4	398,2	390,2	385,1
	Примеч	ание. Зо	она труб	: p – pac	тянутая	; с – сжа	тая.					

Таблица 3.2 – Параметры напряженного состояния труб магистрального газопровода Бованенково – Ухта при эксплуатации и при испытании

Таблица 3.3 – Сопоставление с нормативным значением предела текучести эквивалентных напряжений в стенках труб магистрального газопровода Бованенково – Ухта при эксплуатации и при испытании

Нормативное зн	Нормативное значе-	Зона труб	$\sigma_{_{3KB}}$ / $\sigma_{_T}$ при ρ , м					
0, MM	сти σ _т , МПа		x	1500	2000	2500	3000	
При эксплуатации (р = 11,8 МПа)								
ד דנ	27,7 555	р	0,512	0,458	0,466	0,473	0,478	
27,7		с	0,512	0,614	0,585	0,569	0,559	
26.4	195	р	0,613	0,551	0,560	0,568	0,574	
20,4	485	с	0,613	0,727	0,694	0,676	0,665	
		При исп	ытании (р =	= 14,7 МПа	.)			
ד דנ	555	р	0,624	0,572	0,580	0,587	0,592	
27,7	555	с	0,624	0,716	0,690	0,675	0,666	
26.4	195	р	0,747	0,688	0,698	0,706	0,711	
20,4	463	с	0,747	0,850	0,821	0,805	0,794	
I	Примечание. Зона труб: ј	р – растяну	тая; с – сжа	тая.				

3.2. Методика испытаний

3.2.1. Назначение

Методика разработана для проведения испытаний образцов металла изгибающей нагрузкой. Методика позволяет установить зависимость коэрцитивной силы металла и ее анизотропии от значений одноосных механических напряжений, обусловленных изгибающей нагрузкой.

3.2.2. Сущность метода испытаний

Сущность метода испытаний заключается в ступенчатом (пошаговом) деформировании образцов изгибающей нагрузкой и контроле величины коэрцитивной силы материала при возникающем уровне механических напряжений.

3.2.3. Оборудование и приборы

1. Стенд для создания в образцах изгибных напряжений.

2. Прибор для измерения значений коэрцитивной силы от 1,0 до 15,0 А/см (коэрцитиметр КРМ-Ц-К2М).

3. Металлическая линейка по ГОСТ 427 [35] с ценой деления 1 мм.

4. Штангенциркуль по ГОСТ 166 [34] с погрешностью измерения 0,1 мм.

5. Ультразвуковой толщиномер с погрешностью измерения не более 0,1 мм (УТ 93П, «KraUtkramer», DME DL).

6. Твердомер, обеспечивающий измерение значений поверхностной твердости от 150 до 300 HB.

7. Прибор ПИМ-ДВ-1, позволяющий определять механические характеристики материалов по диаграмме вдавливания.

8. Индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм по ГОСТ 577 [36].

9. Домкрат.

3.2.4. Образцы для испытаний

Испытания выполняют на призматических образцах, изготовленных из фрагментов труб, которые были использованы при сооружении МГ Бованенково – Ухта. Размеры образ-

цов должны обеспечить возможность проведения измерений значений коэрцитивной силы в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (вдоль и поперек продольной оси образца), а также возможность создания в контрольных сечениях образцов изгибных напряжений, равных пределу текучести материала. При изготовлении образцов их необходимая толщина должна обеспечиваться за счет удаления металла, как с наружной, так и с внутренней поверхностей фрагмента трубы. При этом с наружной поверхности фрагмента трубы следует удалять минимальный слой металла, позволяющий устранить имеющуюся кривизну.

3.2.5. Подготовка к испытаниям

1. Выполняют разметку исследуемых поверхностей образцов (рисунок 3.3), осуществляют их неразрушающий диагностический контроль (измерение фактических геометрических размеров, поверхностной твердости, значений основных механических характеристик) и измерение исходных значений коэрцитивной силы. Измерение исходных значений коэрцитивной силы выполняют многократно для оценки воспроизводимости получаемых результатов и определения статистических показателей точности измерений.



А – Д – сечения контроля по длине образца; 1 – 5 – сечения контроля по ширине образца;
T1 – T25 – точки контроля параметров образца; ℓ – рабочая длина образца;
b – ширина образца

Рисунок 3.3 – Схема разметки исследуемых поверхностей образца

61

2. Разметка исследуемых поверхностей образцов не должна стираться в процессе проводимых испытаний и не должна мешать проведению диагностического контроля.

3. Длину образца ℓ измеряют металлической линейкой в трех сечениях контроля (А, В, Д на рисунке 3.3). За расчетную длину образца принимают среднее из полученных значений.

4. Ширину образца b измеряют штангенциркулем в пяти сечениях контроля (1 – 5 на рисунке 3.3). За расчетную длину образца принимают среднее из полученных значений.

5. Толщину образца измеряют штангенциркулем и ультразвуковым толщиномером. Штангенциркулем измеряют толщину стенки по периметру образца (точки контроля T1 – T5, T11, T15, T21 – T25 на рисунке 3.4). Ультразвуковым толщиномером измеряют значения толщины образца в его средней части (точки контроля T12 – T14 на рисунке 3.4).





6. Твердость измеряют на обеих исследуемых поверхностях образца ультразвуковым твердомером. Измерения выполняют в контрольных точках, расположенных на пересечении продольных сечений Б, В, Г и поперечных сечений 1 – 5 (рисунок 3.5). В каждой точке контроля должно быть выполнено не менее пяти измерений и определены максимальное, минимальное и среднее значение твердости.

7. Механические характеристики материала образца (предел прочности, условный предел текучести, относительное удлинение, твердость по Бринеллю) определяют неразру-

шающим методом контроля прибором ПИМ-ДВ-1. Измерения выполняют на концевых участках образца (рисунок 3.6), на его обеих исследуемых поверхностях.

8. Исходные (начальные) значения коэрцитивной силы измеряют в трех контрольных сечениях (сечения 2, 3, 4) на обеих исследуемых поверхностях образцов. Измерения в каждом контрольном сечении выполняют во взаимно перпендикулярных плоскостях, последовательно поворачивая датчик прибора относительно вертикальной оси на 90°.



А – Д – сечения контроля по длине образца; 1 – 5 – сечения контроля по ширине образца;
Т6 – Т20 – точки контроля поверхностной твердости образца; ℓ – рабочая длина образца;
b – ширина образца

Рисунок 3.5 – Схема положения точек контроля

для измерения поверхностной твердости образца



А – Д – сечения контроля по длине образца; 1 – 5 – сечения контроля по ширине образца;
Т1 – Т4 – точки контроля механических характеристик прибором ПИМ-ДВ-1; ℓ – рабочая длина образца; b – ширина образца

Рисунок 3.6 – Схема положения точек контроля

для определения механических характеристик материала образца

По результатам измерений для каждого сечения контроля рассчитывают АКС по формуле:

$$\Delta H_c = (H_{c1}^{\perp} + H_{c2}^{\perp})/2 - (H_{c1}^{II} + H_{c2}^{II})/2, \qquad (3.11)$$

где $H_{c(1)}^{II}, H_{c(2)}^{II}$ – значения коэрцитивной силы, измеренные в контрольном сечении образца, расположив продольную ось датчика прибора вдоль продольной оси образца и затем повернув датчик прибора относительно вертикальной оси образца на 180°, А/см; $H_{c(1)}^{\perp}, H_{c(2)}^{\perp}$ – значения коэрцитивной силы, измеренные в контрольном сечении образца, расположив продольную ось датчика прибора перпендикулярно продольной оси образца и затем повернув датчик прибора относительно вертикальной оси образца, расположив продольную ось датчика прибора перпендикулярно продольной оси образца и затем повернув датчик прибора относительно вертикальной оси образца на 180°, А/см.

9. Осуществляют сборку стенда для создания в образцах изгибных напряжений (рисунок 3.7), а именно:

- закрепляют испытываемый образец 3 на опоре 2;

 – на основание 1 стенда устанавливают домкрат 5, обеспечив горизонтальность положения испытываемого образца;

 – монтируют индикатор часового типа 6 для регистрации деформаций конца образца в процессе его нагружения.



1 – основание стенда; 2 – опора; 3 – испытываемый образец; 4 – крепеж;
5 – устройство для нагружения образца (домкрат); 6 – индикатор часового типа;
l – расчетная длина образца

Рисунок 3.7 – Схема стенда для деформирования образца изгибающей нагрузкой

10. Рассчитывают значение нагрузки Р (Н), прикладываемой к свободному концу испытываемого образца, при которой в месте закрепления образца изгибные напряжения достигнут предела текучести материала:

$$P = \frac{bh^2 \sigma_m}{6\ell} \,, \tag{3.12}$$

где b – ширина образца, мм; h – толщина образца, мм; σт – предел текучести материала образца, МПа; *ℓ* – расчетная длина образца, мм.

11. Рассчитывают деформацию f_т (мм) свободного конца испытываемого образца, при которой в месте закрепления образца изгибные напряжения достигнут предела текучести материала:

$$f_m = \frac{2\sigma_m \ell^2}{3Eh},\tag{3.13}$$

где Е – модуль упругости материала образца, МПа.

12. Определяют шаг Δf (мм) деформирования образца при испытании из условия, что шаг должен составлять 1 – 5 мм (1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0), при этом для достижения расчетной деформации ft следует выполнять не менее пяти нагружений (рекомендуется число нагружений принимать равным 10 – 15).

13. Значения изгибных напряжений по длине образца ℓ при заданной деформации f свободного конца испытываемого образца вычисляют по формуле:

$$\sigma = 1.5 \frac{\mathrm{Ehf}}{\ell^2} \left(\frac{x}{\ell} \right), \tag{3.14}$$

где x – расстояние от свободного конца испытываемого образца до рассматриваемого контрольного сечения, мм.

3.2.6. Проведение испытаний

Осуществляют деформирование испытываемого образца изгибающей нагрузкой до тех пор, пока деформация свободного конца, контролируемая по индикатору часового типа, не достигнет расчетного значения f. Шаг деформирования составляет Δf. На каждом шаге нагружения образца, не снимая приложенной статической нагрузки, в трех контрольных сечениях (сечения 2, 3, 4 на рисунке 3.3) производят измерение значений коэрцитивной силы.

При наличии технической возможности измерения выполняют на обеих рабочих поверхностях образца. После достижения максимальной нагрузки производят ступенчатое уменьшение нагрузки и измерение значений коэрцитивной силы.

После реализации всех шагов нагружения образца производят его переустановку на стенде. При этом нижнюю рабочую поверхность образца делают верхней, а верхнюю – нижней. После переустановки образца повторяют весь процесс его деформирования и проводимых измерений.

Выполнив весь комплекс упругого нагружения образцов, создают в образце пластические деформации и выполняют измерения коэрцитивной силы под нагрузкой и после ее снятия.

3.2.7. Обработка результатов испытаний

Для каждого контрольного сечения на всех этапах деформирования образца по формуле (3.3) рассчитывают значение АКС ΔH_c.

Результаты проведенных испытаний представляют в виде графиков. По оси абсцисс откладывают значения механических напряжений, а по оси ординат – значения коэрцитивной силы или АКС.

Аппроксимируя экспериментальные данные методом наименьших квадратов, может быть найдена функциональная зависимость между значениями напряжений и коэрцитивной силой или анизотропией материала. Сопоставляя экспериментальные и расчетные данные, определяют достоверность полученной зависимости и делают вывод о возможности ее практического использования. Целесообразно уравнение линейной функции, связывающей АКС материала со значением действующих напряжений, представлять в следующем виде:

$$\Delta H_c(\sigma) = k\sigma + \Delta H_c^0 \tag{3.15}$$

где k – критерий кристаллической (доменной) структуры; ∆H⁰_c – начальная АКС (в ненагруженном состоянии), А/см.

3.3. Характеристики образцов

3.3.1. Геометрические размеры

Образцы для испытаний были изготовлены из фрагментов труб, которые были использованы при сооружении МГ Бованенково – Ухта, а именно:

– фрагмент № 1 был вырезан из трубы класса прочности К60 наружным диаметром 1420 мм с номинальной толщиной стенки 26,4 мм, изготовленной на Выксунском металлургическом заводе по ТУ 1390-017-05757848-2005;

– фрагмент № 2 был вырезан из трубы класса прочности К65 наружным диаметром 1420 мм с номинальной толщиной стенки 27,7 мм, изготовленной на Ижорском трубном заводе по ТУ 1381-011-47966425-2008.

Из каждого фрагмента было изготовлено по одному призматическому образцу, имеющему следующие номинальные размеры: длина 300 мм, длина рабочей части 270 мм, ширина 80 мм, толщина 10 мм (рисунок 3.8). Образцы изготавливали таким образом, чтобы их продольная ось была параллельна продольной оси трубы (трубного фрагмента). Для оценки влияния чистоты обработки контролируемой поверхности на результаты контроля и испытаний одна из поверхностей каждого образца была подвергнута шлифованию, а другая – чистовому фрезерованию.



Рисунок 3.8 – Образец для испытаний

Необходимую толщину образцов при их изготовлении обеспечивали удалением металла, как с наружной, так и с внутренней поверхностей фрагмента трубы. При этом с наружной поверхности фрагмента трубы удаляли минимальный слой металла, позволяющий устранить имеющуюся кривизну (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Схема расположения образца в поперечном сечении трубного фрагмента

После освидетельствования и испытания подготовленных образцов было выполнено их фрезерование со стороны фрезерованной рабочей поверхности до толщины, равной 5 мм, диагностический контроль (измерение толщины, поверхностной твердости новой рабочей поверхности, определение значений механических характеристик, коэрцитивной силы) образцов и их испытания. Общий вид образцов показан на рисунке 3.10.



TETT	T# T12	78	79	THE
		748	114	Tra
716	11+	1.14	TT	-
T21	T22	723	724	7251

б

а – до разметки рабочих поверхностей; б – после разметки рабочих поверхностей Рисунок 3.10 – Общий вид образца

Длину образцов измеряли в трех сечениях контроля (А, В, Д на рисунке 3.11). Для измерения использовали металлическую линейку с ценой деления 1 мм.

Ширину образца измеряли в пяти сечениях контроля (1 – 5 на рисунке 3.11). Для измерения использовали штангенциркуль ШЦ-I-150-0,1 ГОСТ 166. Результаты измерения длины и ширины образцов сведены в таблицу 3.4.



А – Д – сечения контроля по длине образца; 1 – 5 – сечения контроля по ширине образца;
Т1 – Т25 – точки контроля параметров образца; L – длина образца; ℓ – рабочая длина образца;
ца; b – ширина образца

Рисунок 3.11 – Схема фактической разметки испытываемых образцов

Номер образца	Материал	Ширина b, мм	Длина L, мм	Рабочая длина ℓ , мм
1	2	3	4	5
		80,3		
		80,3	300	271
1	Сталь К60	80,2	299	270
		80,3	299	270
		80,2		
		80,1		
		80,2	299	270
2	Сталь К65	80,2	299	270
		80,1	299	271
		80,0		
		80,2		
		80,3	299	271
3	Сталь К60	80,3	299	270
		80,3	299	270
		80,2		

1	2	3	4	5			
		79,8					
		79,8	299	270			
4	Сталь К65	79,8	299	271			
		80,0	299	270			
		80,0					
Примечание – Образцы № 3 и 4 изготовлены, соответственно, из образцов № 1 и 2 после проведения							
их испытаний.							

Толщину образца измеряли в 15 точках контроля (T1 – T5, T11 – T15, T21 – T25 на рисунке 3.11). В контрольных точках T1 – T5 и T21 – T25 измерения выполняли штангенциркулем ШЦ-I-150-0,1 ГОСТ 166. В контрольных точках T11 – T15 измерения выполняли ультразвуковым толщиномером УТ-111.

Результаты измерения толщины образцов сведены в таблицу 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты измерения толщины образцов

Точка контроля на рисунке 3.9	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4				
Измерения штангенциркулем								
T1	10,20	10,20	4,90	5,10				
T2	10,10	10,20	4,90	5,00				
Т3	10,10	10,20	4,90	5,00				
T4	10,20	10,20	4,90	5,20				
T5	10,10	10,20	4,90	5,00				
T21	10,20	10,20	4,90	5,00				
T22	10,10	10,20	4,90	5,00				
T23	10,10	10,20	5,00	5,00				
T24	10,10	10,20	5,00	5,00				
T25	10,20	10,20	4,90	5,00				
	Измерения у	льтразвуковым тол	пциномером					
T11	10,15	10,14	4,94	5,04				
T12	10,14	10,17	4,94	5,07				
T13	10,14	10,18	4,90	5,07				
T14	10,11	10,17	4,88	5,07				
T15	10,09	10,14	4,87	5,01				
Минимальное значение	10,09	10,14	4,87	5,00				

Продолжение таблицы 3.5

Максимальное значение	10,20	10,20	5,00	5,20
Среднее значение	10,14	10,19	4,92	5,04

3.3.2. Характеристики механических свойств

Твердость поверхностей образца измеряли в 15 точках контроля (T6 – T20 на рисунке 3.11). Измерения выполняли ультразвуковым твердомером УЗИТ-2М.

Результаты измерения поверхностной твердости образцов сведены в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты измерения поверхностной твердости образцов

Точка контроля на рисунке 3.9	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4						
1	2	3	4	5						
	Шлифованная поверхность									
	196	214	188	283						
	191	180	199	293						
Т6	199	195	179	291						
	201	233	172	296						
	191	180	174	297						
	207	217	183	190						
	221	242	169	194						
Τ7	216	221	155	167						
	208	209	268	171						
	213	189	283	177						
	216	229	265	204						
	195	220	246	191						
Т8	195	210	205	171						
	198	189	168	229						
	208	231	182	195						
	190	204	174	198						
	207	240	189	204						
Т9	184	218	202	186						
	198	221	185	206						
	204	233	191	223						
	193	226	275	198						
	204	208	124	194						
T10	207	226	191	216						
	201	231	183	190						
	181	199	171	191						
	225	261	236	212						
	201	216	234	213						
T11	204	215	223	197						
	194	204	239	193						
	200	198	185	244						
1	2	3	4	5						
-------------------------	---------	------------	-----	-----						
	194	207	120	210						
	209	226	182	213						
T12	205	220	216	184						
	198	213	203	193						
	196	237	207	222						
	223	237	182	195						
	224	218	181	208						
T13	220	234	157	206						
	204	219	163	241						
	195	213	157	195						
	219	227	167	182						
	201	229	186	223						
T14	229	225	177	165						
111	225	209	211	161						
	220	238	205	101						
	198	230	191	210						
	201	223	202	210						
Т15	201	237	202	101						
115	211 200	220	217	171						
	100	233	221	215						
	200	208	101	213						
	200	208	191	278						
Т16	201	197	103	260						
110	200	222	100	203						
	198	21/ 192	202	215						
	197	210	201	243						
	199	219	232	191						
T17	209	208	243	105						
11/	209	223	1/3	159						
	190	210	250	18/						
	212	224	100	1/3						
	1/1	219	236	209						
T10	195	225	186	235						
118	185	236	215	182						
	1/9	238	150	108						
	18/	230	108	1/3						
	191	238	184	188						
T10	193	225	1//	201						
119	183	224	158	216						
	188	221	150	207						
	194	231	1/1	221						
	158	196	159	206						
T2 0	201	211	1/6	220						
120	193	207	159	195						
	1/8	179	253	219						
	191	206	246	199						
Минимальное значение	158	179	120	159						

Продолжение таблицы 3.6

1	2	3	4	5
Максимальное значение	229	261	283	297
Среднее значение	200	218	195	209
	Фрез	верованная поверхн	юсть	
	201	275	224	141
	237	211	194	166
Т6	261	218	181	265
	251	268	207	192
	239	230	194	267
	253	252	176	201
	262	246	209	176
Τ7	250	230	212	144
	190	240	198	162
	223	244	122	224
	236	262	256	276
	222	277	145	188
Т8	222	272	155	209
	251	241	111	219
	189	198	108	219
	236	272	151	210
	191	256	188	229
19	198	268	198	211
	184	251	184	186
	214	266	133	231
	222	217	153	197
	157	251	157	200
T10	252	244	157	201
	195	225	247	218
	196	237	167	261
	279	244	173	182
	190	180	193	184
T11	246	228	170	196
	240	186	181	234
	224	215	157	184
	230	224	185	188
T 12	193	243	181	279
T12	233	231	139	183
	263	244	167	291
	243	225	180	200
	295	217	184	194
T12	280	176	132	207
113	212	249	116	229
	245	195	148	285
	247	221	163	200

1	2	3	4	5
	207	205	206	246
	202	157	173	198
T14	217	213	206	280
	202	182	188	200
	199	210	200	204
	238	244	178	226
	246	210	170	205
T15	268	171	181	232
	236	215	198	178
	283	170	202	249
	258	170	260	264
	180	210	274	262
T16	237	222	261	164
	196	203	268	252
	242	156	176	250
	226	196	259	206
	236	230	250	267
T17	242	236	254	177
	229	249	257	185
	197	195	160	214
	212	171	146	219
	177	192	130	214
T18	211	186	189	297
	232	206	118	217
	196	190	117	212
	181	266	180	202
	200	243	166	174
T19	185	255	123	110
	208	247	171	125
	226	278	167	260
	207	226	110	209
	196	250	129	264
T20	233	212	130	262
	228	232	164	205
	250	257	171	160
Минимальное значение	157	156	108	110
Максимальное значение	295	278	274	297
Среднее значение	224	225	179	214

Данные таблицы 3.6 показывают, что разброс значений поверхностной твердости весьма значительный. При этом такая тенденция присуща как для шлифованной, так и для фрезерованной поверхности, хотя на шлифованной поверхности разброс значений твердости несколько меньше. В частности разброс значений твердости на шлифованной поверхности составил 71 – 163 HB, а на фрезерованной поверхности – 122 – 187 HB при средних значения х твердости у образцов от 179 до 225 HB. Наименьшие средние значения твердости присущи образцу № 3, а наибольшие – образцу № 2. Следует отметить, что отличие средних значений твердости на шлифованной и фрезерованной поверхностях образцов составило от 2,3 до 12,0 %. При этом, за исключением образца № 3, средние значения твердости выше у фрезерованных поверхностей. Разброс значений поверхностной твердости обусловлен тем обстоятельством, что при измерении ультразвуковыми твердомерами контролируется не макротвердость определенной поверхности материала, а твердость его отдельных структурных составляющих поверхностного слоя.

Механические характеристики материала образцов (предел прочности, условный предел текучести, относительное удлинение, твердость по Бринеллю) определяли прибором ПИМ-ДВ-1. Измерения выполняли на концевых участках образцов (рисунок 3.12), на их обеих исследуемых поверхностях.



А – Д – сечения контроля по длине образца; 1 – 5 – сечения контроля по ширине образца; T1 – T4 – точки контроля механических характеристик прибором ПИМ-ДВ-1;

L – длина образца; ℓ – рабочая длина образца; b – ширина образца

Рисунок 3.12 - Схема положения точек контроля

при определении механических характеристик материала образца

Результаты неразрушающего определения механических характеристик материала образцов сведены в таблицу 3.7, а обобщение полученных результатов представлено в виде диаграмм на рисунках 3.13 и 3.14.

Полученные данные показывают, что наиболее значительное изменение механических характеристик наблюдается у образца № 2.

В частности, временное сопротивление изменяется от 648 до 810 МПа (среднее значение 732 МПа), предел текучести – от 455 до 614 МПа (среднее значение 538 МПа), а твердость от 199 до 240 НВ (среднее значение 221 НВ).

Номер образца	Номер точки контроля на рисунке 3.10	σв, М∏а	σт, МПа	δ5, %	HB
1	2	3	4	5	6
		Шлифованная	я поверхность	• 	
	T1	698	504	19	212
	T2	711	516	19	215
	Т3	630	437	21	195
	T4	687	492	20	209
1	Минимальное значение	630	437	19	195
	Максимальное значение	711	516	21	215
	Среднее значение	682	487	20	208
	T1	648	455	21	199
	T2	680	487	20	207
	Т3	792	596	17	235
	T4	703	509	19	213
2	Минимальное значение	648	455	17	199
	Максимальное значение	792	596	21	235
	Среднее значение	706	512	19	214

Таблица 3.7 – Механические характеристики материала образцов

1	2	3	4	5	6
	T1	719	524	19	217
	T2	725	530	19	218
	Т3	674	480	20	206
	T4	691	496	19	210
3	Минимальное значение	674	480	19	206
	Максимальное значение	725	530	20	218
	Среднее значение	702	508	19	213
	T1	801	605	17	238
	Τ2	814	618	17	241
	Т3	803	607	17	238
	T4	795	599	17	236
4	Минимальное значение	795	599	17	236
	Максимальное значение	814	618	17	241
	Среднее значение	803	607	17	238
		Фрезерованна	я поверхность		
	T1	673	480	20	205
	T2	657	464	20	202
	Т3	647	454	21	199
	T4	655	461	20	201
1	Минимальное значение	647	454	20	199
	Максимальное значение	673	480	21	205
	Среднее значение	658	465	20	202
	T1	743	549	18	223
	T2	693	498	19	210
	Т3	810	614	17	240
	T4	785	589	17	234
2	Минимальное значение	693	498	17	210
	Максимальное значение	810	614	19	240
	Среднее значение	758	563	18	227

1	2	3	4	5	6
	T1	664	471	20	203
	T2	666	472	20	204
	Т3	673	480	20	205
	T4	665	472	20	203
3	Минимальное значение	664	471	20	203
	Максимальное значение	673	480	20	205
	Среднее значение	667	474	20	204
	T1	742	547	18	223
	T2	740	544	18	222
	Т3	747	552	18	224
	T4	775	580	18	231
4	Минимальное значение	740	544	18	222
	Максимальное значение	775	580	18	231
	Среднее значение	751	556	18	225

У других образцов значения механических характеристик более стабильны, а именно: – у образца № 1 временное сопротивление изменяется от 630 до 711 МПа (среднее значение 670 МПа), предел текучести – от 437 до 516 МПа (среднее значение 476 МПа), а твердость от 195 до 215 НВ (среднее значение 205 НВ);

– у образца № 3 временное сопротивление изменяется от 664 до 725 МПа (среднее значение 685 МПа), предел текучести – от 471 до 530 МПа (среднее значение 491 МПа), а твердость от 203 до 218 НВ (среднее значение 209 НВ);

– у образца № 4 временное сопротивление изменяется от 740 до 814 МПа (среднее значение 777 МПа), предел текучести – от 544 до 618 МПа (среднее значение 582 МПа), а твердость от 222 до 241 НВ (среднее значение 232 НВ).

Следует отметить, что у образцов № 1, 3 и 4 значения механических характеристик выше при проведении измерений на шлифованных поверхностях, а у образца № 2 – при проведении измерений на фрезерованной поверхности.

3.3.3. Результаты измерения исходных значений коэрцитивной силы

Исходные (начальные) значения коэрцитивной силы измеряли на фрагментах темплетов труб МГ Бованенково – Ухта, оставшихся после изготовления исследуемых образцов, а также на самих образцах. Темплет № 1 был вырезан из трубы класса прочности К60 наружным диаметром 1420 мм с номинальной толщиной стенки 26,4 мм, изготовленной на Выксунском металлургическом заводе по ТУ 1390-017-05757848-2005.



1 – минимальное значение; 2 – максимальное значение; 3 – среднее значение;

Ш – шлифованная поверхность; Ф – фрезерованная поверхность
 Рисунок 3.13 – Средние значения временного сопротивления (а – г) и предела текучести (д – и) материала (МПа) образцов № 1 (а, д), № 2 (б, е), № 3 (в, ж), № 4 (г, и)



1 – минимальное значение; 2 – максимальное значение; 3 – среднее значение;
 Ш – шлифованная поверхность; Ф – фрезерованная поверхность
 Рисунок 3.14 – Средние значения поверхностной твердости (НВ) образцов № 1 (а),

№ 2 (б), № 3 (в), № 4 (г)

Темплет № 2 был вырезан из трубы класса прочности К65 наружным диаметром 1420 мм с номинальной толщиной стенки 27,7 мм, изготовленной на Ижорском трубном заводе по ТУ 1381-011-47966425-2008.

Исходные значения коэрцитивной силы темплетов труб измеряли на их наружной поверхности, в средней части оставшихся фрагментов. Коэрцитивную силу измеряли в четырех направлениях:

1) вдоль продольной оси темплета $H_{c(1)}^{II}$;

2) поперек продольной оси темплета $H_{c(1)}^{\perp}$;

3) вдоль продольной оси темплета с разворотом датчика на 180° относительно положения (1) $H^{II}_{c(2)}$;

4) поперек продольной оси темплета с разворотом датчика на 180° относительно положения (2) $H_{c(2)}^{\perp}$.

Измерения выполняли прибором КРМ-Ц-К2М. АКС по результатам каждой серии из четырех измерений рассчитывали по формуле (3.11). Для определения статистических пока-

зателей точности измерений (среднее значение коэрцитивной силы и ее среднеквадратическое отклонение), а также влияния процесса намагничивания-размагничивания на результаты измерений, в каждом направлении выполняли от 5 до 10 измерений, при этом опыт дублировали 3 – 5 раз. Исходные (начальные) значения коэрцитивной силы образцов измеряли в трех контрольных сечениях (сечения 2, 3, 4 на рисунке 3.11) на обеих исследуемых поверхностях (шлифованная, фрезерованная). В каждом контрольном сечении осуществляли измерения в четырех направлениях, указанных выше.

Результаты измерений коэрцитивной силы на темплетах показаны в графическом виде на рисунках 3.15 и 3.16, а обобщение этих данных – в таблицах 3.8 и 3.9. Результаты измерений на образцах показаны в графическом виде на рисунках 3.17 – 3.19, а обобщение этих данных – в таблицах 3.10 и 3.11. Полученные данные показали следующее.

На исследованных темплетах металла значения коэрцитивной силы, полученные при продольной и поперечной ориентации датчика прибора, практически не отличаются. АКС составила от минус 0,10 до 0,13 А/см у темплета \mathbb{N} 1 и от минус 0,025 до 0,070 А/см у темплета \mathbb{N} 2. При этом средние значения коэрцитивной силы равны 3,45 А/см для темплета \mathbb{N} 1 из стали К60 и 5,23 А/см для темплета \mathbb{N} 2 из стали К65. При различных реализуемых схемах измерения коэрцитивной силы на темплетах, а также вследствие их циклического намагничивания – размагничивания в процессе многократных измерений, изменение получаемых результатов не превышает 5 %.

На исследованных образцах значения коэрцитивной силы, полученные при продольной и поперечной ориентации датчика прибора, отличаются значительно. АКС составила от 1,23 до 1,52 А/см у образца № 1; от 1,18 до 1,29 А/см у образца № 2; от 3,91 до 4,10 А/см у образца № 3; от 3,37 до 3,62 А/см у образца № 4. Анизотропность магнитных свойств в продольном и поперечном направлениях образца обусловлена структурными изменениями металла в процессе его механической обработки при изготовлении образцов. Следует отметить, что значения коэрцитивной силы на фрезерованных поверхностях образцов № 1, 2 и 3 до 4,7 % выше, чем значения коэрцитивной силы на шлифованных поверхностях этих же образцов, а именно: у образца № 1 на 1,8 – 4,7 %; у образца № 2 на 1,9 – 2,6 %; у образца № 3 до 0,2 %. У образца № 4 на 0,2 – 1,3 % выше значения коэрцитивной силы на шлифованной силы на шлифованной поверхности. Кроме того, произошло увеличение значений коэрцитивной силы, которые были зарегистрированы на темплетах металла до их механической обработки. При этом значения коэрцитивной силы H_c^H и H_c^{\perp} соответственно равны 6,22 и 7,67 А/см для образца № 1; 8,30 и 9,55 А/см для образца № 2; 7,11 и 11,17 А/см для образца № 3; 8,94 и 12,38 А/см

для образца № 4. При различных реализуемых схемах измерения коэрцитивной силы на образцах, а также вследствие их циклического намагничивания – размагничивания в процессе многократных измерений, изменение получаемых результатов так же, как и на темплетах, не превышает 5 %.



а, б – опыт № 1; в, г – опыт № 2; д, е – опыт № 3; а, в, д – темплет № 1; б, г, е – темплет № 2; 1 – $H_{c(1)}^{II}$; 2 – $H_{c(2)}^{II}$; 3 – $H_{c(1)}^{\perp}$; 4 – $H_{c(2)}^{\perp}$

Рисунок 3.15 – Результаты измерения коэрцитивной силы (А/см) на темплетах



а, б, д – темплет № 1; в, г, е – темплет № 2; а – г – результаты измерений в каждом опыте; д, е – средние значения измерений в опыте;

 $1-\mathsf{H}_{\mathsf{c}}^{\text{II}}\,;\,2-\mathsf{H}_{\mathsf{c}}^{\perp}\,;\,3-\Delta\mathsf{H}_{\mathsf{c}}$

Рисунок 3.16 – Результаты серий измерений коэрцитивной силы (А/см) на темплетах

Номер темплета	Номер опыта	Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	Среднеквад- ратическое отклонение
		Н ^{II} _{c(1)} , А/см	3,30	3,43	3,34	0,0385
		Н ^{II} _{c(2)} , А/см	3,64	3,72	3,66	0,0241
	1	$H_{c(1)}^{\perp}$, A/cm	3,48	3,61	3,51	0,0398
		$H_{c(2)}^{\perp}$, A/cm	3,48	3,56	3,50	0,0230
		ΔH _c , А/см	0	0,015	0,008	0,0049
		$H_{c(1)}^{II}$, A/cm	3,40	3,44	3,42	0,0157
		Н ^{II} _{c(2)} , А/см	3,59	3,66	3,61	0,0189
1	2	$H_{c(1)}^{\perp}$, A/cm	3,52	3,59	3,53	0,0211
		$H_{c(2)}^{\perp}$, A/cm	3,50	3,56	3,52	0,0165
		ΔH _c , А/см	- 0,005	0,035	0,011	0,0123
		$H_{c(1)}^{II}$, A/cm	3,36	3,39	3,38	0,0097
		Н ^{II} _{c(2)} , А/см	3,45	3,48	3,46	0,0097
	3	$H_{c(1)}^{\perp}$, A/cm	3,27	3,37	3,29	0,0302
		$H_{c(2)}^{\perp},\mathrm{A/cm}$	3,35	3,39	3,36	0,0123
		ΔН _с , А/см	- 0,105	- 0,055	- 0,089	0,0147
		$H_{c(1)}^{II}$, A/cm	5,23	5,45	5,28	0,0652
		$H^{II}_{c(2)}$, A/cm	5,35	5,39	5,36	0,0126
	1	$H_{c(1)}^{\perp}$, A/cm	5,30	5,44	5,35	0,0412
		$H_{c(2)}^{\perp}$, A/cm	5,32	5,35	5,33	0,0092
		ΔНс, А/см	- 0,025	0,040	0,020	0,0191
		$H_{c(1)}^{II}$, A/cm	5,12	5,16	5,14	0,0099
		Н ^{II} _{c(2)} , А/см	5,22	5,29	5,24	0,0196
2	2	$H_{c(1)}^{\perp},A/cm$	5,22	5,28	5,23	0,0189
		$H_{c(2)}^{\perp}$, A/cm	5,21	5,24	5,21	0,0097
		ΔH _c , А/см	0,030	0,050	0,037	0,0063
		$H^{II}_{c(1)}, A/cM$	5,01	5,04	5,02	0,0097
		$H^{II}_{c(2)}$, A/cm	5,04	5,11	5,06	0,0189
	3	$H_{c(1)}^{\perp}$, A/cm	5,00	5,03	5,02	0,0099
		$H_{c(2)}^{\perp}$, A/cm	5,00	5,08	5,05	0,0225
		$\Delta H_c, A/cM$	- 0,025	0,015	- 0,007	0,0134

Таблица 3.8 – Обобщенные результаты измерения коэрцитивной силы на темплетах

Номер темплета	Параметр	Номер опыта	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	Среднеквад- ратическое отклонение
		1	3,29	3,32	3.31	0,0105
		2	3.32	3.34	3.33	0.0094
		3	3,38	3,40	3,39	0,0067
		4	3,39	3,42	3,40	0,0092
		5	3,39	3,43	3,41	0,0137
	H_c^{n} , A/CM	6	3,42	3,46	3,44	0,0106
		7	3,43	3,45	3,44	0,0082
		8	3,43	3,44	3,44	0,0052
		9	3,43	3,44	3,44	0,0032
		10	3,42	3,46	3,44	0,0110
1		1	3,43	3,47	3,44	0,0132
		2	3,43	3,46	3,45	0,0084
		3	3,47	3,54	3,49	0,0233
		4	3,47	3,51	3,48	0,0120
		5	3,47	3,54	3,48	0,0222
	Π_{c} , A/CM	6	3,48	3,50	3,49	0,0067
		7	3,48	3,51	3,49	0,0114
		8	3,48	3,55	3,50	0,0237
		9	3,48	3,55	3,49	0,0227
		10	3,47	3,54	3,49	0,0221
	∆H _c , А/см	1 – 10	0,03	0,13	0,07	0,0327
		1	5,23	5,25	5,24	0,0071
		2	5,21	5,23	5,22	0,0063
		3	5,22	5,26	5,24	0,0134
		4	5,21	5,25	5,23	0,0108
		5	5,22	5,25	5,23	0,0097
	$\Pi_c, A/CM$	6	5,23	5,27	5,25	0,0106
		7	5,23	5,26	5,24	0,0084
		8	5,20	5,22	5,21	0,0070
		9	5,23	5,28	5,25	0,0156
		10	5,23	5,26	5,24	0,0088
2		1	5,21	5,26	5,24	0,0160
		2	5,24	5,30	5,26	0,0179
		3	5,26	5,30	5,27	0,0141
		4	5,28	5,31	5,29	0,0099
	$H^{\perp} = A/cM$	5	5,26	5,29	5,28	0,0084
		6	5,26	5,28	5,27	0,0070
		7	5,28	5,32	5,29	0,0125
		8	5,26	5,32	5,28	0,0170
		9	5,28	5,32	5,29	0,0107
		10	5,29	5,31	5,30	0,0057
	ΔH_c , A/см	1 - 10	0	0,07	0,04	0,0209

Таблица 3.9 – Обобщенные результаты серий измерений коэрцитивной силы на темплетах



а – шлифованная поверхность; б – фрезерованная поверхность;

$$1 - H_{c(1)}^{II}; 2 - H_{c(2)}^{II}; 3 - H_{c(1)}^{\perp}; 4 - H_{c(2)}^{\perp}$$

Рисунок 3.17 – Пример характерных результатов измерения коэрцитивной силы (А/см) на образцах



а, б – образец № 1; в, г – образец № 2; а, в – шлифованная поверхность;
 б, г – фрезерованная поверхность

Рисунок 3.18 – Обобщенные результаты измерений коэрцитивной силы (А/см) на образцах № 1 и 2



а, б – образец № 1; в, г – образец № 2; а, в – шлифованная поверхность;

б, г – фрезерованная поверхность

Рисунок 3.19 – Обобщенные результаты измерений коэрцитивной силы (А/см)

на образцах № 3 и 4

	~ ~			U	~
$120\pi M H = 10 - 0$	попшенные r	езупьтяты і	измепеция коэ	пнитивнои с	YRILL HA ODDATHAY
1 иолици 5.10 О	UUUUUUUUUUUUU	Jos y Jid Lui di P	тэмерений коэ	рцитивной с	плы па образцал
	· ·	2	1		

Номер образца	Номер опыта, поверх- ность контро- ля	Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	Среднеквад- ратическое отклонение
1	2	3	4	5	6	7
		H ^{II} _c , А/см	6,14	6,20	6,15	0,0150
	1,Ш	$H_{c}^{\!\!\perp}$, A/c_{M}	7,49	7,61	7,53	0,0261
1		ΔH _c , А/см	1,37	1,39	1,38	0,0060
1		H ^{II} _c , А/см	6,32	6,49	6,38	0,0489
	1, Φ	$H_{c}^{\!\!\perp}$, A/c_{M}	7,65	7,86	7,75	0,0861
		ΔH _c , А/см	1,33	1,39	1,37	0,0190

1	2	3	4	5	6	7
		Н ^{II} , А/см	6,08	6,18	6,13	0,0276
2, Ш	2, III	Н _с [⊥] , А/см	7,52	7,73	7,62	0,0664
		ΔH _c , А/см	1,47	1,52	1,48	0,0189
		Н ^{II} _c , А/см	6,28	6,39	6,33	0,0335
	2, Φ	H_{c}^{\perp} , А/см	7,74	7,92	7,84	0,0521
1		ΔH _c , А/см	1,45	1,57	1,52	0,0402
1		Н ^{II} _c , А/см	6,03	6,15	6,08	0,0440
	3, Ш	H_{c}^{\perp} , А/см	7,45	7,62	7,53	0,0684
		ΔH _c , А/см	1,43	1,47	1,45	0,0171
		H ^{II} _c , А/см	6,22	6,32	6,25	0,0368
	3, Ф	H_{c}^{\perp} , А/см	7,66	7,77	7,72	0,0431
		ΔН _с , А/см	1,45	1,49	1,47	0,0139
		H_c^{II} , А/см	8,15	8,34	8,22	0,0508
	1,Ш	H_{c}^{\perp} , А/см	9,41	9,56	9,46	0,0406
		ΔНс, А/см	1,23	1,26	1,24	0,0091
		H_c^{II} , A/cm	8,34	8,48	8,41	0,0395
	1, Φ	H_{c}^{\perp} , А/см	9,65	9,74	9,70	0,0326
		ΔH_c , А/см	1,25	1,32	1,29	0,0199
		H_c^{II} , A/cm	8,19	8,25	8,22	0,0169
	2, Ш	$H_{c}^{\scriptscriptstyle \perp}$, А/см	9,42	9,55	9,48	0,0377
2		ΔH _c , А/см	1,22	1,30	1,26	0,0245
2		Н ^{II} _c , А/см	8,43	8,51	8,47	0,0256
	2, Φ	$H_{c}^{\!\!\perp}$, А/см	9,63	9,76	9,72	0,0327
		ΔH _c , А/см	1,19	1,30	1,26	0,0342
		H_c^{II} , A/cm	8,05	8,16	8,12	0,0326
	3, Ш	$H_{c}^{\!\!\perp}$, А/см	9,29	9,41	9,35	0,0357
		ΔH _c , А/см	1,19	1,29	1,24	0,0399
		H ^{II} _c , А/см	8,27	8,43	8,34	0,0418
	3, Φ	H_{c}^{\perp} , $\overline{A/cM}$	9,54	9,59	9,57	0,0172
		ΔНс, А/см	1,18	1,24	1,22	0,0244
		Н ^{II} _c , А/см	6,99	7,05	7,02	0,0183
3	1,Ш	H_{c}^{\perp} , $\overline{A/cM}$	10,74	11,50	11,10	0,3510
		ΔH _c , А/см	4,06	4,13	4,08	0,0203

1	2	3	4	5	6	7
		Н ^{II} _c , А/см	6,97	7,18	7,07	0,0767
1,	1, Φ	H_{c}^{\perp} , А/см	10,77	11,53	11,15	0,3422
		ΔH _c , А/см	4,04	4,10	4,07	0,0169
		H ^{II} _c , А/см	7,06	7,20	7,11	0,0357
	2, Ш	H_c^{\perp} , A/cm	10,83	11,51	11,15	0,2864
		ΔH _c , А/см	4,02	4,07	4,04	0,0181
		H ^{II} _c , А/см	7,09	7,21	7,15	0,0355
3	2, Φ	H_c^{\perp} , A/cm	10,86	11,52	11,18	0,2691
		ΔH _c , А/см	4,01	4,07	4,04	0,0207
		H_{c}^{II} , A/cm	7,09	7,19	7,15	0,0314
	3, Ш	$H_{c}^{\!\!\perp}$, А/см	10,94	11,54	11,23	0,2746
		ΔH _c , А/см	4,03	4,15	4,09	0,0478
		H_{c}^{II} , A/cm	7,08	7,21	7,15	0,0479
	3, Ф	$H_{c}^{\!\!\perp}$, A/c_{M}	10,95	11,51	11,23	0,2453
		ΔH _c , А/см	4,03	4,13	4,08	0,0411
		H_c^{II} , А/см	8,79	8,91	8,84	0,0328
	1,Ш	$H_{c}^{\!\!\perp}$, A/c_{M}	12,00	12,67	12,32	0,3109
		ΔH_c , А/см	3,45	3,50	3,48	0,0145
		Н ^{II} _c , А/см	8,86	8,96	8,92	0,0244
	1, Φ	$H_{c}^{\!\!\perp}$, A/c_{M}	11,96	12,68	12,32	0,2924
		ΔH _c , А/см	3,37	3,44	3,40	0,0204
		H_{c}^{II} , A/cm	8,70	8,98	8,85	0,1009
	2, Ш	$H_{c}^{\!\!\perp}$, $\mathrm{A/cm}$	11,70	12,84	12,33	0,3534
Δ		ΔH _c , А/см	3,32	3,64	3,48	0,1102
-		H_c^{II} , A/cm	8,92	9,02	8,97	0,0258
	2, Φ	H_{c}^{\perp} , A/cm	12,12	12,67	12,38	0,2216
		ΔH _c , А/см	3,35	3,47	3,41	0,0392
		H_c^{II} , A/cm	8,98	9,11	9,05	0,0450
	3,Ш	H_{c}^{\perp} , $\overline{A/cM}$	12,26	12,75	12,51	0,1935
		ΔНс, А/см	3,43	3,54	3,47	0,0538
		H ^{II} _c , А/см	8,98	9,07	9,03	0,0309
	3, Ф	H_c^{\perp} , $\overline{A/c_M}$	12,15	12,75	12,44	0,2478
		ΔH _c , А/см	3,35	3,48	3,41	0,0517

Номер	Контролируемая	Сечение контроля	Коэрцитивн		
образца	поверхность	по рисунку 3.9	H ^{II} _c	H_{c}^{\perp}	AKC, A/cm
		2	6,15	7,38	1,23
1	Ш	3	6,08	7,46	1,38
1		4	5,99	7,30	1,31
1		2	6,30	7,51	1,21
	Φ	3	6,33	7,65	1,32
		4	6,27	7,56	1,29
		2	8,10	9,37	1,27
	Ш	3	8,05	9,30	1,25
2		4	7,99	9,27	1,28
۷.		2	8,37	9,55	1,18
	Φ	3	8,26	9,49	1,23
		4	8,20	9,46	1,26
3	Ш	2	7,26	11,17	3,91
		3	7,17	11,25	4,08
		4	7,02	11,04	4,02
		2	7,26	11,19	3,93
	Φ	3	7,17	11,27	4,10
		4	7,01	11,05	4,04
		2	9,22	12,84	3,62
	Ш	3	9,08	12,57	3,49
4		4	8,99	12,52	3,53
4		2	9,20	12,69	3,49
	Φ	3	9,04	12,41	3,37
		4	8,97	12,36	3,39
Примечание стового фрез	– Ш – шлифованн ерования.	ая поверхность образ	ца; Ф – повер	хность образи	а после чи-

Таблица 3.11 – Исходные значения коэрцитивной силы и ее анизотропии образцов

3.4. Обоснование параметров изгибающей нагрузки

Схема стенда, на котором выполняли испытание образцов, представлена на рисунке 3.7. Основными элементами стенда являются: основание 1, опора 2, домкрат 5, индикатор часового типа 6. Испытываемый образец 3 закрепляли на опоре стенда при помощи двух болтовых соединений М10. Изгибающую нагрузку создавали при помощи винтового ромби-

ческого домкрата 5 грузоподъемностью 800 кг, деформирование свободного конца образца от приложенной нагрузки измеряли индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм и диапазоном измерений 50 мм.

Параметры испытания образцов изгибающей нагрузкой рассчитывали, исходя из фактических данных об их геометрических размерах и механических характеристиках, которые были получены в процессе контроля образцов. При расчете параметров испытания образцов были использованы данные, приведенные в таблице 3.12.

Номер образца		Геометрические размеры, мм			Механические характеристики		
	Материал	Расчетная длина ℓ	Ширина b	Толщина h	σ _в , МПа	σ _т , МПа	δ5, %
1	Сталь К60	270	80,26	10,14	670	476	20
2	Сталь К65	270	80,12	10,19	732	537	19
3	Сталь К60	270	80,26	4,92	684	491	19
4	Сталь К65	270	79,88	5,04	777	581	18

Таблица 3.12 – Исходные данные для расчета параметров испытания образцов

Значение нагрузки Р (Н), прикладываемой к свободному концу испытываемого образца, при которой в месте закрепления образца изгибные напряжения достигнут предела текучести материала, рассчитывали по формуле (3.12).

Деформацию f_{T} (мм) свободного конца испытываемого образца, при котором в месте закрепления образца изгибные напряжения достигнут предела текучести материала, рассчитывали по формуле (3.13). Шаг деформирования Δf (мм) образца в ходе его испытаний принимали на основании положений п. 12 раздела 3.2.5. Результаты расчета параметров испытания образцов сведены в таблицу 3.13.

Номер образца	Материал	P, H	f _т , мм	Δf, мм	Количество шагов нагружения
1	Сталь К60	2425	11,07	1,0	11
2	Сталь К65	2758	12,43	1,0	12
3	Сталь К60	589	23,54	2,0	12
4	Сталь К65	728	27,20	2,5	11

Таблица 3.13 – Параметры испытания образцов

Таблица 3.14 – Изгибные напряжения (МПа) в контрольных сечениях образцов при их испытании

Шаг	f. мм	Номер сечения контроля по рисунку 3.9 и его относительная линейная координата х/ℓ					
нагружения	2	5 (x/l=0)	4 (x/ℓ=0,25)	3 (x/ℓ=0,50)	2 (x/ℓ=0,75)	1 (x/ℓ=1,00)	
			Образец № 1		I		
1	1,0	0	10,7 0,0226	21,5 0,0451	<u>32,2</u> 0,0677	43,0 0,0903	
2	2,0	0	21,5 0,0451	43,0 0,0903	64,5 0,1354	86,0 0,1806	
3	3,0	0	<u>32,2</u> 0,0677	64,5 0,1354	96,7 0,2032	128,9 0,2709	
4	4,0	0	43,0 0,0903	86,0 0,1806	128,9 0,2709	171,9 0,3612	
5	5,0	0	53,7 0,1129	107,5 0,2257	161,2 0,3386	214,9 0,4515	
6	6,0	0	64,5 0,1354	128,9 0,2709	193,4 0,4063	257,9 0,5418	
7	7,0	0	75,2 0,1580	150,4 0,3160	225,6 0,4740	<u>300,9</u> 0,6321	
8	8,0	0	86,0 0,1806	171,9 0,3612	257,9 0,5418	343,8 0,7224	
9	9,0	0	<u>96,7</u> 0,2032	<u>193,4</u> 0,4063	290,1 0,6095	<u>386,8</u> 0,8127	
10	10,0	0	107,5 0,2257	<u>214,9</u> 0,4515	<u>322,4</u> 0,6772	429,8 0,9029	
11	11,07	0	119,0 0,2500	238,0 0,5000	357,0 0,7500	476,0 1,0000	
			Образец № 2				
1	1,0	0	10,8 0,0201	21,6 0,0402	<u>32,4</u> 0,0603	43,2 0,0804	
2	2,0	0	21,6 0,0402	43,2 0,0804	64,8 0,1206	86,4 0,1609	

Шаг	f, мм	Номер сечения контроля по рисунку 3.9 и его относительная линейная координата х/ℓ					
нагружения		5 (x/l=0)	4 (x/ℓ=0,25)	3 (x/l=0,50)	2 (x/l=0,75)	1 (x/ℓ=1,00)	
3	3,0	0	<u>32,4</u> 0,0603	64,8 0,1206	97,2 0,1810	129,6 0,2413	
4	4,0	0	43,2 0,0804	86,4 0,1609	129,6 0,2413	172,8 0,3217	
5	5,0	0	54,0 0,1005	108,0 0,2011	162,0 0,3016	216,0 0,4022	
6	6,0	0	64,8 0,1206	129,6 0,2413	194,4 0,3619	259,2 0,4826	
7	7,0	0	75,6 0,1408	151,2 0,2815	226,8 0,4223	302,3 0,5630	
8	8,0	0	86,4 0,1609	172,8 0,3217	259,2 0,4826	345,5 0,6435	
9	9,0	0	97,2 0,1810	194,4 0,3619	291,5 0,5429	388,7 0,7239	
10	10,0	0	108,0 0,2011	216,0 0,4022	<u>323,9</u> 0,6032	431,9 0,8043	
11	11,0	0	118,8 0,2212	237,6 0,4424	356,3 0,6636	475,1 0,8848	
12	12,43	0	134,3 0,2500	268,5 0,5000	402,8 0,7500	<u>537,0</u> 1,0000	
			Образец № 3				
1	2,0	0	10,4 0,0212	20,9 0,0425	31,3 0,0637	41,7 0,0849	
2	4,0	0	20,9 0,0425	41,7 0,0849	62,6 0,1274	83,4 0,1699	
3	6,0	0	31,3 0,0637	62,6 0,1274	93,8 0,1911	125,1 0,2548	
4	8,0	0	41,7 0,0849	83,4 0,1699	125,1 0,2548	166,8 0,3398	
5	10,0	0	52,1 0,1062	104,3 0,2124	156,4 0,3185	208,5 0,4247	

Шаг	f, мм	Номер сечения контроля по рисунку 3.9 и его относительная линейная координата х/ℓ						
нагружения	,	5 (x/l=0)	4 (x/ℓ=0,25)	3 (x/ <i>l</i> =0,50)	2 (x/ <i>l</i> =0,75)	1 (x/l=1,00)		
6	10.0	0	62,6	125,1	187,7	250,3		
6	12,0	0	0,1274	0,2548	0,3823	0,5097		
7	14.0	0	73,0	146,0	219,0	292,0		
/	7 14,0		0,1487	0,2973	0,4460	0,5946		
0	16.0	0	83,4	166,8	250,3	333,7		
0	10,0	0	0,1699	0,3398	0,5097	0,6796		
0	18.0	0	93,8	187,7	281,5	375,4		
9	18,0	0	0,1911	0,3823	0,5734	0,7645		
10	20.0	0	104,3	208,5	312,8	417,1		
10	20,0	0	0,2124	0,4247	0,6371	0,8495		
11	22.0	0	114,7	229,4	344,1	458,8		
11	22,0	0	0,2336	0,4672	0,7008	0,9344		
12	23.54	0	122,8	245,5	368,3	491,0		
12	23,34	0	0,2500	0,5000	0,7500	1,0000		
			Образец № 4					
1	2,5	0	13,4	26,7	40,1	53,4		
			0,0230	0,0460	0,0689	0,0919		
2	5.0	0	26,7	53,4	80,1	106,8		
2	5,0	0	0,0460	0,0919	0,1379	0,1838		
2	75	0	40,1	80,1	120,2	160,2		
5	7,5	0	0,0689	0,1379	0,2068	0,2758		
1	10.0	0	53,4	106,8	160,2	213,6		
4	10,0	0	0,0919	0,1838	0,2758	0,3677		
5	12.5	0	66,8	133,5	200,3	267,0		
5	12,5	0	0,1149	0,2298	0,3447	0,4596		
6	15.0	0	80,1	160,2	240,3	320,4		
0	15,0	0	0,1379	0,2758	0,4137	0,5515		
7	17.5	0	93,5	186,9	280,4	373,9		
1	17,5	0	0,1609	0,3217	0,4826	0,6435		
8	20.0	0	106,8	213,6	320,4	427,7		
0	20,0	0	0,1838	0,3677	0,5515	0,7354		
9	22.5	0	120,2	240,3	360,5	480,7		
	22,5	0	0,2068	0,4137	0,6205	0,8273		
10	25.0	0	133,5	267,0	400,6	534,1		
10	20,0	U	0,2298	0,4596	0,6894	0,9192		
11	27.2	0	145,3	290,5	435,8	581,0		
	<i>-,.</i>		0,2500	0,5000	0,7500	1,0000		
Примечание	– В числит	еле даны зн	ачения напря	жений, а в з бласти	наменателе -	- отношения		
напряжений изгиба к пределу текучести материала образца.								







Рисунок 3.20 – Распределение напряжений по длине образца № 1 при его изгибе





1 - f = 1 мм; 2 - f = 2 мм; 3 - f = 3 мм; 4 - f = 4 мм; 5 - f = 5 мм; 6 - f = 6 мм; 7 - f = 7 мм; 8 - f = 8 мм; 9 - f = 9 мм; 10 - f = 10 мм; 11 - f = 11 мм; 12 - f = 12,43 мм; 13 – предел текучести материала образца

Рисунок 3.21 – Распределение напряжений по длине образца № 2 при его изгибе





1 - f = 2 мм; 2 - f = 4 мм; 3 - f = 6 мм; 4 - f = 8 мм; 5 - f = 10 мм; 6 - f = 12 мм; 7 - f = 14 мм; 8 - f = 16 мм; 9 - f = 18 мм; 10 - f = 20 мм; 11 - f = 22 мм; 12 - f = 23,54 мм; 13 – предел текучести материала образца

б







1 - f = 2,5 мм; 2 - f = 5 мм; 3 - f = 7,5 мм; 4 - f = 10 мм; 5 - f = 12,5 мм; 6 - f = 15 мм; 7 - f = 17,5 мм; 8 - f = 20 мм; 9 - f = 22,5 мм; 10 - f = 25 мм; 11 - f = 27,20 мм; 12 - предел текучести материала образца



3.5. Результаты испытания образцов и их анализ

3.5.1. Результаты исследования влияния немагнитного покрытия на значения коэрцитивной силы

На поверхность МГ наносят специальное покрытие, предотвращающее развитие коррозионных процессов в процессе эксплуатации объекта. При проведении измерений производят удаление покрытия, что требует привлечения дополнительных материальных и трудовых ресурсов, в том числе и на его последующее восстановление.

В этой связи исследование влияния изоляционного покрытия на значения коэрцитивной силы и оценка возможности проведения измерений коэрцитивной силы без удаления имеющегося покрытия является весьма важной задачей.

Влияние немагнитного покрытия на поверхности металла на результаты коэрцитиметрии было исследовано на темплетах металла и ненагруженных образцах.

В ходе исследований измерения коэрцитивной силы выполняли через слой, имитирующий наличие покрытия на трубе.

Толщина покрытия h регулировалась с помощью фрагментов немагнитного материала, устанавливаемых между объектом исследования и датчиком коэрцитиметра. Максимальная толщина исследуемого покрытия составила 11,07 мм, при среднем значение толщины одного слоя, равном ≈ 0,68 мм.

Результаты выполненных исследований приведены на рисунке 3.24.

Проведенные исследования показали, что при увеличении толщины немагнитного покрытия происходит монотонное уменьшение значений коэрцитивной силы.

При этом у темплета № 1 с начальным значением коэрцитивной силы 3,26 А/см минимальное значение, равное 0,8 А/см, которое может быть зарегистрировано прибором КРМ-Ц-К2М, было достигнуто при толщине покрытия 2,5 мм, а у темплета № 2 с начальным значением коэрцитивной силы 5,08 А/см – при толщине покрытия 4 мм. У образцов № 3 и 4 с начальными значениями коэрцитивной силы от 6,99 до 11,78 А/см темпы снижения коэрцитивной силы при увеличении толщины покрытия были меньше, чем при аналогичных измерениях на темплетах металла. В результате этого при максимально исследуемой толщине покрытия 11 мм коэрцитивная сила не достигла минимально регистрируемого значения.

Следует отметить, что с увеличением толщины немагнитного покрытия происходит уменьшение АКС образцов № 3 и 4, что обусловлено разными темпами снижения значений коэрцитивной силы. В частности, у образца № 3 значения АКС ΔH_c снижаются

от 1,78 А/см при h = 0 мм до 0,26 А/см при h = 10 мм, а у образца № 4 – от 3,01 А/см при h = 0 мм до 0,27 А/см при h = 10 мм.

Таким образом, выполнить интерпретацию результатов измерения коэрцитивной силы на трубопроводах без удаления противокоррозионной изоляции не просто, т. к. для этого необходимо наличие экспериментальных зависимостей, позволяющих перейти от измеренных через изоляционное покрытие значений коэрцитивной силы к ее фактическим значениям.

Кроме того, проведенные исследования показали, что такие измерения возможны на трубах из стали К60 с изоляцией, имеющей толщину не более 2,0 мм, а на трубах из стали К65 с изоляцией, имеющей толщину не более 3,0 мм.



1 – H^{II}_c и H[⊥]_c на темплете № 1; 2 – H^{II}_c и H[⊥]_c на темплете № 2; 3 – H^{II}_c на темплете № 3;
4 – H[⊥]_c на темплете № 3; 5 – H^{II}_c на темплете № 4; 6 – H[⊥]_c на темплете № 4
Рисунок 3.24 – Изменение значений коэрцитивной силы H_c в зависимости от толщины h немагнитного покрытия на контролируемой поверхности

3.5.2. Результаты измерения коэрцитивной силы при упругом деформировании образцов и их анализ

На каждом шаге нагружения образца, а также при последующей его разгрузке после достижения максимальной деформации свободного конца образца, не снимая приложенной статической нагрузки, в двух контрольных сечениях (сечения 2, 3 на рисунке 3.11) со стороны сжатых волокон производили измерение значений коэрцитивной силы.

После реализации всех шагов нагружения образца выполняли его переустановку на стенде таким образом, чтобы нижняя рабочая поверхность образца стала верхней, а верхняя – нижней. После переустановки образца повторяли весь процесс его деформирования и проводимых измерений.

Данные, полученные в ходе испытаний образцов, в графическом виде показаны на рисунке 3.25.



Рисунок 3.25 – Значения коэрцитивной силы H_c образцов при их изгибе

Следует отметить, что значения АКС ΔH_c для каждого контрольного сечения на всех этапах деформирования образца рассчитывали по формуле (3.11).

Полученные данные показали, что в ходе нагружения образцов изгибающей нагрузкой, обеспечивающей в контролируемых сечениях изгибные напряжения до 75 % от фактического минимального значения предела текучести материала, ни значения коэрцитивной силы, ни значения ее анизотропии практически не изменялись.

Отсутствие чувствительности коэрцитивной силы к росту напряжений в сечении испытанных образцов может быть объяснено двумя причинами.

Во-первых, в процессе механической обработки металла при изготовлении образцов произошли значительные структурные изменения, определяющие значения коэрцитивной силы и ее анизотропии. В результате произошедших структурных изменений значения АКС достигли максимально возможных значений, не изменяющихся затем при нагружении образцов, т. е. структурные изменения вследствие деформирования образцов малозначительны по сравнению с произошедшими структурными изменениями при изготовлении образцов.

Вторая причина может быть связана с тем обстоятельством, что при изгибе в отличие от растяжения и сжатия, обеспечивающих равномерное распределение напряжений по толщине образца, в каждом поперечном сечении присутствуют сразу два вида напряжений: напряжения сжатия и напряжения растяжения, рисунок 3.26.

В том случае, если при измерении коэрцитивной силы происходит промагничивание образца в сечении контроля на всю его толщину, то прибор будет регистрировать усредненный результат коэрцитивной силы для растянуто-сжатого сечения. Некоторое изменение коэрцитивной силы и ее анизотропии в этом случае возможно вследствие погрешности измерений, а также вследствие того, что при сжатии и растяжении коэрцитивная сила изменяется неодинаково, т. е. зависимость коэрцитивной силы от напряжений несимметрична относительно оси, разграничивающей сжатие и растяжение, рисунок 3.27.

Следует отметить, что отсутствие чувствительности коэрцитивной силы к росту напряжений вследствие первой причины является частной технологической особенностью, решаемой путем устранения произошедших структурных изменений в металле образцов, например, проведением их термической обработки – отжига. Если же отсутствие чувствительности коэрцитивной силы к росту напряжений происходит из-за второй причины, то в этом случае коэрцитиметрический метод малопригоден для оценки значений напряжений при рассматриваемом нагружении, т. е. когда в контролируемом сечении присутствуют и напряжения растяжения и напряжения сжатия. В таких случаях для оценки НДС необходимо привлекать дополнительные методы, позволяющие контролировать только поверхностные



Рисунок 3.26 – Распределение изгибных напряжений в поперечном сечении образца



1, 2 – результаты измерений коэрцитивной силы вдоль ($\mathsf{H}^{I}_{\mathsf{c}})$ и поперек оси ($\mathsf{H}^{\bot}_{\mathsf{c}}$) соответ-

ственно

Рисунок 3.27 – Зависимость коэрцитивной силы H_c от напряжений σ при одноосном нагружении для пластины из стали 09Г2С [3]

3.5.3. Изменение коэрцитивной силы при пластических деформациях металла

Пластическая деформация вязкого металла предшествует его разрушению, поэтому обнаружение участков металлоконструкций, где пластическая деформация имеет место, весьма важно для обеспечения безопасной эксплуатации объектов транспорта газа.

У низколегированных трубных сталей пластическая деформация приводит к появлению АКС после снятия нагрузки, рисунок 3.28. При этом если произошла пластическая деформация, и металл находится под действием внешних сил, то зависимость коэрцитивной силы от напряжений испытывает необратимые изменения. Поведение коэрцитивной силы при нагружении в области пластической деформации таково, что сам факт ее проявления ярко выражается при разгружении резким увеличением H_c^{II} . В этой ситуации градуировочные кривые, снятые на недеформированном магнетике, оказываются неприменимыми.



 1 – до нагружения образец не был деформирован;
 2 – нагружение образца после его деформации растяжением 2 % Рисунок 3.28 – Зависимость коэрцитивной силы образца из стали 15ХСНД от напряжений [64] Возникновение АКС после пластической деформации материала и после снятия нагрузки, а также изменение вида зависимости H_c(σ) после пластической деформации связано с возникновением и развитием ориентированных микронапряжений.

Исследования показывают, что в том случае, если произошла пластическая деформация, и металл находится под действием внешних сил, то трудно дать однозначное заключение о пластической деформации и ее величине. По АКС можно лишь с некоторой точностью предсказать, что напряжения в металле близки к пределу текучести или превысили его.

Довольно точно степень пластической деформации металла можно определять по градуировочной кривой в разгруженном состоянии, т. к. после пластической деформации коэрцитивная сила H_c^{II} становится заметно больше H_c^{\perp} , т. е. низкоуглеродистый материал в направлении пластического удлинения имеет отрицательную анизотропию. При последующем нагружении в тот момент, когда внешние напряжения сравняются с ориентированными внутренними, эта анизотропия становится нулевой. В этом случае по величине внешних напряжений можно судить о величине внутренних ориентированных напряжений.

Исследование изменения коэрцитивной силы при упругопластическом и пластическом деформировании стали К60 и К65 выполняли на образцах № 3 и 4, которые перед проведением испытаний были подвергнуты термической обработке – отжигу.

Термообработка включала следующие операции: нагрев образца до 650 °C, выдержку образца при этой температуре в течение одного часа и последующее охлаждение образца вместе с печью, составившее около 24 ч.

Проведение термообработки образцов было обусловлено наличием у них значительной начальной анизотропности магнитных свойств в продольном и поперечном направлениях. У образца № 3 значение начальной анизотропии составило от 3,91 до 4,10 А/см, а у образца № 4 – от 3,37 до 3,62 А/см.

В разделе 3.5.2 причина появления начальной анизотропии была связана со структурными изменениями металла в процессе его механической обработки при изготовлении образцов. Если высказанное предположение соответствовало действительности, то после проведения термообработки анизотропность магнитных свойств должна, если не исчезнуть, то, по крайней мере, значительно уменьшиться. Следует отметить, что после проведения термообработки образцам № 3 и 4 была присвоена новая нумерация: № 3Т и 4Т.

До начала испытания образцов № 3Т и 4Т изгибающей нагрузкой было выполнено определение значений механических характеристик (предел прочности, условный предел текучести, относительное удлинение, твердость по Бринеллю) их материала неразрушающим

методом с использованием прибора ПИМ-ДВ-1. Измерения выполняли на концевых участках образцов (см. рисунок 3.12).

Результаты неразрушающего определения механических характеристик материала образцов сведены в таблицу 3.15, а сопоставление механических характеристик до и после проведения термообработки представлено в виде диаграмм на рисунке 3.29.

Номер образца	Номер точки контроля на рисунке 3.10	σв, МПа	σт, МПа	δ5, %	HB
1	2	3	4	5	6
		Шлифованная	н поверхность		
	T1	633	440	21	195
	T2	648	455	21	199
	Т3	628	436	21	194
	T4	635	441	21	196
3Т	Минимальное значение	628	436	21	194
	Максимальное значение	648	455	21	199
	Среднее значение	636	443	21	196
	T1	827	631	17	245
	T2	749	553	18	224
	Т3	730	535	18	219
	T4	771	575	18	230
4T	Минимальное значение	730	535	17	219
	Максимальное значение	827	631	18	245
	Среднее значение	769	574	18	230
		Фрезерованна	я поверхность		
	T1	655	462	20	201
	T2	643	450	21	198
	Т3	625	432	21	193
	T4	635	441	21	196
3T	Минимальное значение	625	432	20	193
	Максимальное значение	655	462	21	201
	Среднее значение	640	446	21	197

Таблица 3.15 – Ме	еханические характеристики	материала образцов.	<u>№</u> 3′	Ги	4T
-------------------	----------------------------	---------------------	-------------	----	----

|--|

1	2	3	4	5	6
	T1	731	536	18	220
	T2	720	526	19	217
	Т3	741	546	18	223
	T4	789	593	17	235
4T	Минимальное значение	720	526	17	217
	Максимальное значение	789	593	19	235
	Среднее значение	745	550	18	224







Рисунок 3.29 – Средние значения временного сопротивления (а), предела текучести (б), относительного удлинения (в) и поверхностной твердости (г) материала образцов № 3, 3Т, 4 и
Полученные данные показывают, что у образцов № 3 и 4 после термообработки произошло снижение прочностных, но повышение пластических свойств. У образца № 3 временное сопротивление снизилось на 6,8 %, предел текучести на 9,4 %, твердость на 5,8 %, а относительное удлинение повысилось на 9,9 %. У образца № 4 временное сопротивление снизилось на 3,8 %, предел текучести на 5,0 %, твердость на 3,2 %, а относительное удлинение повысилось на 2,9 %.

После определения механических характеристик образцов № 3Т и 4Т было выполнено измерение исходных (начальных) значений коэрцитивной силы. Исходные (начальные) значения коэрцитивной силы образцов измеряли в трех контрольных сечениях (сечения 2, 3, 4 на рисунке 3.11) со стороны шлифованной поверхности. В каждом контрольном сечении осуществляли по три измерения в каждом из четырех направлений. Осредненные результаты выполненных измерений приведены в таблице 3.16.

Номер сечения контроля на рисунке 3.10	$H^{\rm II}_{\rm c(1)}$	$H_{c(1)}^{\bot}$	$H^{II}_{c(2)}$	$H_{c(2)}^{\!\!\perp}$	ΔH_c
		Образе	ц № 3Т		
2	4,38	4,97	4,38	4,99	0,60
3	4,11	4,65	4,12	4,63	0,53
4	4,07	4,56	4,09	4,53	0,47
Среднее значение	4,19	4,73	4,20	4,72	0,53
		Образе	ц № 4Т		
2	6,28	7,11	6,30	7,12	0,83
3	6,30	7,05	6,30	7,12	0,79
4	6,44	7,52	6,43	7,47	1,06
Среднее значение	6,34	7,23	6,34	7,24	0,89

Таблица 3.16 – Результаты измерения значений коэрцитивной силы (А/см) образцов № 3Т и 4Т до их нагружения

Полученные данные показали, что анизотропность магнитных свойств в продольном и поперечном направлениях образцов не исчезла, но заметно уменьшилась. В частности, у образца № 3 анизотропия снизилась с 3,91 – 4,10 до 0,47 – 0,60 А/см, а у образца № 4 – с 3,37 – 3,62 до 0,79 – 1,06 А/см, т. е. в среднем на 87 и 75 % соответственно. Таким образом, сделан-

ное ранее предположение о том, что начальная анизотропия магнитных свойств обусловлена структурными изменениями металла в процессе его механической обработки при изготовлении образцов, соответствует действительности. Следует отметить, что после термообработки произошло не только уменьшение анизотропии магнитных свойств, но и снижение значений коэрцитивной силы на 29 – 58 %, а именно у образца № 3 – на 41 и 58 %, а у образца № 4 – на 29 и 42 % соответственно при положении датчика измерения коэрцитивной силы вдоль и поперек направления действия приложенной нагрузки. При этом минимальные значения коэрцитивной силы образцов оказались на 21 % выше начальных значений коэрцитивной силы материала, из которого были изготовлены образцы.

После освидетельствования образцов № 3Т и 4Т осуществляли их деформирование изгибающей нагрузкой. На каждом шаге нагружения образца, а также при последующей его разгрузке после достижения максимальной деформации свободного конца образца, не снимая приложенной статической нагрузки, в двух контрольных сечениях (сечения 2, 3 на рисунке 3.11) производили измерение значений коэрцитивной силы. Каждый опыт дублировали трижды. При этом прилагаемая нагрузка обеспечивала не только упругие, как это было у образцов № 1, 2, 3 и 4, но упругопластические деформации.

Свидетельством достижения упругопластических деформаций явилось то обстоятельство, что после снятия нагрузки не произошло возврата свободного конца в начальное состояние. При этом остаточная деформация свободного конца составила 2,8 – 3,5 мм у образца № 3Т и 0,7 – 1,6 мм у образца № 4Т, т. е. образец № 3Т в процессе испытания был подвергнут более значительной деформации. Измерение коэрцитивной силы выполняли при каждом перемещении свободного конца образца на 5 мм. Предельное деформирование свободного конца образца № 3Т составило 48,6 мм, а образца № 4Т – 45,1 мм.

Осредненные результаты измерения коэрцитивной силы при деформировании образцов показаны на рисунке 3.30.

Значение относительной деформации є рассчитывали исходя из уравнения упругой линии жестко защемленной консольной балки и перемещения ее свободного конца f:

$$\varepsilon = 0.5h\omega'', \qquad (3.16)$$

где h – толщина образца, мм; ω^{//} – вторая производная от уравнения упругой линии образца, определяемого зависимостью

$$\omega = f - 1.5 \frac{f}{\ell} x + 0.5 \frac{f}{\ell^3} x^3, \qquad (3.17)$$

где *ℓ* – длина образца, мм; х – линейная координата сечения контроля, равная 135 мм для сечения № 3 и 202,5 мм для сечения контроля № 2.

После преобразования формула (3.16) принимает следующий вид:

$$\varepsilon = 1,5(hf/\ell^3)x, \qquad (3.18)$$

Расчет по формуле (3.18) показал, что в процессе испытания у образца № 3Т была достигнута максимальная относительная деформация 0,37 %, а у образца № 4Т – 0,35 %.

После снятия нагрузки значение остаточной деформации составило у образца № 3Т 0,024 %, а у образца № 4Т – 0,009 %.

При максимальном нагружении образца № 3Т упругопластические деформации испытывал поверхностный слой толщиной 1,45 мм, а средняя часть образца толщиной 2,02 мм (41,1 %) испытывала упругие деформации.

При максимальном нагружении образца № 4Т упругопластические деформации испытывал поверхностный слой толщиной 1,17 мм, а средняя часть образца толщиной 2,70 мм (53,6 %) испытывала упругие деформации.



 $1-\mathsf{H}_{\mathsf{c}}^{\scriptscriptstyle \perp}\,;\,2-\mathsf{H}_{\mathsf{c}}^{\scriptscriptstyle \text{II}}$

Рисунок 3.30 – Изменение коэрцитивной силы H_c и ее анизотропии ΔH_c при деформировании образцов № 3Т (а, б) и 4Т (в, г)

Полученные данные показывают, что после термической обработки образцов при их нагружении изгибающей нагрузкой происходит заметное изменение как значений коэрцитивной силы, так и значений ее анизотропии. При этом значения коэрцитивной силы H_c^{\perp} и H_c^{\parallel} возрастают, но изменение коэрцитивной силы H_c^{\perp} происходит гораздо сильнее, чем изменение коэрцитивной силы H_c^{\parallel} . Например, при деформировании образца № 3Т, в процессе которого относительная деформация изменялась с 0 до 0,37 %, значение коэрцитивной силы H_c^{\parallel} – на 69 %, что составило 1,1 А/см, а значение коэрцитивной силы H_c^{\perp} – на 69 %, что составило 3,38 А/см. Изменение относительной деформации образца № 4T с 0 до 0,35 % вызвало увеличение коэрцитивной силы H_c^{\parallel} на 11 % (0,70 А/см), а коэрцитивной силы H_c^{\perp} – на 34 % (2,37 А/см). Кроме того, следует отметить, что после некоторого порогового значения относительной деформации образца № 3T это происходит при значении относительной деформации 0,3 %, а у образца № 4T в процессе проведенных испытаний такое пороговое значение относительной деформации не было достигнуто, вероятнее всего, в силу более высоких прочностных свойств материала.

Таким образом, полученные данные показывают, что отсутствие чувствительности коэрцитивной силы к росту напряжений в сечении испытанных образцов № 1, 2, 3 и 4 (см. раздел 3.5.2) обусловлено значительными структурными изменениями в процессе механической обработки металла при изготовлении образцов, а не наличием в каждом поперечном сечении сразу двух видов напряжений: напряжений сжатия и напряжений растяжения. Кроме этого результаты контроля показали, что значения коэрцитивной силы определяются на основании промагничивания не всей толщины образца, а только его поверхностных слоев металла.

Экспериментальные данные, представленные на рисунке 3.30 в координатах «относительная деформация – коэрцитивная сила или АКС», наглядно показывают наличие и характер изменения магнитных параметров материала при его нагружении, однако такое представление полученных результатов достаточно сложно для практического применения.

Для практического использования полученных результатов необходимо представить экспериментальные данные в координатах $\Delta H_c - \sigma$ или $\Delta H_c / \sum H_c - \sigma / \sigma_\tau$. Пересчет значений деформаций образца в напряжения осуществляли с использованием диаграммы $\sigma - \varepsilon$, которая строилась на основании данных о механических характеристиках образцов (см. раздел 3.1).

Значения координат точек диаграммы, находящихся на границах ее характерных

участков, для испытанных образцов № 3Т и 4Т, приведены в таблице 3.17.

Таблица 3.17 – Значения деформаций и напряжений на границах участков диаграммы σ – ε для материала образцов № 3Т и 4Т

Номер образца	ε _п , %	σп, МПа	ε _{0,2} , %	σ _{0,2} , МПа
3Т	0,151	311,5	0,416	445
4T	0,188	386,4	0,468	552

Результаты испытания образцов № 3Т и 4Т в координатах $\Delta H_c / \sum H_c - \sigma / \sigma_{\tau}$ представлены на рисунке 3.31.

Из рисунка 3.31 видно, что после представления экспериментальных данных в координатах $\Delta H_c / \sum H_c - \sigma / \sigma_{\tau}$ произошло уменьшение нелинейности зависимости магнитных параметров металла от уровня возникающих механических напряжений, что объясняется нелинейностью изменения напряжений и деформаций при значении напряжений более 70 % предела текучести материала.

При аппроксимации экспериментальных данных полиномом третьей степени были получены следующие зависимости:

– для образца № 3Т из стали К60

$$\Delta \overline{H}_{c} = -0,000012\overline{\sigma}^{3} + 0,00061\overline{\sigma}^{2} + 0,233\overline{\sigma} + 2,64, \qquad (3.19)$$

– для образца № 4Т из стали К65





Рисунок 3.31 – Изменение относительной АКС ∆H_c при деформировании образцов № 3Т (а) и 4Т (б)

$$\Delta \overline{H}_{c} = 0,000005\overline{\sigma}^{3} + 0,00061\overline{\sigma}^{2} + 0,133\overline{\sigma} + 5,35, \qquad (3.20)$$

rge $\Delta \overline{H}_{c} = \frac{\Delta H_{c}}{H_{c}^{\perp} + H_{c}^{\parallel}} 100\%; \ \overline{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_{m}} 100\%.$

Следует отметить, что зависимости (3.19) и (3.20) могут быть использованы для определения напряжений, не превышающих 90 % от предела текучести материала, но зависимость (3.19) при значении относительной АКС $\Delta \overline{H}_c$ не более 20 %, а зависимость (3.20) – при значении $\Delta \overline{H}_c$ не более 15 %. Погрешность определения отношения σ/σ_T по экспериментальным значениям $\Delta \overline{H}_c$ с использованием полученных зависимостей (3.19) и (3.20) составляет:

1) у образца № 3Т:

при значении напряжений, не превышающих 20 % предела текучести материала, т.
 е. при σ/σ_т ≤ 20 % − до 70 %;

– при значении напряжений, превышающих 20 % предела текучести материала, т. е. при $\sigma/\sigma_{\rm T} > 20$ % – до 20 % (при этом среднее значение погрешности определения $\sigma/\sigma_{\rm T}$ составляет 9,9 %);

2) у образца № 4Т:

при значении напряжений, не превышающих 15 % предела текучести материала, т.
 е. при σ/σ_т ≤ 15 % – до 65 %;

– при значении напряжений, превышающих 15 % предела текучести материала, т. е. при $\sigma/\sigma_T > 15$ % – до 20 % (при этом среднее значение погрешности определения σ/σ_T составляет 10,5 %).

3.6. Выводы по главе 3

В ходе проведенных исследований было выполнено следующее:

 – разработана оригинальная методика испытания металлических образцов для исследования зависимости коэрцитивной силы металла от параметров напряженного состояния и ориентации магнитного потока датчика прибора относительно вектора возникающих напряжений;

 – разработан и изготовлен лабораторный стенд для создания в металлических образцах напряженного состояния изгибающей нагрузкой;

 проведены испытания образцов из трубных сталей К60 и К65 для определения зависимости коэрцитивной силы металла от параметров напряженного состояния и ориентации магнитного потока датчика прибора относительно вектора возникающих напряжений;

– разработана методика оценки НДС трубопроводов по магнитным характеристикам металла, включая трубопроводы из высокопрочных сталей К60 и К65.

Для исследования влияния напряженного состояния металла на его коэрцитивную силу разработана оригинальная методика испытания образцов изгибающей нагрузкой, которая была реализована на специально изготовленном лабораторном стенде. В ходе реализации методики были испытаны шесть образцов: три образца из стали К60 и три образца из стали К65. При этом четыре образца были испытаны после их изготовления, а два образца – после проведения термической обработки (отжига). Образцы после изготовления имели в исходном состоянии значительную анизотропию магнитных свойств в продольном и поперечном направлении (1,18 – 1,52 А/см у образцов номинальной толщиной 10 мм, 3,37 – 4,10 А/см у образцов номинальной толщиной 5 мм). В процессе изготовления образцов произошло увеличение значений коэрцитивной силы, которые были зарегистрированы на темплетах металла до их механической обработки. При этом значения коэрцитивной силы H_c^{\parallel} увеличились в 1,6 – 2,1 раза, а значения H_c^{\perp} – в 1,8 – 3,2 раза. После термической обработки образцов анизотропность магнитных свойств в продольном и поперечном направлениях образцов не исчезла, но заметно (на 75 – 87 %) уменьшилась. После термообработки произошло не только уменьшение анизотропии магнитных свойств, но и снижение значений коэрцитивной силы на 29 – 58 %, однако минимальные значения коэрцитивной силы образцов в ненагруженном состоянии оказались на 21 % выше начальных значений коэрцитивной силы материала, из которого были изготовлены образцы. Рост значений коэрцитивной силы, а также анизотропность магнитных свойств в продольном и поперечном направлениях образца обусловлена структурными изменениями металла в процессе его механической обработки при изготовлении образцов.

При различных реализуемых схемах измерения коэрцитивной силы на темплетах и образцах, а также вследствие их циклического намагничивания – размагничивания в процессе многократных измерений, изменение получаемых результатов не превышало 5 %, т. е. наблюдалась повторяемость результатов.

Проведенные исследования показали, что с увеличением толщины немагнитного покрытия на поверхности металла происходит монотонное уменьшение значений коэрцитивной силы. Для возможности интерпретации результатов измерения коэрцитивной силы на трубопроводах без удаления противокоррозионной изоляции необходимо наличие экспериментальных зависимостей, позволяющих перейти от измеренных через изоляционное покрытие значений коэрцитивной силы к ее фактическим значениям. Кроме того, проведенные исследования показали, что такие измерения возможны на трубах из стали К60 с изоляцией, имеющей толщину не более 2,0 мм, а на трубах из стали К65 с изоляцией, имеющей толщину не более 3,0 мм.

При испытании образцов, не подвергавшихся термообработке, изгибающей нагрузкой, обеспечивающей в контролируемых сечениях изгибные напряжения до 75 % от фактического минимального значения предела текучести материала, ни значения коэрцитивной силы, ни значения ее анизотропии практически не изменялись. Результаты проведенных исследований показали, что отсутствие чувствительности коэрцитивной силы к росту напряжений в сечении таких образцов обусловлено значительными структурными изменениями в процессе механической обработки металла при изготовлении образцов, а не наличием в каждом поперечном сечении сразу двух видов напряжений: напряжений сжатия и напряжений растяжения. Кроме этого, результаты контроля показали, что значения коэрцитивной силы определяются на основании промагничивания не всей толщины образца, а только его поверхностных слоев металла.

При испытании термообработанных образцов изгибающей нагрузкой, обеспечивающей в контролируемых сечениях изгибные напряжения до 99 % от фактического минималь-

116

ного значения предела текучести материала, т. е. прилагаемая нагрузка обеспечивала не только упругие, но упругопластические деформации, наблюдалось заметное изменение как значений коэрцитивной силы, так и значений ее анизотропии. При этом после некоторого порогового значения относительной деформации образца ее дальнейшее увеличение не вызывало увеличения значения коэрцитивной силы и ее анизотропии.

По результатам обработки экспериментальных данных были получены градуировочные зависимости, позволяющие определять уровень напряжений в трубных элементах из сталей К60 и К65 по результатам измерения значений коэрцитивной силы. При значении напряжений 20 - 90 % от предела текучести материала средняя погрешность определения отношения σ/σ_{T} по полученным зависимостям составляет ≈ 10 %.

4. РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ГАЗОПРОВОДАХ

4.1. Обоснование градуировочных зависимостей для определения механических напряжений в газопроводе по коэрцитивной силе

В работе [71] выполнено измерение коэрцитивной силы при изгибе трубного образца наружным диаметром 325 мм с толщиной стенки 8 мм, изготовленного из стали 14ХГС, имеющей нормативные значения временного сопротивления 490 МПа, предела текучести 345 МПа, относительного удлинения 22 %. В отличие от плоского образца сплошного сечения при изгибе трубного образца в стенке трубы на ее верхней и нижней образующих металл полностью растянут или сжат. Поэтому измерения коэрцитивной силы на верхней и нижней образующей трубы, т.е. в растянутой и сжатой зоне металла, должны показать характер зависимости $H_c(\sigma)$ как для напряжений растяжения, так и для напряжений сжатия. Напряжения поднимали до 200 МПа с шагом 25 МПа. Результаты измерений показаны на рисунке 4.1.



 $1 - \mathsf{H}_{\mathsf{c}}^{\perp}$; $2 - \mathsf{H}_{\mathsf{c}}^{\mathsf{II}}$; $3 - \Delta \mathsf{H}_{\mathsf{c}}$

Рисунок 4.1 – Изменение коэрцитивной силы трубного образца при его изгибе

Из рисунка 4.1 видно, что характер изменения коэрцитивной силы такой же, как и при испытании плоских образцов сжимающей или растягивающей нагрузкой. Наряду с этим следует отметить, что изменение коэрцитивной силы и ее анизотропии происходит только на начальной стадии нагружения, а именно до напряжений, не превышающих 20 % от предела текучести материала. Возможно, что такая ситуация обусловлена тем обстоятельством, что в ненагруженном состоянии трубный образец уже имеет АКС. При этом значение коэрцитивной силы H_c^{\parallel} , измеренной в продольном направлении, превышает значение коэрцитивной силы H_c^{\perp} , измеренной в поперечном направлении, что, как было уже отмечено ранее, характерно для металла, который до измерений испытал определенное пластическое деформирование. По нашему мнению, именно по этой причине теоретическая кривая безразмерного параметра $\Delta H_c/(H_c^{\perp} + H_c^{\parallel})$ от уровня относительных напряжений (σ/σ_T), построенная на основании зависимости (1.3), существенно расходится с экспериментальными данными, рисунок 4.2. Отличие теоретических и экспериментальных данных для участка растягивающих напряжений возрастает с увеличением уровня напряжений, например, в начале участка растягивающих напряжений отличие безразмерного параметра $\Delta H_c/(H_c^{\perp} + H_c^{\parallel})$ составляет около 5 %, а при $\sigma/\sigma_T = 40$ % относительный параметр анизотропии отличается уже в 5,7 раз.



экспериментальные данные; 2 – теоретическая зависимость по формуле (1.3)
 Рисунок 4.2 – Относительное изменение АКС от напряжений

Для участка сжимающих напряжений отличие не превышает 20 %, при этом для сжимающих напряжений до 25 % от предела текучести нагружаемого материала теоретические значения относительной анизотропии меньше экспериментальных, а для сжимающих напряжений более 25 % от предела текучести материала – больше экспериментальных.

В работе [12] исследовано влияние на коэрцитивную силу плоского напряженного состояния, обусловленного внутренним давлением в трубном образце наружным диаметром 140 мм с толщиной стенки 1,4 мм. Давление поднимали до 5 МПа (50 кгс/см²) с шагом 0,5 МПа (5 кгс/см²), т.е. на каждом шаге нагружения кольцевые и продольные напряжения увеличивались на 25,3 и 12,7 МПа соответственно, а предельные значения напряжений составили 253,6 и 126,8 МПа. Измерения выполняли в двух контрольных точках. В связи с тем, что значения магнитных характеристик в контрольных точках практически не имели отличий, то при анализе были использованы средние арифметические значения результатов коэрцитиметрии, полученные в этих точках контроля. Результаты измерений приведены в таблице 4.1 и показаны на рисунке 4.3.

внутренним давлением								
$σ_{\kappa u}$, ΜΠα	σ _{пр} , МПа	$rac{\sigma_{ ext{ku}}}{\sigma_{ au}}$	$\frac{\sigma_{np}}{\sigma_{\tau}}$	Н ^{II} _{c(1)} , А/см	Н _{с(1)} , А/см	Н ^{II} _{c(2)} , А/см	Н _{с(2)} , А/см	ΔH _c , А/см
0	0	0	0	6,91	6,56	6,90	7,03	- 0,11
25,4	12,7	0,0735	0,0367	6,71	6,38	6,66	6,74	-0,12
50,7	25,4	0,1470	0,0735	6,55	6,03	6,56	6,49	- 0,30
76,1	38,0	0,2205	0,1102	6,44	5,77	6,45	6,34	- 0,40
101,4	50,7	0,2940	0,1470	6,37	5,64	6,36	6,04	- 0,52
126,8	63,4	0,3675	0,1837	6,35	5,52	6,36	5,71	-0,74
152,1	76,1	0,4410	0,2205	6,36	5,38	6,39	5,65	- 0,86
177,5	88,8	0,5145	0,2572	6,41	5,14	6,32	5,53	- 1,03
202,9	101,4	0,5880	0,2940	6,32	5,14	6,31	5,39	- 1,06

Таблица 4.1 – Результаты измерения коэрцитивной силы при нагружении трубного образца внутренним давлением

Графики на рисунке 4.2 показывают, что изменение коэрцитивной силы и ее анизотропии происходит при увеличении внутреннего давления, обеспечивающего значения кольцевых напряжений до 50 % от предела текучести материала. При дальнейшем увеличении кольцевых напряжений значения коэрцитивной силы и ее анизотропии не изменяются.

6,47

6,46

5,26

5,18

6,36

6,30

5,31

5,41

-1,13

-1,09

228,2

253,6

114,1

126,8

0,6615

0,7350

0,3307

0,3675



Рисунок 4.3 – Изменение коэрцитивной силы трубного образца при нагружении внутренним давлением

Далее следует отметить, что отрицательные значения АКС являются признаком деформации сжатия плоского образца при его одноосном нагружении (см. рисунок 1.7). В то же время известно, что стенка незащемленного трубопровода с заглушенными торцами находится в условиях плоского напряженного состояния, составляющими компонентами которого являются кольцевые ($\sigma_{\kappa II}$) и растягивающие продольные напряжения (σ_{np}) (рисунок 4.4, а. Плоское напряженное состояние трубопровода сводится к одноосному растяжению с эквивалентными напряжениями ($\sigma_{3кв}$) как показано на рисунке 4.4, б.



Рисунок 4.4 – Схема действия главных (а) и эквивалентных (б) напряжений в стенке трубы и главных напряжений в плоском растянутом образце (в)

121

Согласно энергетической теории прочности эквивалентные напряжения для плоского напряженного состояния равны:

$$\sigma_{_{\mathcal{SKB}}} = \sqrt{\sigma_{_{\mathcal{K}\!u}}^2 - \sigma_{_{\mathcal{K}\!u}}\sigma_{_{np}} + \sigma_{_{np}}^2} \tag{4.1}$$

Кольцевые напряжения $\sigma_{\kappa \mu}$ (МПа) в стенке трубопровода могут быть вычислены по следующей формуле:

$$\sigma_{\kappa q} = \frac{p(D_{H} - 2\delta)}{2\delta}$$
(4.2)

где p – внутреннее давление в трубопроводе, МПа; D_н – наружный диаметр трубопровода, мм; δ – толщина стенки, мм.

При измерении значений коэрцитивной силы H_c^{\perp} и H_c^{\parallel} на трубе вышеуказанное направление положения датчика связано с положением продольной оси трубопровода, а не с направлением действия эквивалентных напряжений, как это происходит при одноосном нагружении плоских образцов. Таким образом, при проектном сочетании нагрузок в трубопроводе, т.е. когда кольцевые напряжения больше абсолютного значения продольных напряжений, значение коэрцитивной силы H_c^{\perp} , измеренной на трубопроводе, соответствует значению коэрцитивной силы H_c^{\parallel} , измеренной на образце, т.е. при вышеназванной схеме измерения коэрцитивной силы характер ее изменения, а также характер изменения АКС на трубопроводе при сжатии будет таким, как это происходит на растянутом образце, а при растяжении таким, как это происходит на сжатом образце. Для обеспечения одинакового характера изменения АКС при растяжении-сжатии плоских образцов и при деформировании трубы с внутренним давлением, не изменяя вышеописанную схему измерения коэрцитивной силы в процессе испытаний, АКС для труб с внутренним давлением следует определять по следующей формуле:

$$\Delta H_c = (H_{c(1)}^{II} + H_{c(2)}^{II})/2 - (H_{c(1)}^{\perp} + H_{c(2)}^{\perp})/2$$
(4.3)

С учетом вышеизложенного и формулы (4.3) градуировочная зависимость АКС от эквивалентных напряжений для испытанного трубного образца будет иметь вид, показанный на рисунке 4.5.

На практике по результатам измерений коэрцитивной силы требуется оценить соответствие НДС трубопровода установленным требованиям. При одноосном НДС по градуировочной зависимости находят значение напряжений, которое соответствует АКС, рассчитанной по результатам измерений. При плоском напряженном состоянии эта задача несколько усложняется, т. к. для оценки соответствия НДС трубопровода установленным требованиям необходимо определить значение продольных напряжений, а градуировочная зависимость для параметра АКС позволяет определить только значение эквивалентных напряжений. В этом случае значение продольных напряжений определяют расчетом по формуле (4.1) с учетом зависимости (4.2).

Сначала по значениям эквивалентных σ_{экв} и кольцевых σ_{кц} напряжений определяется вид продольных напряжений: сжимающие или растягивающие.

В том случае если $\sigma_{3KB} \ge \sigma_{KU}$, то продольные напряжения $\sigma_{np} < 0$, т. е. сжимающие, рассчитываемые по следующей формуле:



$$\sigma_{np} = 0.5\sigma_{\kappa q} - \sigma_{\kappa q} \sqrt{1 - 0.75 \left(\frac{\sigma_{\kappa q}}{\sigma_{\kappa q}}\right)^2}$$
(4.4)

Рисунок 4.5 – Градуировочная зависимость АКС от напряжений для трубного образца, нагруженного внутренним давлением

В том случае если $\sigma_{3\kappa B} < \sigma_{\kappa u}$, то продольные напряжения $\sigma_{np} > 0$, т. е. растягивающие, рассчитываемые по следующей формуле:

$$\sigma_{np} = 0.5\sigma_{\kappa u} \pm \sigma_{\kappa u} \sqrt{1 - 0.75 \left(\frac{\sigma_{\kappa u}}{\sigma_{\kappa u}}\right)^2}$$
(4.5)

При расчете по формуле (4.5) получаются два значения продольных напряжений. В качестве расчетного значения продольных напряжений принимают то значение, которое

меньше значения кольцевых напряжений. Если этому условию удовлетворяют оба из полученных значений, то в качестве расчетного значения принимают большее из них.

Следует отметить, что, для магистрального трубопровода более опасными являются сжимающие продольные напряжения, а не растягивающие.

Рассмотрим порядок определения продольных напряжений для трубного образца, использованного при построении градуировочной зависимости, приведенной на рисунке 4.5.

От действующих нагрузок в стенках трубного элемента возникают следующие напряжения: $\sigma_{\kappa \mu} = 126,8$ МПа, $\sigma_{np} = 63,4$ МПа. При проведении измерений из этих двух значений известно только значение кольцевых напряжений. По результатам измерения коэрцитивной силы ее анизотропия составила 0,72 А/см.

На основании результатов измерений по градуировочной зависимости определяем значение эквивалентных напряжений. При АКС 0,72 А/см эквивалентные напряжения составляют 110 МПа, рисунок 4.6.





Таким образом, σ_{экв} = 110 МПа < σ_{кц} = 126,8 МПа, т. е. продольные напряжения растягивающие. Значения продольных напряжений рассчитываем по формуле (4.5):

$$\sigma_{np} = 0.5 \cdot 126.8 \pm 110 \sqrt{1 - 0.75 \left(\frac{126.8}{110}\right)^2} = 63.4 \pm 6.4;$$

 $\sigma_{\pi p(1)} = 57,0 \text{ M}\Pi a; \sigma_{\pi p(2)} = 69,8 \text{ M}\Pi a.$

Оба из полученных значений меньше значения кольцевых напряжений, поэтому для оценки соответствия НДС нормативным требованиям значение продольных напряжений принимаем равным большему из полученных значений, т. е. $\sigma_{np} = \sigma_{np(2)} = 69,8$ МПа. Расчетное значение продольных напряжений в этом случае превышает фактическое значение на 10,1 %.

4.2. Методика оценки напряженно-деформированного состояния газопроводов по магнитным характеристикам металла

4.2.1. Подготовка и проведение измерений

Сущность метода заключается в измерении магнитных характеристик (коэрцитивной силы) металла труб на потенциально опасном участке (ПОУ) трубопровода, определении значений механических напряжений на основании полученных результатов и сопоставлении НДС трубопроводов с нормативными требованиями.

Для проведения измерений используют следующее оборудование.

1. Ультразвуковой толщиномер с погрешностью измерения не более 0,1 мм (УТ 93П, «KraUtkramer», DME DL).

2. Прибор для измерения значений коэрцитивной силы от 1,0 до 15,0 А/см (коэрцитиметр КРМ-Ц-К2М).

На основании предварительного расчета параметров НДС трубопровода с использованием результатов определения его пространственного положения определяют местоположение точек проведения измерений. Контрольные точки назначают исходя из технической возможности проведения измерений преимущественно на верхней образующей трубопроводов.

Обозначают точки проведения измерений на объекте. При необходимости выполняют корректировку их положения, сдвигая вдоль оси трубопровода вперед или назад, в зависимости от наличия факторов, не позволяющих выполнить измерения (наличие сварного шва и т. п.).

В местах проведения измерений должен быть обеспечен доступ к поверхности трубопровода, т. е. при наличии изоляционного покрытия (противокоррозионного, противошумного и т. п.) производят его локальное удаление на участке, обеспечивающем возможность установки измерительного датчика вдоль и поперек оси трубопровода. Для коэрцитиметра КРМ-Ц-К2М рекомендуемый размер площадки для проведения измерений составляет 150 × 150 мм. При наличии на поверхности трубопроводов клеевого слоя покрытия, измерения проводят без его удаления. В каждой точке контроля ультразвуковым толщиномером измеряют фактическое значение толщины стенки трубопровода. На основании данных диспетчерской службы фиксируют режимы (давление, температура) эксплуатации трубопроводов в процессе проведения измерений.

Производят настройку измерительного прибора на калибровочных образцах. Коэрцитиметр КРМ-Ц-К2М настраивают на двух калибровочных образцах: КР-1, имеющем коэрцитивную силу 2,9 А/см, и КР-2, имеющем коэрцитивную силу 15,0 А/см. Настройку измерительного прибора выполняют в соответствии с положениями инструкции по его эксплуатации.

После настройки измерительного прибора на калибровочных образцах в каждой точке контроля выполняют измерения коэрцитивной силы в четырех направлениях:

1) вдоль продольной оси трубопровода $H_{c(1)}^{II}$;

2) поперек продольной оси трубопровода $H_{c(1)}^{\perp}$;

3) вдоль продольной оси трубопровода с разворотом датчика на 180° относительно положения (1) $H_{a(2)}^{II}$;

4) поперек продольной оси трубопровода с разворотом датчика на 180° относительно положения (2) $H_{c(2)}^{\perp}$.

После проведения измерений коэрцитивной силы в 10 – 15 контрольных точках проверяют стабильность настроек коэрцитиметра на контрольных образцах и при необходимости осуществляют подстройку прибора в соответствии с положениями инструкции по его эксплуатации.

По результатам измерения коэрцитивной силы в каждой точке контроля рассчитывают значение АКС по формуле (4.3).

4.2.2. Расчет механических напряжений по результатам определения пространственного положения трубопровода

Эквивалентные напряжений σ_{3KB} в металле труб определяют по градуировочным зависимостям «АКС – эквивалентные напряжения» или «АКС – относительное значение эквивалентных напряжений по отношению к пределу текучести материала». Градуировочная зависимость для участков МГ Бованенково – Ухта из стали К60 имеет следующий вид:

$$\Delta \overline{H}_{c} = -0,000012\overline{\sigma}^{3} + 0,00061\overline{\sigma}^{2} + 0,233\overline{\sigma} + 2,64$$
(4.6)

где

Градуировочная зависимость для участков МГ Бованенково – Ухта из стали К65 имеет следующий вид:

 $\Delta \overline{H}_{c} = \frac{2\Delta H_{c}}{H_{c(1)}^{\perp} + H_{c(2)}^{\perp} + H_{c(1)}^{II} + H_{c(2)}^{II}} 100\%; \ \overline{\sigma} = \frac{\sigma_{_{\mathfrak{H}\mathfrak{B}}}}{\sigma_{_{\mathfrak{m}}}} 100\%.$

$$\Delta \overline{H}_{c} = 0,000005\overline{\sigma}^{3} + 0,00061\overline{\sigma}^{2} + 0,133\overline{\sigma} + 5,35 \tag{4.7}$$

Значения кольцевых напряжений окц в стенках труб ПОУ МГ вычисляют по формуле:

$$\sigma_{\rm KII} = \frac{k_p p_{noy}(D_n - 2\delta)}{2\delta} \tag{4.8}$$

где k_p – коэффициент надежности по внутреннему давлению, принимаемый равным k_p = 1,1; D_{μ} – наружный диаметр газопровода, мм; δ – фактическая толщина стенки трубы, мм, (при отсутствии данных о фактической толщине стенки из-за отсутствия возможности доступа к трубе, например, на ПОУ, не вышедших на дневную поверхность, допускается использовать нормативное значение толщины стенки).

Значения продольных напряжений σ_{np} вычисляют по формуле:

$$\sigma_{\rm np} = \mu \sigma_{\rm \kappa q} - \alpha E \Delta t \pm \sigma_u \tag{4.9}$$

где μ – коэффициент поперечной деформации материала труб (переменный); α – коэффициент линейного расширения металла труб, град– 1; Е – модуль деформации материала труб (переменный), МПа; Δt – расчетный температурный перепад, °C, определяемый по формуле:

$$\Delta t = t_{noy} - t_{e} \tag{4.10}$$

t_в – температура наружного воздуха при окончательной сборке («захлесте») ПОУ МГ, °С; σ_и – значения изгибных напряжений в сечении ПОУ МГ, МПа, определяемые по формуле:

$$\sigma_{\mu} = \frac{ED_{\mu}}{2\rho} \tag{4.11}$$

где ρ – радиус упругого изгиба оси ПОУ МГ, м, определяемый по данным геодезического обследования положения трубы:

$$\rho = \frac{1}{y''(x)} \tag{4.12}$$

где уII(x) – вторая производная уравнения оси ПОУ МГ.

В ходе геодезической съемки ПОУ МГ определяют план и профиль открытых участков и (или) положение деформировавшихся подземных участков, в том числе прилегающих к открытому участку. При определении плана и профиля принимают следующее направление координат: х – линейная координата по длине ПОУ МГ, у – координата верха трубы в вертикальной плоскости, z – координата верха трубы в горизонтальной плоскости.

Уравнение оси ПОУ МГ в вертикальной и горизонтальной плоскостях представляют полиномом P_m m-ой степени, аппроксимируя координаты х и у (х и z), полученные геодезическим методом:

$$y = P_m(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m$$
(4.13)

Для горизонтальной плоскости в полиноме (4.13) и последующих расчетных выражениях вместо координаты у используют координату z.

Степень полинома определяют из минимума сумм квадратов разностей

$$S_m = \min(S_2; S_2;), \ S = \sum_{i=1}^n [P_m(x_i) - y_i]^2.$$
 (4.14)

Рекомендуется проводить сглаживание экспериментальных данных на ПОУ МГ, имеющего пять точек контроля с шагом $(5 - 10)D_{H}$. На таком участке, как правило, аппроксимация координат оси (x, y) может быть выполнена квадратичной параболой $y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$. В этом случае минимальный радиус изгиба оси ПОУ МГ на основании формулы (4.13) составит:

$$\rho = \frac{1}{2a_2} \,. \tag{4.15}$$

Для определения коэффициентов *a*₀, *a*₁, *a*₂ решают систему уравнений, полученную на основании метода наименьших квадратов:

$$na_{0} + a_{1} \sum_{i=1}^{n} x_{i} + a_{2} \sum_{i=1}^{n} x_{i}^{2} = \sum_{i=1}^{n} y_{i};$$

$$a_{0} \sum_{i=1}^{n} x_{i} + a_{1} \sum_{i=1}^{n} x_{i}^{2} + a_{2} \sum_{i=1}^{n} x_{i}^{3} = \sum_{i=1}^{n} x_{i} y_{i};$$

$$a_{0} \sum_{i=1}^{n} x_{i}^{2} + a_{1} \sum_{i=1}^{n} x_{i}^{3} + a_{2} \sum_{i=1}^{n} x_{i}^{4} = \sum_{i=1}^{n} x_{i}^{2} y_{i}.$$

$$(4.16)$$

Процедура решения системы (4.16) повторяется для каждой контрольной точки, исключая по две точки на концах ПОУ МГ.

При полном снятии нагрузки от внутреннего давления может быть установлен характер действовавших напряжений в трубопроводе при его эксплуатации.

В том случае, если после снятия нагрузок значения коэрцитивной силы соответствуют значениям коэрцитивной силы материала в ненагруженном состоянии, а также отсутствует

анизотропность магнитных свойств в продольном и поперечном направлениях, то при нагружении материал испытывал только упругие деформации.

В том случае, если после снятия нагрузки значения коэрцитивной силы превышают значения коэрцитивной силы материала в ненагруженном состоянии, а также появляется анизотропность магнитных свойств в продольном и поперечном направлениях, то при нагружении материал испытывал не только упругие, но и пластические деформации. При этом более значительное отличие значений коэрцитивной силы после снятия нагрузки от значений коэрцитивной силы материала в ненагруженном состоянии, а также увеличение анизотропности магнитных свойств материала в ненагруженном состоянии указывает на более высокую степень пластического деформирования металла при действовавших нагрузках.

4.2.3. Оценка соответствия параметров напряженно-деформированного состояния трубопроводов нормативным требованиям

Оценку прочности ПОУ МГ выполняют по методу допускаемых напряжений, т. е. путем сопоставления фактических и допускаемых значений кольцевых $\sigma_{\kappa u}$, продольных σ_{np} и эквивалентных напряжений $\sigma_{3\kappa e}$. При этом допускаемые напряжения определяются как произведение нормативного минимального предела текучести и нормативного минимального предела прочности материала труб на соответствующие расчетные коэффициенты. Согласно СТО Газпром 2-2.1-249 условия прочности записываются в следующем виде:

$$\sigma_{_{\kappa q}} \le \min \left\{ F_{_{y}} \sigma_{_{m}}; F_{_{u}} \sigma_{_{s}} \right\}; \tag{4.17}$$

$$\sigma_{np} \le 0.9\sigma_{\rm T}, ecnu \ \sigma_{np} \ge 0; \tag{4.18}$$

$$\sigma_{\rm and} \le 0.9\sigma_{\rm T}, ecnu \ \sigma_{\rm np} < 0, \tag{4.19}$$

где F_y , F_u – расчетные коэффициенты по пределу текучести и по пределу прочности, соответственно, принимаемые по таблице 4.2 в зависимости от категории ПОУ МГ; σ_m – нормативный предел текучести материала труб; σ_{θ} – нормативный предел прочности (временное сопротивление) материала труб.

Таблица 4.2 – Значения расчетных коэффициентов F_y, F_u

Категория участка газопровода	F_y	F_{u}
Н (нормальная)	0,72	0,63
С (средняя)	0,60	0,52
В (высокая)	0,50	0,43

Нормативные значения предела текучести σ_m и предела прочности σ_6 труб из сталей классов прочности К60 и К65, использованных при сооружении МГ Бованенково – Ухта, приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Нормативные значения основных механических характеристик труб из сталей К60 и К65

Класс прочности	Временное сопротивление <i>о</i> в, МПа	Предел те- кучести <i>о</i> _m , МПа	Ударная вязкость основного металла при температуре – 40 °C, Дж/см ²	<i>σ_m/σ_в</i> , не более	Относительное удлинение, δ5,%, не менее
К60	590	485	63	0,93	18
К65	640	555	70	0,92	18

Прочность ПОУ МГ обеспечена в том случае, если выполняются все условия (4.17 – 4.19). Отношение значений допускаемых и фактических напряжений определяет запас прочности ПОУ МГ по кольцевым и продольным напряжениям.

4.3. Опробование методики определения механических напряжений по коэрцитивной силе на стенде, моделирующем изгиб газопровода

Опробование коэрцитиметрического метода измерения напряжений выполнено на трубной плети, сваренной из 14 труб класса прочности К60 наружным диаметром 1420 мм. Общая протяженность трубной плети составила 162 м. Разный уровень механических напряжений в сечениях трубной плети по ее длине был создан путем изгиба оси трубной плети в результате воздействия равномерно распределенной поперечной нагрузки, обусловленной собственным весом труб. Для этого смонтированная трубная плеть была установлена на две грунтовые опоры, возведенные на концевых участках трубной плети (рисунок 4.7). Линейные координаты поперечных осей опор составили 21,5 и 124,2 м. Конфигурацию трубной плети определяли методом геометрического нивелирования верхней образующей труб в контрольных точках, рисунок 4.8. Значения изгибных напряжений определяли по профилю упругой линии трубной плети. Для исключения ошибок измерений при нивелировании, которые могут дать ложные максимумы напряжений, в расчетах использовали конфигурацию оси, получаемую после сглаживания высотных отметок по результатам нивелирования (см. п. 4.2.2 настоящей диссертации) [50].



Рисунок 4.7 – Общий вид трубной плети, смонтированной для проведения измерений

Для определения изгибных напряжений профиль упругой линии трубной плети с достоверностью 0,99979 был сглажен полиномом шестой степени:

$$y = 6,645 \cdot 10^{-12} x^6 - 2,7218 \cdot 10^{-9} x^5 + 3,3796 \cdot 10^{-7} x^4 - 8,17505 \cdot 10^{-6} x^3 - (4.20)$$
$$-3,4834 \cdot 10^{-4} x^2 - 0,03427x + 3,922.$$

Результаты определения напряжений приведены на рисунке 4.9. Полученные данные показывают, что верхняя образующая трубной плети на отрезке с 27,4 по 106,7 м подвержена сжимающим напряжениям, а концевых участки – растягивающим. Максимальное значение сжимающих изгибных напряжений, равное 272,7 МПа, наблюдается в поперечном сечении трубной плети с координатой 66 м. Следует отметить, что полином шестой степени не в полной мере отражает распределение изгибных напряжений по длине трубной плети. А именно: он хорошо описывает положение экспериментальных точек в средней части трубной плети, а на концевых участках его конфигурация не соответствует фактической. В этой связи при расчете изгибных напряжений по сглаженной конфигурации оси трубной плети полиномом шестой степени не наблюдается тенденции снижения к нулю абсолютного значения напряжений на ее концевых участках, хотя концевые участки трубной плети, находящиеся за переделами грунтовых опор, представляют собой консоли, т. е. в начале (0 м) и конце (162 м) трубной плети значения изгибных напряжений должны быть равны нулю.





Рисунок 4.9 – Распределение изгибных напряжений на верхней образующей трубной плети

Исходя из вышеизложенного концевые участки трубной плети с 0 по 15 м и с 144 по 162 м (на рисунке 4.9 отмечены серым цветом) не были использованы при опробовании коэрцитиметрического метода измерения напряжений.

Для оценки относительного уровня напряжений в контрольных сечениях трубной плети были определены значения механических характеристик (предел прочности, условный предел текучести, относительное удлинение) каждой трубы, входящей в состав трубной плети. Механические характеристики определяли прибором ПИМ-ДВ-1. Измерения выполняли на верхней образующей труб после их монтажа в трубную плеть, но до установки трубной плети на грунтовые опоры. Точки контроля располагали на расстоянии 1 м от кольцевого сварного шва, располагающегося у начала трубы в соответствии с выполненной разметкой трубной плети по ее длине. Результаты выполненных измерений приведены в таблице 4.4.

Порядковый номер трубы	Линейная координата, м	σв, МПа	σ _т , МПа	δ5, %
1	0-11,5	628	506	19
2	11,5 – 23,1	612	496	20
3	23,1-34,7	615	503	19
4	34,7 - 46,3	596	486	20
5	46,3 - 57,8	615	500	20
6	57,8 - 69,3	600	487	20
7	69,3 - 80,8	610	493	20
8	80,8-92,4	620	495	20
9	92,4 – 103,9	600	489	20
10	103,9 - 115,5	618	504	19
11	115,5 - 127,0	610	498	19
12	127,0-138,7	605	490	20
13	138,7 – 150,3	630	510	19
14	150,3 - 162,0	615	502	19

Таблица 4.4 – Механические характеристики материала труб

Значения коэрцитивной силы измеряли в контрольных точках, расположенных на верхней образующей трубной плети с шагом 3 м. Результаты проведенных измерений, а также значения относительных изгибных напряжений в каждой контрольной точке на отрезке трубной плети с 18 по 241 м представлены в таблице 4.5.

Анализ полученных данных показал следующее. НДС трубной плети после установки на грунтовые опоры изменяется по длине весьма существенно, а именно:

Координата точки контроля м	Н ^{II} _{c(1)} , А/см	Н _{с(1)} , А/см	Н ^{II} _{c(2)} , А/см	Н _{с(2)} , А/см	ΔH _c , А/см	$\Delta \overline{H}_{c}$, %	$\overline{\sigma}$, %
1	2	3	4	5	6	7	8
18	4.35	3,80	4,39	4,00	- 0,47	6,0	16,6
21	4,32	3,81	4,22	3,83	- 0,45	5,6	11,9
24	4,01	3,63	4,13	3,61	- 0,45	5,2	6,5
27	3,93	3,56	3,85	3,50	- 0,36	4,1	0,9
30	3,62	3,85	3,78	3,97	0,21	3,9	5,0
33	3,64	4,03	3,54	4,25	0,55	7,1	11,1
36	3,52	4,21	3,60	4,21	0,65	7,7	17,7
39	3,97	4,56	3,97	4,68	0,65	7,6	23,8
42	3,98	4,80	3,98	4,86	0,85	9,6	29,6
45	3,88	4,96	3,80	4,84	1,06	12,1	35,1
48	3,96	5,00	4,04	5,02	1,01	11,2	38,9
51	3,82	5,13	3,90	5,09	1,25	13,9	43,2
54	4,02	5,20	3,92	5,24	1,25	13,6	46,9
57	3,96	5,30	3,98	5,38	1,37	15,8	49,9
60	4,06	5,57	4,16	5,45	1,40	14,6	53,6
63	4,26	5,62	4,20	5,70	1,43	14,5	55,2
66	4,28	5,68	4,16	5,76	1,50	15,1	56,0
69	4,16	5,80	4,26	5,82	1,60	16,0	56,0
72	3,93	5,40	4,01	5,60	1,53	16,2	54,4
75	3,86	5,16	3,74	5,26	1,41	17,1	52,8
78	3,70	5,00	3,70	5,06	1,33	15,2	50,4
81	3,74	5,00	3,68	5,02	1,30	14,9	47,0
84	3,78	5,10	3,76	4,94	1,25	14,2	43,1
87	3,90	5,12	3,82	4,90	1,15	13,0	38,6
90	3,82	4,80	3,84	4,86	1,00	12,9	33,5
93	3,81	4,74	3,99	4,66	0,80	9,3	28,2
96	3,76	4,36	3,82	4,46	0,62	7,6	22,1
99	3,66	4,20	3,62	4,28	0,60	7,6	15,7
102	3,60	4,00	3,52	4,04	0,46	5,8	9,1
105	3,14	3,46	3,08	3,36	0,30	4,6	2,3
108	3,70	3,40	3,58	3,44	- 0,22	3,1	4,2
111	3,78	3,54	3,84	3,50	- 0,29	4,2	10,4
114	4,00	3,52	4,08	3,60	- 0,48	6,3	16,3
117	4,34	3,66	4,26	3,54	- 0,70	8,9	22,0
120	4,40	3,60	4,50	3,68	- 0,81	10,0	26,8
123	4,50	3,72	4,62	3,64	- 0,88	12,0	30,7
126	4,62	3,76	4,68	3,64	- 0,95	12,4	33,5
129	4 71	3 70	4 75	3 76	- 1.00	13.2	35.5

132

4,64

3,68

4,58

3,74

- 0,90

13,0

35,5

Таблица 4.5 – Результаты измерения коэрцитивной силы в контрольных точках трубной плети

1	2	3	4	5	6	7	8
135	4,73	3,70	4,67	3,70	- 1,00	11,9	33,6
138	4,52	3,70	4,44	3,66	- 0,80	9,8	29,7
141	4,36	3,56	4,24	3,62	- 0,71	9,7	22,6

Продолжение таблицы 4.5

– верхняя образующая средней части трубной плети с 27,4 по 106,7 м испытывает сжимающие деформации, при этом значения напряжений в контрольных сечениях изменяются от 11,6 до 272,7 МПа, а по отношению к пределу текучести труб от 2,3 до 56,0 %;

– концевые участки трубной плети испытывают растягивающие деформации, при этом значения напряжений в контрольных сечениях изменяются от 4,4 до 174,0 МПа, а по отношению к пределу текучести труб от 0,9 до 35,5 %.

Во всех точках контроля, в которых материал труб испытывает растягивающие деформации (концевые участки трубной плети) значения коэрцитивной силы, измеренной вдоль образующей трубы, выше, чем коэрцитивная сила, измеренная поперек образующей трубы, а в точках контроля, в которых материал труб испытывает сжимающие деформации (средняя часть трубной плети) более высокие значения коэрцитивной силы зафиксированы при ее измерении поперек образующей трубы.

Значения коэрцитивной силы H_c^{\perp} изменялись от 3,36 до 5,82 А/см, значения коэрцитивной силы H_c^{\parallel} – от 3,08 до 4,75 А/см, абсолютные значения АКС ΔH_c – от 0,21 до 1,60 А/см, а относительные значения АКС – от 3,1 до 17,1 %. Более высокие значения коэрцитивной силы и ее анизотропии зарегистрированы в зонах с максимальными расчетными изгибными напряжениями.

После анализа результатов выполненных измерений и расчетов они были использованы для оценки погрешности отношения (σ/σ_{T}), вычисляемого по результатам коэрцитиметрического контроля с использованием градуировочной зависимости (4.7), а также соответствия значений механических напряжений в сечениях трубной плети по результатам расчета и коэрцитиметрического контроля. Зависимость относительной анизотропии от относительного уровня напряжений, построенная на основании результатов выполненных измерений, показана на рисунке 4.10, а сопоставление значений механических напряжений в контрольных сечениях трубной плети – на рисунке 4.11.

Анализ экспериментальных и расчетных данных показал следующее.

По результатам измерения коэрцитивной силы значения изгибных напряжений в сечениях трубной плети могут быть как больше, так и меньше их фактических значений. Наиболее значительная погрешность определения напряжений наблюдается при невысоком уровне НДС труб в контрольном сечении, а именно, когда значения напряжений не превышают 20 % от предела текучести материала труб. В этом случае погрешность определения напряжений может составлять сотни процентов, т. е. значения напряжений по результатам коэрцитиметрического контроля могут быть в несколько раз выше фактических. Наряду с этим следует отметить, что, даже с учетом выявленной высокой погрешности определения значений напряжений, НДС таких участков газопровода весьма незначительное, которое не влияет на безопасную эксплуатацию объекта и не представляет большого интереса на стадии эксплуатации МГ.



экспериментальные данные; 2 – расчетные значения по формуле (4.7)
 Рисунок 4.10 – Зависимость относительной анизотропии от относительного уровня изгибных напряжений

В контрольных сечениях со значениями напряжений более 20 % от предела текучести материала труб максимальная погрешность определения напряжений составила 18,1 %, при этом средняя погрешность была равна 8,6 %. При этом в контрольных точках, в которых значения напряжений превышали 50 % от предела текучести материала труб, погрешность определения напряжений не была больше 10 %. Таким образом, градуировочная зависимость (4.7) может быть использована для оценки напряженного состояния изгибнонапряженного газопровода из труб класса прочности К60 на участках с изгибными напряжения напряжения материала текучести материала.

4.4. Выводы по главе 4

В ходе проведенных исследований установлено следующее.

Опробование коэрцитиметрического метода для определения значений напряжений на изгибно-напряженном участке из труб класса прочности К60 показало, что использование градуировочной зависимости относительной АКС от относительного уровня напряжений, полученной для стали класса прочности К60, позволяет определить значения механических напряжений с достаточной для практики точностью на участках газопровода с изгибными напряжениями, превышающими 20 % предела текучести материала, что представляет весьма важное значение при обеспечении безопасности на стадии эксплуатации МГ.



σ_{ΔHc} – механические напряжения, рассчитанные по результатам измерения коэрцитивной силы; σ_{y(x)} – механические напряжения, рассчитанные по конфигурации оси трубной плети;
 1 – значения механических напряжений σ_{ΔHc} в контрольных точках; 2 – линия равенства значений напряжений σ_{ΔHc} и σ_{y(x)}; 3 – линия выполнения условия σ_{ΔHc} = 0,9σ_{y(x)}; 4 – линия выполнения условия σ_{ΔHc} = 0,8σ_{y(x)};

6 – линия выполнения условия $\sigma_{\Delta Hc} = 1, 2\sigma_{y(x)}$

Рисунок 4.11 – Сопоставление значений механических напряжений, рассчитанных по результатам измерения коэрцитивной силы и по конфигурации оси трубной плети

На основе результатов проведенных исследований, а также на основе анализа результатов испытания трубных образцов в процессе их нагружения внутренним давлением и изги-

138

по измерениям значений коэрцитивной силы и сопоставление НДС трубопроводов с нормативными требованиями. Кроме определения значений напряжений, методика позволяет установить характер деформаций (упругие, упругопластические), которые испытывал материал трубопровода при его эксплуатации.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРОБОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ТРУБ В ПРОЦЕССЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ ГАЗОПРОВОДА БОВАНЕНКОВО – УХТА

5.1. Обоснование выбора участков газопроводов для контроля свойств металла труб при испытаниях

МГ является сложной конструкцией, состоящей из неравнозначных по прочностным и надежностным характеристикам составных элементов, интегрированный во вмещающую среду (грунт), для которой он является чуждым. При этом на него оказываются нагрузки, предусмотренные проектом, и внешние воздействия, которые также распределены неравномерно и зависят от комплекса влияющих факторов, таких как конструктивное исполнение, применяемые материалы, особенности, приобретенные в процессе реализации технологических операций при строительстве.

На основе оценки возможности влияния внешних факторов на изменение технического состояния газопровода при испытаниях давлением 1,25p_{раб} определены общие критерии выбора участков, которые предрасположены к накоплению повреждений, зарождению и развитию дефектов при проведении испытаний (таблица 5.1) и сформированы «Рекомендации по выбору участков, предрасположенных к накоплению повреждений, зарождению и развитию дефектов при проведении пневматических испытаний МГ Бованенково – Ухта давлением 1,25 р_{раб}».

Таблица 5.1 – Критерии выбора участков мониторинга

участок из труо Ду 1420 × 23,0 К65 или Ду 1420 × 26,4 К60 (категория Н)
Ду 1420 × 23,0 К65
Ду 1420 × 26,4 К60
Стык труб Ду 1420 × 23,0 К65 и Ду 1420 × 26,4 К60
Конструктивное исполнение
Высокая обводненность (льдистость) вмещающего грунта и грунта засыпки
Засыпка местным грунтом в зимний период
Расположение на границе многолетнемерзлого и талого грунтов
Расположение в многолетнемерзлом грунте
Глубина траншеи (минимальная глубина)
Наличие кривых холодного гнутья (на одном из участков)
Отсутствие средств балластировки и закрепления
Теплоизоляция (наличие предпочтительно)
Наличие дополнительных проектных нагрузок
Участки, проложенные упругим изгибом (профиль, м.б. в плане)
Максимальная температура выполнения захлестов
Технологические факторы влияния
Сварное соединение в шурфе выполнено ручной дуговой сваркой (захлест)
Наличие дефектов сварного соединения (предпочтение – сварные соединения с максимальным уровнем дефект-
ности)

Продолжение таблицы 5.1

Рекомендации строительного контроля (ООО «Газпром трансгаз Ухта») по выбору объекта контроля на основе информации о качестве выполнения сварочно-монтажных работ

Для окончательного выбора участков мониторинга назначены весовые коэффициенты и разработана система балльной оценки факторов влияния (таблица 5.2).

downon program	3	Значимость		
Фактор влияния	Bec	Балльная оценка		
Типоразмер труб				
K65 1420 × 23,0	0.10	1,00		
K60 1420 × 26,4	0,10	0,00		
Стыковка				
Одинаковая толщина	0.05	0,00		
Разная толщина	0,05	1,00		
Тип шва				
Регулярный	0.12	0,00		
Захлест	0,12	1,00		
Качество шва				
Нет дефектов		0,00		
Смещение кромок		0,80		
Нарушение формы шва	0.07	0,50		
Плоскостные дефекты		0,70		
Объемные дефекты		0,50		
Смещение + плоскостной		1,00		
Температура сварки захлеста				
ниже – 20 °С		-0,50		
-20 °C < t < -10 °C		-0,20		
$-10 ^{\circ}\text{C} < t < 0 ^{\circ}\text{C}$	0,04	0,00		
$0 {}^{\circ}\mathrm{C} < t < 10 {}^{\circ}\mathrm{C}$		0,50		
t > 10 °C		1,00		
Упругий изгиб (проектный)				
Есть	0.05	1,00		
Нет	0,05	0,00		

блица 5.2 – Балльная оценка факторов в	влияния
блица 5.2 – Балльная оценка факторов в	влияния

Продолжение таблицы 5.2

	Значимость		
Фактор влияния	Bec	Балльная оценка	
Состав грунта			
Глина		1,00	
Торф		0,90	
0,03			
Суглинок		0,70	
Песок		0,30	
Обводненность (льдистость) грунта			
Низкая		0,00	
Средняя	0,04	0,50	
Высокая		1,00	
Характеристики грунта засыпки			
Привозной грунт		0,00	
Из траншеи (талый)	0,03	0,50	
Из траншеи (мерзлый)		1,00	
Рельеф местности по трассе			
Равнина		0,00	
Локальная ложбина	0,05	1,00	
Локальное всбугривание		1,00	
Чередование форм рельефа		0,80	
Расположение			
В талом грунте		1,00	
На границе мерзлого и талого	0,02	0,50	
В многолетнемерзлом		0,00	
Глубина траншеи			
1,5 < у < 2,0 м		1,00	
2,0 < у < 3,0 м	0,02	0,50	
больше 3,0 м		0,00	
Наличие кривых холодного гнутья			
Есть	0.02	1,00	
Нет	0,03	0,00	
Средства балластировки и закрепления			
Нет	0.02	1,00	
Есть	0,03	0,00	

Продолжение таблицы 5.2

Фактор влияния	Значимость	
	Bec	Балльная оценка
Наличие теплоизоляции		
Есть	0,02	1,00
Нет		0,00
Транспортная инфраструктура		
Достаточна	0,15	1,00
Недостаточна		0,00
Рекомендации строительного контроля		
Есть	0,15	1,00
Нет		0,00
	1,00	

5.2. Характеристика объектов исследований

Для проведения диагностирования газопровода в шурфах был выбран участок линейной части системы МГ Бованенково – Ухта, расположенный в непосредственной близости к г. Воркуте и на расстоянии 28,3 км на север от компрессорной станции Воркутинская (рисунок 5.1) [43, 44, 53].

Участок трассы газопровода прямолинейный, протяженность участка порядка 1 км, расположен между двумя 10°-ми углами поворота трассы.

В центре участка расположен крановый узел № 18, координата 406,0 км, координата компрессорной станции Воркутинская 434,3 км.

Расстояние от вдольтрассовой автодороги до газопровода (заезд на крановый узел № 18) порядка 750 м.

Площадка кранового узла находится на возвышенной равнине, в обе стороны от которой трасса газопровода находится на пологом уклоне.

Примерно в 500 м от северного¹ угла поворота рассматриваемого участка расположен ручей, а примерно в 2 км от южного угла поворота трассы местность заболочена.

Согласно данным проектной документации район местоположения шурфов на трассе газопроводов расположен на территории, относящейся к зоне тундры, комплексу пологоувалистых тундровых равнин.

¹ Введены условные ориентиры координат на участке газопровода: «юг» – по ходу движения транспортируемого газа, «север» – против хода движения газа.



Рисунок 5.1 – План расположения участка шурфования МГ Бованенково – Ухта (проект)

На участке она представлена тундрой мохово-кустарничковой, местами заболоченной. Мощность мохово-растительного слоя 0,2 м.

В геоморфологическом отношении участок газопровода располагается на поверхности ледниковой равнины.

Абсолютные отметки изменяются от 160,32 до 169,33 м. Рельеф участка не нарушен, но достаточно расчленен и имеет выраженный уклон на юг.

В рельефе участка наблюдаются промоины временных водотоков и замкнутые понижения небольшого диаметра.

Пониженные участки, являясь зонами разгрузки поверхностных вод, образуют небольшие озера и заболоченные территории.

В геологическом строении участка, на глубину пробуренных скважин (12,0 м), принимают участие верхнеплейстоценовые ледниковые (g QIII2) отложения и современные биогенные отложения (b QIV). Ледниковые отложения представлены суглинками от полутвердых до текучепластичных, супесями, песками пылеватыми. Биогенные отложения представлены торфом.

Геокриологические условия на участке газопровода характеризуются несплошным прерывистым и массивно-островным распространением многолетнемерзлых грунтов. Температура мерзлых грунтов на глубине нулевых амплитуд изменяется от минус 0,9 до 2,0 °C [51, 55].

Мерзлота несливающегося типа с заглубленной кровлей глубже 12 м. Грунты слоя сезонного оттаивания-промерзания представлены торфами среднеразложившимися, суглинками от текучепластичных до полутвердых. Сезонное протаивание грунтов начинается в июне и заканчивается в конце сентября. Расчетная глубина сезонного промерзания грунтов на участке составляет 2,4 м.

На участке отмечаются мерзлотные явления, связанные с процессами сезонного пучения грунтов, заболачивания, солифлюкции, эрозии. По степени морозной пучинистости грунты сезонноталого – сезонногомерзлого слоев относятся к сильнопучинистым.

По условиям строительного освоения площадка кранового узла № 18 относится к умеренно сложному, сложному типу (согласно карте районирования трассы газопровода по условиям строительного освоения ФГУП «Фундаментпроект»). Возможна активизация и возникновение новых экзогенных геологических процессов, мешающих нормальной эксплуатации инженерных сооружений или требующих применения специальных инженерных мероприятий [54].
Грунтовые воды вскрыты в скважинах на глубинах от 3,5 до 8,4 м. Грунтовые воды надмерзлотного типа, по характеру безнапорные, слабоминерализованные. Грунтовые воды функционируют в летний период.

Согласно данным проектной документации газопровод на участке шурфования выполнен из двух типов труб с наружным антикоррозионным и внутренним гладкостным покрытием:

– диаметром 1420 мм с толщиной стенки 27,7 мм из стали класса прочности К65 (участки категории «С»);

– диаметром 1420 мм с толщиной стенки 26,4 мм из стали класса прочности К60 (участки категории «Н»).

Результаты измерения толщины стенки труб показывают, что в шурфах № 1, 3, 4 газопровод выполнен из труб с номинальной толщиной стенки 26,4 мм, а в шурфе № 2 газопровод выполнен из стыкующихся труб с толщиной стенки 26,4 и 27,7 мм (таблица 5.3).

Номер шурфа	Труба № 1 (по ходу газа)	Труба № 2 (по ходу газа)		
	26,4	26,2		
1	26,1	26,2		
	26,3	25,9		
2	26,4	27,3		
	25,8	27,7		
	26,2	27,7		
	26,4	25,8		
3	26,2	25,8		
	26,4	25,9		
4	25,6	25,4		
	26,0	25,4		
	25,7	25,6		

Таблица 5.3 – Результаты измерения толщины стенки труб в шурфах, мм

Согласно акту освидетельствования скрытых работ разработка траншеи на участке шурфования выполнена одноковшовыми экскаваторами с обратной лопатой в период 10 – 12 апреля 2010 г. Учитывая зимние условия строительства линейной части, защита изоляционного покрытия газопровода на всем его протяжении обеспечена устройством подушки и обсыпки вокруг трубы из привозного минерального грунта, выполняющего также и противопучинную функцию.

Сварные швы газопровода выполнены электродуговой сваркой на бровке траншеи, после чего газопровод уложен в траншею трубоукладочной колонной традиционным способом непрерывной укладки. Согласно актам приемки укладки, балластировки и засыпки газопровода данные работы на участке шурфования выполнены в период 14 апреля –9 мая 2010 г.

Для закрепления газопровода в проектном положении и предотвращения его всплытия с целью обеспечения общей устойчивости газопроводов на участке шурфования выполнена балластировка с применением полимерно-контейнерных балластирующих устройств типа ПКБУ-МК-1420. Согласно актам приемки газопровода на участке шурфования (шурфы № 1, 2) ПК4054,22 – ПК4056,90 установлено 15 групп утяжелителей из четырех штук в каждой с шагом 17,5 м, заполненных привозным или местным грунтом.

Так как на участке шурфования прогнозируется положительная температура транспортируемого газа во всех расчетных режимах, поэтому теплоизоляция газопровода не предусмотрена.

На участке проведения диагностирования газопровода было выполнено четыре шурфа (рисунок 5.2). Нумерация шурфов введена с севера на юг участка.



Рисунок 5.2 – Схема местоположения шурфов для диагностирования газопровода

Шурфы выполняли путем откапывания газопровода до тех пор, пока не будет выявлен сварной стык, изолированный термоусаживаемой манжетой. Далее выполняли углубление шурфа на глубину менее 0,5 м ниже нижней образующей газопровода, снимали термоусаживаемую манжету, проводили пескоструйную очистку поверхности околошовной зоны сварного стыка. Далее проводили механическую очистку поверхности металла труб с помощью металлической щетки шлифовальной машины для неразрушающего контроля (чистота очистки околошовной зоны на расстоянии 200 мм в каждую сторону от шва R_z 40).

В каждом шурфе были подготовлены и обеспечены требуемые безопасные условия проведения работы с использованием лестниц, деревянных настилов для размещения оборудования на дне шурфа, палаточных укрытий от осадков и ветра, укрепляемых на трубе, местный подогрев воздуха в укрытии и металла трубы до температуры 20 – 30 °C с использованием термопоясов.

Вблизи шурфа № 2 было размещено стационарное помещение (балок) с обеспечением температуры воздуха в нем 20 °С и наличием источника переменного тока (220 В, 50 Гц) на все время испытаний.

Общий вид шурфов представлен на рисунке 5.3.





б



Рисунок 5.3 – Общий вид шурфов на газопроводе до (а, б) и после (в, г) проведения пневматических испытаний

Шурфы выполнены в период 21 – 28 апреля 2012 г. В этот же период выполнен первый этап диагностирования до проведения пневматических испытаний газопровода. Температура воздуха в данный период принимала значения в диапазоне от минус 15 до 5 °C. В шурфах вода отсутствовала, стенки шурфов не оплывали и не осыпались, грунт плотный. Мерзлых грунтов при откапывании шурфов не выявлено.

Второй этап диагностирования в шурфах выполнен в период 11 – 18 июня 2012 г. после проведения пневматических испытаний газопровода. Температура воздуха в данный период принимала значения в диапазоне от 10 до 25 °C. Шурфы полностью заполнены талой грунтовой водой, которую удаляли из шурфа при помощи экскаватора. После удаления воды стенки шурфа начинали оплывать и осыпаться, образуя на дне шурфа вязкий влагонасыщенный слой грунта. Проезд строительной техники на колесном ходу вдоль газопровода в силу значительного водонасыщения поверхности грунта стал невозможен.

5.3. Методы исследований

Для контроля основного металла труб и сварных соединений трубопровода применяли следующие методы диагностирования [39, 65, 74, 79, 81, 93]:

визуальный и измерительный контроль (ВИК) (выявление и оценка поверхностных дефектов);

- магнитопорошковый контроль (дублирующий контроль по результатам ВИК);

 – ультразвуковая толщинометрия (измерение фактической толщины стенки трубы, поиск несплошностей в металле труб);

 – ультразвуковой контроль сплошности металла труб (определение характера выявленных несплошностей по результатам толщинометрии);

– ультразвуковой контроль кольцевых сварных соединений в автоматизированном и ручном режимах в контактном варианте (поиск несплошностей в металле шва и околошовной зоне, дублирующий контроль и уточнение типа выявленных несплошностей, выявление плоскостных дефектов) [48];

 – радиографический контроль кольцевых сварных соединений (поиск несплошностей в металле шва и околошовной зоне, дублирующий контроль и уточнение типа выявленных несплошностей при помощи ультразвукового контроля, выявление объемных дефектов).

Для контроля характеристик физико-механических свойств металла труб применяли следующие методы диагностирования:

– определение твердости основного металла трубопровода, включая определение характеристик механических свойств металла труб по твердости на основе регистрации диаграммы вдавливания шара (по методу Бринелля) [1, 17, 105];

 – определение структурного состояния основного металла труб магнитным методом измерения коэрцитивной силы [26, 67, 105].

Измерения проводили на последовательно расположенных фрагментах поверхности металла трубы размерами 100 × 100 мм, размещенных по окружности труб, справа и слева от кольцевого сварного шва, на верхней, нижней и боковых образующих. Для удобства координатам фрагментов по окружности трубы были присвоены обозначения в часах по аналогии с часовым циферблатом (рисунок 5.4).



1 – продольный сварной шов трубы; 2 – кольцевой (монтажный) сварной шов;
 3 – торцевая кромка защитного покрытия, 4 – номер сечения
 Рисунок 5.4 – Схема расположения фрагментов (а)
 и рабочий момент (б) проведения измерения коэрцитивной силы

На каждом фрагменте металла трубы проводили серию измерений с пошаговым перемещением преобразователя коэрцитиметра вдоль оси газопровода через контрольные околошовные зоны сваренных труб с пересечением кольцевого сварного шва.

Для определения характеристик механических свойств металла труб газопровода по твердости использовали прибор ПИМ-ДВ-1. Принцип работы прибора ПИМ-ДВ-1 основан

на регистрации в реальном масштабе времени процесса упругопластического контактного деформирования материала в виде диаграмм в координатах «нагрузка – перемещение», «нагрузка – время» и «перемещение – время», при непрерывном вдавливании сферического индентора. Для проведения измерений поверхность металла трубы в месте измерения шлифовали до достижения шероховатости R_a не более 1,25.

Измерения проводили в шурфе № 4 на фрагменте металла, расположенном сверху трубопровода (рисунок 5.5). Всего выполнено 60 измерений.



Рисунок 5.5 – Схема расположения точек определения твердости до (а), после (б) пневматических испытаний (прибор ПИМ-ДВ-1)

5.4. Анализ характеристик напряженно-деформированного состояния газопровода при проведении пневматических испытаний

5.4.1. Укрупненная оценка протяженных участков газопровода

Выполнена укрупненная расчетная оценка напряжений в трубах категории «Н» на участке км 436,20 – км 657,95 МГ Бованенково – Ухта при проведении пневматических испытаний давлением 1,25p_{раб}. В результате анализа трассы участка газопровода между компрессорными станциями Воркутинская и Интинская (км 436,20 – км 657,95) выделены следующие два участка с экстремальными напряжениями:

протяженный прямолинейный участок ПК4535+48 – ПК4657+10;

– участок с двумя близкорасположенными углами поворота в плане ПК4362+18 – ПК4400+00.

Установлено, что значения напряжений в трубопроводе на прочих участках не будут превышать найденные экстремумы.

Исходными данными являются:

– расчетное внутрение давление воздуха при испытаниях $p_d = 1,25 p_{pa\delta} = 14,7$ МПа;

– температурный перепад $\Delta t = +30$ °C;

- минимальный радиус упругого изгиба R = 2500 м;
- модуль Юнга стали E = 2,1·10⁵ МПа;

-коэффициент Пуассона стали $\mu = 0,3;$

– характеристики труб (предел прочности σ_B , предел текучести σ_T , толщина стенки δ):

1) для труб К60 σ_B = 590 МПа, σ_T = 485 МПа, δ = 24,6 мм;

2) для труб К65 $\sigma_B = 640$ МПа, $\sigma_T = 555$ МПа, $\delta = 23,0$ мм.

Расчетный температурный перепад Δt определен как разность между температурой стенок трубопровода при испытаниях (принимается равной температуре грунта 0 °C) и минимально допустимой температурой проведения сварочных работ (принимается равной – 30 °C согласно рабочим чертежам).

Поскольку неизвестно фактическое использование труб К60 и К65 по участкам, расчеты проведены для двух вариантов отдельно.

В соответствии с правилами строительной механики продольные фибровые напряжения в прямолинейном трубопроводе при отсутствии продольных и поперечных перемещений определены по формуле (13.12) СТО Газпром 2-2.1-249 [115]. Кольцевые напряжения определены по формуле (13.7), эквивалентные напряжения по теории прочности Мизеса – по формуле (13.11). Принято, что касательными напряжениями можно пренебречь. Результаты вычислений представлены в таблице 5.4.

С повышением температуры стенок трубопровода продольные фибровые напряжения падают, а эквивалентные повышаются. Закономерности изменения этих процессов иллюстрируют графики на рисунке 5.6.

Следует отметить, что время нагнетания воздуха с повышенной температурой в трубопровод весьма продолжительно, поэтому к моменту достижения давления 1,25 $p_{pa\delta}$ температура стенок не будет существенно отличаться от температуры грунта (т. е. ≈ 0 °C).

На участке ПК4362+18 – ПК4400+00 расположены два значительных угла поворота трассы в плане (ПК4378+87 $\alpha_1 = 51^\circ$, ПК4390+50 $\alpha_2 = 31^\circ$) с относительно малым расстоянием между вершинами углов (L = 1163 м). Поскольку на углах поворота трубопровод получает наибольшие перемещения, в этих местах возникают значительные растягивающие напряжения.

		Значение		
Напряжения, МПа	Формула	для труб К60	для труб К65	
Кольцевые напряжения	$\sigma_{\kappa q} = \frac{p_d D}{2\delta}$	381,94	440,58	
Напряжения от эффекта	$\mu\sigma_{\kappa u}$	114,58	132,17	
Пуассона, вызванные стеснением деформации	$-E\alpha\Delta t$	- 75,6	- 75,6	
Напряжения от упругого изгиба	$\frac{ED}{2R}$	59,64	59,64	
Продольные фибровые напряжения	$\sigma_1 = \mu \sigma_{\kappa \mu} - E \alpha \Delta t + \frac{ED}{2R}$	98,62	116,21	
Эквивалентные напряжения	$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{\kappa q}^2 - \sigma_{\kappa q}\sigma_1 + \sigma_1^2}$	343,42	395,49	
Экстремальные напряжения	$\sigma_{extr} = \sigma_{\kappa \mu}$	381,94	440,58	
Отношение экстремальных напря- жений к пределу текучести	$\frac{\sigma_{extr}}{\sigma_m}$	0,787	0,794	
90 % от предела текучести	0,9 $\sigma_{_m}$	436,5	499,5	

Таблица 5.4 – Напряжения в прямолинейном участке трубопровода



Рисунок 5.6 – Зависимость продольных фибровых (a) и эквивалентных (б) напряжений от температуры стенок трубопровода

С целью учета геометрических особенностей структуры трассы и взаимодействия трубопровода с грунтом на данном участке проведен расчет при помощи программного комплекса CPipe 3.0.

Результаты расчета для труб К60 и К65 отличаются только количественно. Далее приводятся результаты для трубы К65, поскольку в этом случае напряжения выше.

Прямолинейные участки между углами поворота находятся в состоянии осевого растяжения с напряжениями ≈ 56 МПа. При прокладке упругим изгибом осевые напряжения дополнятся изгибными, т. е. фибровые напряжения составят ≈ 115 МПа.

Экстремальные фибровые напряжения имеют место на углах поворота и на данном участке составляют 142 МПа на угле поворота 51°= 6°× 8 + 3° (ВУ ПК4378+87). При кольцевых напряжениях 440,58 МПа эквивалентные напряжения равны 389,5 МПа. На рисунке 5.7 приведена картина распределения фибровых напряжений с экстремумом.



Рисунок 5.7 – Фибровые напряжения на угле поворота 51° (ВУ ПК4378+87)

Как следует из результатов вычислений, наибольшие растягивающие напряжения в трубопроводе на участках категории «Н» не превышают 90 % от предела текучести материала труб, равного $0.9\sigma_{T} = 436.5$ МПа для трубы К60 и $0.9\sigma_{T} = 499.5$ МПа для К65.

5.4.2. Расчет параметров напряженно-деформированного состояния газопровода на участке шурфования

Анализ НДС газопровода включал сопоставление уровня механических напряжений в стенке труб со значением предела текучести их материала. При расчете МГ рассматривают плоское напряженное состояние в каждой точке трубопровода. Компонентами плоского напряженного состояния являются кольцевые ($\sigma_{\kappa u}$) и продольные (σ_{np}) напряжения [8, 9, 15, 61, 70, 114].

Кольцевые напряжения в стенке труб определяют по формуле:

$$\sigma_{\kappa u} = \frac{p(D_u - 2\delta)}{2\delta}, \qquad (5.1)$$

где p – внутреннее давление в трубопроводе, МПа; D_н – наружный диаметр трубопровода, м; δ – толщина стенки трубы, м.

Продольные напряжения в стенке труб определяют по формуле:

$$\sigma_{np} = \mu \sigma_{\kappa \mu} - \alpha E \Delta t \pm \frac{E D_{\mu}}{2\rho}, \qquad (5.2)$$

где μ – коэффициент Пуассона; α – коэффициент линейного расширения металла труб, 1/град; Е – модуль упругости металла труб, МПа; Δt – температурный перепад, град; ρ – радиус упругого изгиба оси трубопровода, м.

Эквивалентные напряжения, характеризующие плоское напряженное состояние трубопровода, вычисляют по формуле:

$$\sigma_{_{\mathcal{SKG}}} = \sqrt{\left(\sigma_{_{\mathcal{K}\mathcal{U}}}\right)^2 - \sigma_{_{\mathcal{K}\mathcal{U}}}\sigma_{_{np}} + \left(\sigma_{_{np}}\right)^2}, \qquad (5.3)$$

При расчете НДС газопровода на участке устройства контрольных шурфов было учтено, что от ПК4041+20 до ПК4041+80 и от ПК4078+77 до ПК4079+37 ось газопровода в горизонтальной плоскости имеет трапецеидальную конфигурацию, что обеспечивает компенсацию продольных деформаций, возникающих на прилегающих участках газопровода при его нагружении. Расчет НДС выполняли для участков с номинальной толщиной стенки труб при сертификатных значениях механических характеристик материала, а также для участков газопровода в шурфах, исходя из фактических значений толщины стенки и механи-

ческих характеристик материала, установленных в процессе проведения диагностических работ.

В процессе анализа НДС газопровода были использованы следующие исходные данные:

а) наружный диаметр трубопровода (D_н) – 1420 мм;

б) номинальная толщина стенки трубопровода (δ_1) – 26,4 мм, (δ_2) – 27,7 мм;

в) минимальная толщина стенки труб в шурфах:

1) шурф № 1 – 26,1 мм (труба № 1), 25,9 мм (труба № 2);

2) шурф № 2 – 25,8 мм (труба № 1), 27,3 мм (труба № 2);

3) шурф № 3 – 26,2 мм (труба № 1), 25,8 мм (труба № 2);

4) шурф № 4 – 25,6 мм (труба № 1), 25,4 мм (труба № 2);

г) сертификатные значения механических характеристик металла труб с номинальной толщиной стенки 26,4 мм: временное сопротивление $\sigma_{\rm B} = -637 - 670$ МПа, предел текучести $\sigma_{0,2} = 535 - 558$ МПа, относительное удлинение $\delta_5 = 22,0 - 24,0$ %;

д) сертификатные значения механических характеристик металла труб с номинальной толщиной стенки 27,7 мм: временное сопротивление $\sigma_{B} = 658 - 696$ МПа, предел текучести $\sigma_{0,2} = 559 - 635$ МПа, относительное удлинение $\delta_{5} = 21,0 - 24,5$ %;

е) фактические значения механических характеристик металла труб с номинальной толщиной стенки 26,4 мм: временное сопротивление $\sigma_{\rm B} = 701 - 821$ МПа, предел текучести $\sigma_{0,2} = 507 - 625$ МПа, относительное удлинение $\delta_5 = 17,0 - 19,0$ %;

ж) рабочее давление в трубопроводе при эксплуатации р_{раб} = 11,8 МПа;

и) давление в трубопроводе при испытании (рисп1 = 1,1ppa6; рисп2 = 1,25ppa6);

к) температурный перепад (Δt) – 0 °С (вследствие наличия компенсационных участ-ков);

л) модуль упругости материала труб Е = 206000 МПа;

м) коэффициент Пуассона µ = 0,5 (вследствие наличия компенсационных участков);

н) коэффициент линейного расширения металла труб $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}$ 1/град;

п) трубопровод на участках устройства контрольных шурфов проложен прямолинейно, т. е. без упругого изгиба его оси. Следует отметить, что по данным проектной документации на участке между компенсаторами прокладка газопровода методом упругого изгиба использована в семи случаях. При этом на четырех участках (линейные координаты вершин углов поворота оси газопровода в вертикальной плоскости: ПК4045+00, ПК4048+00, ПК4066+00, ПК4068+00) минимальный радиус упругого изгиба оси трубопровода (ρ) составляет 4500 м, а на трех участках (линейные координаты вершин углов поворота оси газоРезультаты выполненных расчетов сведены в таблицы 5.5 и 5.6.

Таблица 5.5 –	Параметры	НДС газопровода
---------------	-----------	-----------------

	Для участков из труб с толщиной стенки 26,4 мм		Для участков из труб с толщиной стенки 27,7 мм			
Параметр	При	При испытании		При	При испытании	
	эксплуата- ции	р _{исп} =1,1р _{раб}	р _{исп} =1,25р _{раб}	эксплуата- ции	р _{исп} =1,1р _{раб}	р _{исп} =1,25р _{раб}
	На	и участках уст	ройства контр	ольных шурф	ОВ	
$σ_{\kappa \iota}$, ΜΠα	305,5	336,1	381,9	290,7	319,7	363,3
$\sigma_{\pi p}{}^{c \varkappa}$, МПа	152,8	168,1	191,0	145,3	159,9	181,7
$σ_{πp}^{p}$, ΜΠα	152,8	168,1	191,0	145,3	159,9	181,7
$\sigma_{_{3KB}}$ сж, МПа	264,6	291,1	330,8	251,7	276,9	314,6
$σ_{_{3KB}}$ ^p , MΠa	264,6	291,1	330,8	251,7	276,9	314,6
$\sigma_{\kappa u}/\sigma_{0,2}$	0,55 - 0,57	0,60 - 0,63	0,68 - 0,71	0,46 - 0,52	0,50 - 0,57	0,57 - 0,65
$\sigma_{\pi p}{}^{c \varkappa} / \sigma_{0,2}$	0,27 - 0,29	0,30 - 0,31	0,34 - 0,36	0,23 - 0,26	0,25 - 0,29	0,29 - 0,32
$\sigma_{\pi p}{}^p/\sigma_{0,2}$	0,27 - 0,29	0,30 - 0,31	0,34 - 0,36	0,23 - 0,26	0,25 - 0,29	0,29 - 0,32
$\sigma_{_{3KB}}$ ^{cж} / $\sigma_{0,2}$	0,47 - 0,49	0,52 - 0,54	0,59 - 0,62	0,40 - 0,45	0,44 - 0,50	0,50 - 0,56
$\sigma_{_{3\kappa B}}{}^p/\sigma_{0,2}$	0,47 - 0,49	0,52 - 0,54	0,59 - 0,62	0,40 - 0,45	0,44 - 0,50	0,50 - 0,56
	На уча	стках, пролож	енных упруги	м изгибом ρ =	= 3500 м	
$σ_{\kappa u}$, ΜΠα	305,5	336,1	381,9	290,7	319,7	363,3
σ _{пр} ^{сж} , МПа	111,0	126,3	149,2	103,5	118,1	139,9
$σ_{πp}^{p}$, ΜΠα	194,6	209,8	232,8	187,1	201,6	223,4
σ _{экв} сж, МПа	267,9	294,1	333,4	255,2	280,0	317,4
$σ_{_{3KB}}$ ^p , ΜΠα	267,9	294,1	333,4	255,2	280,0	317,4
$\sigma_{\text{ku}}/\sigma_{0,2}$	0,55 - 0,57	0,60 - 0,63	0,68 - 0,71	0,46 - 0,52	0,50 - 0,57	0,57 - 0,65
$\sigma_{\pi p}{}^{c \varkappa} / \sigma_{0,2}$	0,20 - 0,21	0,23 - 0,24	0,27 - 0,28	0,16 - 0,19	0,19 - 0,21	0,22 - 0,25
$\sigma_{\pi p}{}^p/\sigma_{0,2}$	0,35 - 0,36	0,38 - 0,39	0,42 - 0,44	0,29 - 0,33	0,32 - 0,36	0,35 - 0,40
$\sigma_{_{3KB}}$ ^{сж} / $\sigma_{0,2}$	0,48 - 0,50	0,53 - 0,55	0,60 - 0,62	0,40 - 0,46	0,44 - 0,50	0,50 - 0,57
$\sigma_{_{3\kappa B}}{}^p/\sigma_{0,2}$	0,48 - 0,50	0,53 - 0,55	0,60 - 0,62	0,40 - 0,46	0,44 - 0,50	0,50 - 0,57
Примечание – Индекс «р» в обозначениях параметров напряженного состояния озна- чает растянутую зону трубы, а индекс «сж» – сжатую зону трубы.						

	Труба № 1 (по ходу газа)		Труба № 2 (по ходу газа)			
Параметр	При	При испытании		При	При испытании	
	эксплуата- ции	р _{исп} =1,1р _{раб}	р _{исп} =1,25р _{раб}	эксплуата- ции	pucn=1,1ppao	р _{исп} =1,25р _{раб}
			Шурф № 1			
$σ_{\kappa u}$, ΜΠα	309,2	340,1	386,5	311,7	342,8	389,6
$σ_{πp}$, ΜΠα	154,6	170,1	193,2	155,8	171,4	194,8
$\sigma_{ ext{kii}}/\sigma_{0,2}$	0,49 - 0,61	0,54 - 0,67	0,62 - 0,76	0,50 - 0,61	0,55 - 0,68	0,62 - 0,77
$\sigma_{\pi p}/\sigma_{0,2}$	0,25 - 0,30	0,27 - 0,34	0,31 - 0,38	0,25 - 0,31	0,27 – 0,34	0,31 - 0,38
ϵ_{oct}^{max} , %	0	0	0,007	0	0	0,009
			Шурф № 2			<u> </u>
$σ_{\kappa u}$, ΜΠα	312,9	344,2	391,2	295,1	324,6	368,9
$σ_{пp}$, ΜΠα	156,5	172,1	195,6	147,3	162,3	184,4
$\sigma_{ ext{ku}}/\sigma_{0,2}$	0,50 - 0,62	0,55 - 0,68	0,63 - 0,77	0,46 - 0,53	0,51 - 0,58	0,58 - 0,66
$\sigma_{\pi p}/\sigma_{0,2}$	0,25 - 0,31	0,28 - 0,34	0,31 - 0,39	0,23 - 0,26	0,26 - 0,29	0,29 - 0,33
$\epsilon_{_{OCT}}^{max}$, %	0	0	0,009	0	0	0
			Шурф № 3			•
$σ_{\kappa u}$, ΜΠα	308,0	338,8	385,0	312,9	344,2	391,2
$σ_{np}$, ΜΠα	154,0	169,4	192,5	156,5	172,1	195,6
$\sigma_{ ext{kii}}/\sigma_{0,2}$	0,49 - 0,61	0,54 - 0,67	0,62 - 0,76	0,50 - 0,62	0,55 – 0,68	0,63 - 0,77
$\sigma_{\pi p} / \sigma_{0,2}$	0,25 - 0,30	0,27 - 0,33	0,31 - 0,38	0,25 - 0,31	0,28 - 0,34	0,31 - 0,39
$\epsilon_{ m oct}^{ m max}$, %	0	0	0,007	0	0	0,009
Шурф № 4						
$σ_{\kappa u}$, ΜΠα	315,5	347,0	394,3	318,0	349,8	397,6
$σ_{πp}$, ΜΠα	157,7	173,5	197,2	159,0	174,9	198,8
$\sigma_{ ext{ku}}/\sigma_{0,2}$	0,50 - 0,62	0,56 - 0,68	0,63 - 0,78	0,51 - 0,63	0,56 - 0,69	0,64 - 0,78
$\sigma_{\pi p}/\sigma_{0,2}$	0,25 - 0,31	0,28 - 0,34	0,32 - 0,39	0,25 - 0,31	0,28 - 0,35	0,32 - 0,39
$\epsilon_{\text{oct}}^{\text{max}}$, %	0	0	0,010	0	0	0,012
Примечание – ε_{oct}^{max} – значения максимальных остаточных деформаций после снятия нагрузки.						

В таблице 5.5 приведены результаты расчета НДС прямолинейных и упругоизогнутых участков газопровода для номинальных значений толщины стенки и при сертификатных значениях механических характеристик металла труб. В таблице 5.6 приведены результаты расчета НДС участков газопровода в контрольных шурфах с учетом фактических значений толщины стенки и механических характеристик металла труб.

Анализ полученных результатов показал следующее:

– при испытании и при эксплуатации газопровода на участках устройства контрольных шурфов, а также на участках, проложенных упругим изгибом, в стенках труб возникают кольцевые и растягивающие продольные напряжения. Эквивалентные напряжения для такого плоского напряженного состояния всегда меньше значения максимального из составляющих компонентов. В этом случае достаточно проанализировать уровень компонентов плоского напряженного состояния (значения кольцевых и продольных напряжений), а в анализе значений эквивалентных напряжений нет необходимости;

– при испытании газопровода внутренним давлением, равным $p_{исп} = 1,1p_{pa6}$ и $p_{исп} = 1,25p_{pa6}$, на участках из труб с номинальной толщиной стенки 27,7 мм кольцевые напряжения составляют 0,50 – 0,66 от предела текучести материала, что ниже его предела пропорциональности, который равен 0,7 $\sigma_{0,2}$. При снятии такой нагрузки в материале труб не происходит образования остаточных деформаций. Для труб с номинальной толщиной стенки 27,7 мм упругий уровень кольцевых деформаций сохраняется и при их эксплуатации;

– при испытании газопровода внутренним давлением, равным $p_{исп} = 1,1p_{pa6}$, а также при эксплуатации газопровода с нормативным рабочим давлением p = 11,8 МПа, на участках из труб с номинальной толщиной стенки 26,4 мм кольцевые напряжения составляют 0,49 –0,69 от предела текучести материала, т. е. материал труб испытывает упругие деформации. При испытании газопровода внутренним давлением, равным $p_{исn} = 1,25p_{pa6}$, на участках из вышеназванных труб кольцевые напряжения составляют 0,62 – 0,78 от предела текучести материала, т. е. материал 0,62 – 0,78 от предела текучести материала, т. е. материал труб с минимальными значениями механических характеристик будет испытывать упругопластические деформации. Уровень остаточных деформаций после снятия нагрузки составит: у труб в шурфе № 1 – 0,007 и 0,009 %, у трубы № 2 в шурфе № 2 – 0,009 %, у труб в шурфе № 3 – 0,007 и 0,009 %, у труб в шурфе № 4 – 0,010 и 0,012 %;

– на участках устройства контрольных шурфов при испытании газопровода внутренним давлением, равным $p_{исп} = 1,1p_{pa6}$, продольные напряжения составляют 0,27 – 0,35 от предела текучести материала при номинальной толщине стенки 26,4 мм и 0,26 – 0,29 при номинальной толщине стенки 27,7 мм; при испытании газопровода внутренним давлением, равным $p_{исп} = 1,25p_{pa6}$, продольные напряжения составляют 0,31 – 0,39 от предела текучести ма-

териала при номинальной толщине стенки 26,4 мм и 0,29 – 0,33 при номинальной толщине стенки 27,7 мм; при эксплуатации продольные напряжения составляют 0,25 – 0,31 от предела текучести материала при номинальной толщине стенки 26,4 мм и 0,23 – 0,26 при номинальной толщине стенки 26,4 мм и 0,23 – 0,26 при номинальной толщине стенки 27,7 мм. Таким образом, и при испытании газопровода, и при его эксплуатации значения продольных напряжений не менее чем в 1,79 раза ниже предела пропорциональности материала труб;

– на участках, проложенных упругим изгибом радиусом 3500 м, при испытании и при эксплуатации газопровода продольные напряжения в растянутой зоне труб превышают значения продольных напряжений в сжатой зоне в 1,56 - 1,81 раз на разных стадиях работы газопровода (эксплуатация, испытания). При этом при испытании газопровода внутренним давлением, равным р_{исп} = $1,1p_{pa6}$, продольные напряжения в растянутой зоне составляют 0,38 - 0,39 от предела текучести материала при толщине стенки 26,4 мм и 0,32 - 0,36 при толщине стенки 27,7 мм; при испытании газопровода внутренним давлением, равным р_{исп} = $1,25p_{pa6}$, продольные напряжения в растянутой зоне составляют 0,42 - 0,44 от предела текучести материала при толщине стенки 26,4 мм и 0,35 - 0,40 при толщине стенки 27,7 мм; при эксплуатации продольные напряжения в растянутой зоне составляют 0,35 - 0,36 от предела текучести материала при толщине стенки 26,4 мм и 0,29 - 0,33 при толщине стенки 27,7 мм; при эксплуатации продольные напряжения в растянутой зоне составляют 0,35 - 0,36 от предела текучести материала при толщине стенки 26,4 мм и 0,29 - 0,33 при толщине стенки 27,7 мм. Следует отметить, что и при испытании газопровода, и при его эксплуатации значения продольных напряжений не менее чем в 1,59 раза ниже предела пропорциональности материала труб.

Таким образом, при испытании рассматриваемого участка газопровода давлением, равным $p_{ucn} = 1,1p_{pa6}$, а также в процессе его эксплуатации при давлении p = 11,8 МПа, материал всех смонтированных труб испытывает только упругие деформации. Появление упругопластических деформаций возможно на трубах с номинальной толщиной стенки 26,4 мм при испытании газопровода давлением, равным $p_{ucn} = 1,25p_{pa6}$. При снятии такой нагрузки уровень остаточных деформаций составит не более 0,012 %.

5.5. Оценка особенностей изменения физико-механических характеристик металла сварных швов и околошовных зон труб в процессе пневматических испытаний магистрального газопровода

5.5.1. Анализ особенностей изменения физико-механических характеристик металла труб в окрестности кольцевых сварных швов

Свойства стали, подвергнутой термическому циклу сварки, могут значительно изменяться, как в сторону снижения, так и повышения характеристик.

Металл сварного шва формируется при температуре около 1600 – 1700 °С, при этом материал сварного шва обладает свойствами литого металла, с заданными (установленными нормативными документами) механическими характеристиками. На границах сварного шва выделяются зоны, характеризуемые в зависимости от интенсивности теплового воздействия:

 – зона I – температура нагрева металла трубы составляет 1200 – 1600 °С, в структуре металла трубы наблюдается интенсивный рост зерна, сопровождаемый снижением его механических характеристик;

 – зона II – температура разогрева стенки трубы в указанной зоне составляет 900 – 1200 °C, рост зерен ограничен, происходит образование мартенсита (раствора углерода в αжелезе), что приводит к закалке, а соответственно, и упрочнению металла труб. Ударная вязкость металла снижается;

– зона III – указанная зона является переходной, температура нагрева составляет 700 – 900 °С, прочность металла несколько ниже, чем в зоне II, но выше чем у основного металла трубы, т. к. температура для полной закалки недостаточна. Ударная вязкость металла повышается;

 – зона IV – температура нагрева металла в указанной зоне составляет 450 – 700 °С. В рассматриваемой зоне наблюдается отпуск металла с повышением ударной вязкости;

– зона V – температура 200 – 450 °С, механические свойства металла в рассматриваемой зоне также несколько снижаются, что возможно связано с выделением карбидов, способствующих упрочнению металла, а также снижению его ударной вязкости [1].

Особенности распределения температур, а также изменение механических характеристик металла стенки трубы в процессе формирования кольцевого сварного шва показаны на рисунке 5.8.



Рисунок 5.8 – Особенности распределения температуры в металле свариваемых труб в направлении от торцевой кромки, а также особенности изменения предела прочности (σ_в) и ударной вязкости (а_н)

Фактическое распределение температур в металле стенки трубы, определенное в процессе полуавтоматической сварки труб в автоматизированном трубосварочном комплексе, показано на рисунке 5.9.

С помощью представленных распределений температур, а также зависимостей, приведенных на рисунке 5.9, а, определены геометрические размеры зон термического влияния для труб диаметром 1420 мм с толщиной стенки 26,6 мм (нижняя кривая на рисунке 5.9, а) и 27,7 мм (верхняя кривая на рисунке 5,9, а). Установлены следующие размеры зон термического влияния:

- зона I (рост зерна, снижение механических характеристик металл) до 0,005 м;
- зона II (упрочнение металла) от 0,005 до 0,015 м;
- зона III (переходная зона) от 0,015 до 0,030
- зона IV (отпуск металла, повышение ударной вязкости) от 0,03 до 0,06 м;
- зона V (упрочнение металла, снижение ударной вязкости) от 0,06 до 0,15 м.





В



Г

Рисунок 5.9 – Фактическое распределение температур металла стенки трубы в процессе выполнения кольцевого сварного шва (а), внешний вид трубосварочного комплекса (б), схема размещения датчиков и прецизионного термометра (в, г)

5.5.2. Анализ результатов определения характеристик механических свойств по твердости

Механические характеристики металла труб определялись с помощью входящего в комплект поставки прибора ПИМ-ДВ-1 программного обеспечения, выполняющего в автоматическом режиме расчет основных механических характеристик металла (пределов текучести и прочности, относительного удлинения) по измеренным значениям поверхностной твердости, определенной в режиме пошагового нагружения [123].

По результатам измерения поверхностной твердости установлено следующее:

– среднее значение твердости металла труб (НВ) в зоне, удаленной от границ кольцевого сварного шва 30 мм, на первой трубе составило 217 единиц, на второй – 216 единиц, с сохранением указанных результатов после пневматических испытаний;

– в зонах, удаленных от границ кольцевого сварного шва на 20 мм, среднее значение твердости соответственно составило 223 единицы у первой трубы и 224 у второй, со снижением после пневматических испытаний до уровня, характерного для зон, удаленных от границ кольцевого сварного шва на 30 мм (214 – 216 единиц);

– в зонах, удаленных от кольцевого сварного шва на 10 мм, среднее значение твердости составило 230 единиц у первой трубы и 240 единиц у второй, со снижением после пневматических испытаний до уровня, характерного для зон, удаленных от кольцевого сварного шва на 30 мм (215 – 218 единиц);

– на расстоянии 30 мм от кольцевого шва, как для первой, так и второй труб, разность значений твердости в 10 контрольных точках до и после пневматических испытаний изменилась на величину от 3 до 10 единиц, как в сторону увеличения, так и уменьшения;

 – на расстоянии 20 мм от кольцевого сварного шва на обеих трубах наблюдается общее снижение поверхностной твердости на величину от 2 до 10 единиц;

 на расстоянии 10 мм от границы кольцевого сварного шва твердость металла труб после пневматических испытаний снижается на величину от 10 до 70 единиц.

Результаты расчета механических характеристик металла труб по данным, полученным в ходе измерения поверхностной твердости, показаны на рисунке 5.10. На графиках (на примере изменения уровня предела прочности) показаны особенности изменения механических характеристик металла труб после завершения пневматических испытаний. По результатам анализа представленных результатов получены следующие выводы:

– первая контрольная зона, удаленная от границ кольцевого шва на 10 мм, предположительно соответствует области упрочнения металла, соответственно, характеризуется повышенными прочностными показателями (предел текучести в среднем выше нормативного значения на 5 – 8 %, предел прочности выше нормативного значения на 5 – 9 %);

– вторая контрольная зона удалена от кольцевого шва на 20 мм и, предположительно, находится в переходной области, прочность металла в которой ниже, чем в области упрочнения, но выше, чем основного металла или соответствует нормативным значениям прочностных показателей (предел прочности 740 МПа, предел текучести 555 МПа);

 третья контрольная зона, удаленная от границ кольцевого сварного шва на 30 мм, находится в области отпуска металла, соответственно, характеризуется несколько

сниженными, по сравнению с основным металлом труб, характеристиками (предел текучести в среднем ниже на 4,5 – 6,0 %, предел прочности ниже на 2,7 – 3,3 %);

– после пневматических испытаний наблюдается выравнивание прочностных показателей в зонах, удаленных от кольцевого шва на 10 и 20 мм, при этом предел текучести материала достигает 515 – 530 МПа (ниже нормативного значения на 4,5 – 7,0 %), предел прочности 707 – 725 МПа (ниже нормативного значения на 2,0 – 4,5 %).



а – в – труба № 1, соответственно 30, 20 и 10 мм от границы кольцевого сварного шва;
г – е – труба № 2, соответственно 30, 20 и 10 мм от границы кольцевого сварного шва
Рисунок 5.10 – Результаты измерения твердости металла труб у границ кольцевого сварного шва до (кривая 1) и после (кривая 2) пневматических испытаний

Особенности изменения прочностных показателей металла труб в зонах термического влияния после проведения пневматических испытаний, возможно, объясняются следующим. При формировании кольцевого сварного шва, металл околошовных зон будет находиться в сложнонапряженном состоянии, обусловленном тем, что металл, нагретый до температур, превышающих 700 °C (рисунок 5.8, кольцевой сварной шов, а также зоны 1 и 2), при остывании сжимается, при этом процессу сжатия препятствует металл, имеющий более низкую температуру, соответственно, после остывания, металл в зонах 1, 2 остается растянутым вдоль оси трубы, а металл зон 3, 4 и 5 приобретает остаточные напряжения сжатия (см. рисунок 5.11).



Рисунок 5.11 – Распределение остаточных напряжений в металле труб у границ кольцевого сварного шва [1]

В процессе пневматических испытаний происходит перераспределение напряжений в металле зоны термического влияния, сопровождаемое структурными изменениями материала, в результате чего, прочность металла в зонах 1 и 2 несколько снижается.

5.5.3. Результаты предварительных лабораторных исследований магнитных свойств металла труб в окрестности сварного шва

Для оценки магнитных свойств металла труб в окрестности кольцевого сварного шва были проведены лабораторные испытания, включающие измерение коэрцитивной силы на поверхности образцов, представляющих собой два сваренных между собой прямоугольных стальных фрагмента труб (рисунок 5.12) [47].



Д



б

e



а – общий вид лабораторного образца; б – схема контроля зоны сварного шва; в, г – магнитный контроль образца с продольным сварным швом; д, е – магнитный контроль образцов с кольцевым сварным швом; 1 – образец; 2 – измерительный датчик коэрцитиметра;

3 – сварной шов; 4 – направление перемещения датчика; 5 – линии координатной сетки на поверхности образца

Рисунок 5.12 - Схема проведения лабораторных исследований

Измерения проводились с помощью коэрцитиметра КРМ-Ц-К2М. Использованные при изготовлении лабораторного образца стальные прямоугольные фрагменты вырезались из новых и бывших в эксплуатации труб, при этом, металл образца, выполненного из фрагментов, отобранных с новых труб, имеет характеристики, аналогичные характеристикам материала труб, использованных при сооружении МГ Бованенково – Ухта:

- класс прочности К65;

- толщина стенки 27,7 мм.

Исследования проводились в следующей последовательности:

– датчик коэрцитиметра последовательно перемещался вдоль образца (по центральной линии, см. рисунок 5.5, а), пересекая сварной шов;

 перемещение датчика выполнялось от правой торцевой кромки образца к левой и далее в обратном направлении;

– шаг перемещения датчика составлял 1,5 см.

Результаты сканирования образца, изготовленного из фрагментов, отобранных из новых труб (рисунок 5.12, а) приведены на рисунке 5.13.



Рисунок 5.13 – Результаты измерения магнитных характеристик лабораторного образца при перемещении датчика от правой торцевой кромки к левой (а) и в обратном направлении (б)

По результатам магнитного контроля образца, выполненного из фрагментов, отобранных с новых труб, установлено следующее:

– анализ результатов магнитного сканирования лабораторного образца показывает, что кривая, характеризующая изменение уровня коэрцитивной силы, измеренной в процессе последовательного перемещения датчика коэрцитиметра вдоль образца, имеет три выраженных экстремума, причем, максимальное значение соответствует местоположению сварного шва, а два минимума зафиксированы в зонах термического влияния справа и слева от сварного шва;

в зоне термического влияния, вследствие разупрочнения металла, величина коэрцитивной силы снижается на 10 – 15 % от величины, характерной для металла трубы, не подверженного температурному воздействию;

 в зоне сварного шва, вследствие упрочнения металла, величина коэрцитивной силы увеличивается в 1,5 – 2 раза от величины основного металла образца.

Результаты магнитного сканирования образца, содержащего продольный сварной шов (рисунок 5.12, в, г), показаны на рисунке 5.14, а (одна из кривых получена по результатам прямого, а вторая, обратного магнитного сканирования).



а



б

Рисунок 5.14 – Результаты магнитного сканирования образцов, выполненных из труб, бывших в эксплуатации, содержащих продольный (а) и кольцевой (б) сварные швы (толщина образцов соответственно 18,0 и 18,2 мм)

В данном случае кривая изменения коэрцитивной силы, полученная при последовательном перемещении датчика в направлении, перпендикулярном направлению продольного сварного шва, с шагом измерения 1,5 см, также содержит три выраженных экстремума, причем, если при ранее проведенных исследованиях (см. рисунок 5.13, а, б) измеренная величина коэрцитивной силы в зоне кольцевого сварного шва значительно (в 1,4 – 1,6 раз) превышает уровень, характерный для основного металла трубы (что может говорить о повышенной прочности металла сварного шва), то в данном случае, физико-механические характеристики металла сварного шва и основного металла трубы примерно идентичны, в то же время, металл в зонах термического влияния справа и слева от сварного шва несколько разупрочнен. Данный факт, возможно, объясняется особенностями процесса изготовления труб, включающего операции по снижению внутренних напряжений в материале стенки трубы и сварного шва, в результате выполнения которых, прочность металла сварного шва снижается до уровня основного металла трубы.

Результаты магнитного сканирования образца, выполненного из сваренных между собой фрагментов, отобранных с бывших в эксплуатации однотипных, идентичных по геометрическим характеристикам и физико-механическим свойствам, труб, показаны на рисунке 5.15.

В данном случае, также как и при ранее проведенном магнитном сканировании образца, выполненного из сваренных между собой образцов, отобранных с новых труб (рисунок 5.13), коэрцитивная сила, измеренная в зоне сварного шва, превышает уровень, характерный для основного металла труб. Однако, необходимо отметить, что уровень превышения величины коэрцитивной силы несколько меньше, чем в случае обследования образца, выполненного из новых труб, что в данном случае можно объяснить:

 отличающимися физико-механическими свойствами новых и ранее используемых при изготовлении труб сталей;

меньшей толщиной стенки образцов, выполненных из бывших в эксплуатации труб (18,2 мм);

- отличающимися режимами выполнения сварного шва.

Результаты магнитного сканирования образца, выполненного из фрагментов, отобранных с разнотипных, бывших в эксплуатации, труб (прямошовной и спиралешовной, с толщиной стенок, соответственно 12,2 и 12,4 мм) показаны на рисунке 5.15 (вследствие значительной ширины образца магнитное сканирование проводилось по двум параллельным линиям).



а – линия сканирования № 1; б – линия сканирования № 2

Рисунок 5.15 – Результаты магнитного сканирования образца, выполненного из сваренных между собой фрагментов отобранных со спиралешовной и прямошовной труб

В данном случае, вследствие использования при изготовлении образца разнотипных труб, кривая, характеризующая изменение величины коэрцитивной силы при последовательном перемещении датчика коэрцитиметра, имеет форму, отличающуюся от форм кривых, полученных при магнитном сканировании образцов, содержащих фрагменты, выполненные из однотипных труб. На участке кривой (рисунок 5.15), построенной по результатам сканирования фрагмента, отобранного с прямошовной трубы, наблюдается характерное (фиксируемое ранее на других образцах со сварными швами) плавное снижение величины коэрцитивной силы в направлении от шва с последующим увеличением до уровня, характерного для основного металла трубы, не подверженного температурному воздействию. На фрагменте, отобранном со спиралешовной трубы, имеет место последовательное увеличение коэрцитивной силы в направлении от сварного шва, при этом уровень коэрцитивной силы за пределами зоны термического влияния в 2,5 – 3 раза выше аналогичного показателя, зафиксированного на фрагменте образца, отобранного с прямошовной трубы.

По результатам проведенного магнитного сканирования образцов, выполненных в виде сваренных между собой фрагментов труб, установлено следующее:

– характер изменения коэрцитивной силы, измеренной при последовательном перемещении датчика коэрцитиметра вдоль образца, содержащего фрагменты, отобранные с од-

нотипных труб (как новых, так и бывших в эксплуатации), идентичен и может быть описан плавной кривой линией, содержащей три экстремума, из которых один (максимум) фиксируется над сварным швом, а два (минимумы) располагаются в зонах термического влияния у границ шва;

 при магнитном сканировании образца, выполненного из новых труб, отмечается максимальный уровень роста коэрцитивной силы над сварным швом, по сравнению с образцами, выполненными из бывших в эксплуатации труб (в 1,4 – 1,6 раза);

– в образце, содержащем фрагменты, отобранные с разнотипных труб, отличающихся по технологии изготовления (спиралешовной и прямошовной), характер изменения коэрцитивной силы при последовательном магнитном сканировании отличается от ранее зафиксированного при контроле образцов, выполненных из идентичных фрагментов, что в данном случае, возможно, связано с более высоким уровнем внутренних напряжений, а также большей прочностью металла спиралешовной трубы.

5.5.4. Результаты контроля качества сварных соединений ультразвуковым и радиографическим методами

По результатам радиографического и магнитного методов контроля в металле трех кольцевых сварных швов (из четырех проконтролированных, шурфы №№ 2 – 4) было установлено наличие некритических нарушений.

Сварное соединение двух труб, расположенное в пределах шурфа № 2 (соединение труб с толщиной стенки 26,4 и 27,7 мм) содержит:

 два неметаллических внутренних (шлаковых) включения размерами 2 × 2 × 2 мм (выявлены по результатам радиографического контроля);

два групповых дефекта – скопление внутренних шлаковых включений, размерами 2
 ×1 ×1 мм (выявлены по результатам радиографического контроля);

 шесть внутренних объемных дефектов, общей протяженностью 9 мм (выявлены по результатам ультразвукового контроля).

Сварное соединение двух труб, расположенное в пределах шурфа № 3 (соединение труб с толщиной стенки 26,4 и 26,6 мм) содержит:

 – одно неметаллическое внутреннее (шлаковое) включение размером 2 × 2 × 1 мм (выявлено по результатам радиографического контроля);

 – один внутренний объемный дефект, протяженность 2 мм (выявлен по результатам ультразвукового контроля). Сварное соединение двух труб, расположенное в пределах шурфа № 4 (соединение труб с толщиной стенки 26,4 и 26,6 мм) содержит:

 два неметаллических внутренних (шлаковых) включений размерами 2 × 2 × 1 мм (выявлены по результатам радиографического контроля);

– одно неметаллическое внутреннее (шлаковое) включение размером 2 × 2 × 1 мм
 (выявлен по результатам радиографического контроля);

 – один внутренний объемный дефект, протяженность 2 мм (выявлен по результатам ультразвукового контроля).

Расположение дефектов кольцевых сварных швов показано на рисунке 5.16.



Рисунок 5.16 – Схемы расположения зафиксированных по результатам радиографического и ультразвукового контроля некритических нарушений сварных швов

5.5.5. Магнитный контроль металла сварных соединений труб

Оценка изменения магнитных характеристик металла труб в процессе проведения пневматических испытаний МГ Бованенково – Ухта выполнялась с помощью прибора для измерения значений коэрцитивной силы (коэрцитиметра) КРМ-Ц-К2М.

Измерения выполнялись в контрольных областях, расположенных на верхней (12 ч), нижней (6 ч) и боковых (3 и 9 ч) образующих трубы.

Каждая контрольная область включала пять последовательно расположенных зон (рисунок 5.17, а):

– две зоны, располагающиеся справа и слева от сварного шва, в пределах которых металл труб не подвергался высокотемпературному воздействию при сварке; две зоны, располагающиеся справа и слева от кольцевого сварного шва, в пределах которых наблюдается изменение свойств металла труб вследствие высокотемпературного воздействия;

- одна зона, расположенная над кольцевым сварным швом.



Рисунок 5.17 – Схема расположения контрольных зон (а), и ориентация датчика коэрцитиметра (б) при проведении измерений

Также определялись магнитные характеристики металла сварного шва в месте расположения некритических нарушений, выявленных по результатам радиографического и ультразвукового контроля.

Измерения проводились в пяти зонах, из которых средняя располагалась над внутренними некритическими дефектами сварного шва.

При проведении измерений датчик коэрцитиметра последовательно перемещался вдоль каждой контрольной области с шагом 10 см сначала по ходу газа и далее в обратном направлении.

Также в каждой контрольной зоне проведены по два измерения с поворотом датчика на 90° относительно оси труб.

5.5.6. Результаты магнитного контроля материала труб и сварных кольцевых швов

Результаты магнитного контроля материала труб и сварных швов до и после пневматических испытаний представлены на рисунках 5.18 – 5.21.

На всех объектах контроля (в четырех контрольных сечениях), при последовательном перемещении датчика вдоль контрольных зон (см. рисунок 5.17), наблюдается характерное (зафиксированное ранее при лабораторных испытаниях, см. п 5.5.3) изменение уровня коэрцитивной силы с последовательным снижением с приближением к кольцевому сварному шву первой трубы, ростом над сварным швом, снижением в околошовной зоне второй трубы и повышением при переходе к основному металлу второй трубы.

Коэрцитивная сила, измеренная над кольцевым сварным швом, выше уровня, наблюдаемого при измерении на основном металле трубы на 14 – 16 %, что в данном случае, вероятно, обусловлено более высокими механическими характеристиками металла кольцевого сварного шва, а также особенностями его геометрии.

По результатам проведения измерений после пневматических испытаний участка газопровода установлено следующее:

– коэрцитивная сила, измеренная над кольцевым сварным швом, ниже уровня, зафиксированного перед пневматическими испытаниями на 3,0 – 4,5 %, что, возможно, связано с перераспределением, а также снижением уровня остаточных напряжений, образуемых в металле сварного шва и околошовной зоны при сварке;

– в зонах с низким уровнем коэрцитивной силы (характерные минимумы, на удалении 0,03 – 0,04 м от границ кольцевого сварного шва), после пневматических испытаний наблюдается рост указанного параметра, что в данном случае, возможно связано с повторным упрочнением зон отпуска металла труб;

– на удалении от зоны термического влияния (на 0,06 – 0,08 м), остается на прежнем уровне или изменяется на величину до 2,5 %, как в сторону увеличения, так и уменьшения.

Результаты магнитного контроля металла кольцевого сварного шва, а также околошовных зон сваренных труб показывают следующее.

После выполнения кольцевого сварного шва, металл околошовной зоны сваренных труб неоднороден, как по внутренней структуре, так и по уровню остаточных напряжений (растягивающих или сжимающих).

При пневматических испытаниях, формируемые в металле стенок труб напряжения суммируются с остаточными, в результате чего, результирующие напряжения, в некоторых

случаях, могут превышать нормативный предел текучести. В результате в металле стенок труб будут наблюдаться пластические деформации, сопровождаемые изменением внутренней структуры металла, а также его механических характеристик.

Вследствие указанного эффекта, возможно, происходит повторное упрочнение зоны, удаленной от границы сварного шва на 0,03 – 0,06 м (зона III, см. п. 5.5.1).



а – верхняя образующая трубы (12 ч); б – левая боковая образующая трубы (3 ч);
в – правая боковая образующая трубы (9 ч); г – нижняя образующая трубы (6 ч);
1 – уровень коэрцитивной силы до пневматических испытаний;
2 – уровень коэрцитивной силы после пневматических испытаний
Рисунок 5.18 – Результаты магнитного контроля материала труб
и сварных швов до и после пневматических испытаний
(ориентация датчика – вдоль оси МГ, шурф № 1)



а – верхняя образующая трубы (12 ч); б – левая боковая образующая трубы (3 ч);
в – правая боковая образующая трубы (9 ч); г – нижняя образующая трубы (6 ч);
1 – уровень коэрцитивной силы до пневматических испытаний;
2 – уровень коэрцитивной силы после пневматических испытаний
Рисунок 5.19 – Результаты магнитного контроля материала труб и сварных швов до и после пневматических испытаний
(ориентация датчика – вдоль оси МГ, шурф №2)





2 – уровень коэрцитивной силы после пневматических испытаний
 Рисунок 5.20 – Результаты магнитного контроля материала труб
 и сварных швов до и после пневматических испытаний
 (ориентация датчика – вдоль оси МГ, шурф № 3)



а – верхняя образующая трубы (12 ч); б – левая боковая образующая трубы (3 ч);

в – правая боковая образующая трубы (9 ч); г – нижняя образующая трубы (6 ч);

1 – уровень коэрцитивной силы до пневматических испытаний;

2 – уровень коэрцитивной силы после пневматических испытаний

Рисунок 5.21 – Результаты магнитного контроля материала труб

и сварных швов до и после пневматических испытаний

(ориентация датчика – вдоль оси МГ, шурф № 4)

5.5.7. Исследование развития дефектов в металле кольцевых сварных швов

Для оценки особенностей распределения эквивалентных напряжений в окрестности допустимого дефекта сварного шва выполнено расчетное компьютерное моделирование процесса нагружения внутренним давлением фрагмента трубопровода с кольцевым сварным швом, содержащим сферический дефект диаметром 2 мм.

Исследования проведены с использованием следующих приложений расчетного комплекса Ansys Workbench:

 design modeler (построение расчетной модели, содержащей два трубных отрезка, соединенных между собой кольцевым сварным швом, содержащим сферический дефект);

 – ICEM CFD (разбиение модели на конечные элементы правильной формы, построение структурированной сетки);

 – Finite Element Modeler (экспорт модели, разделенной на элементы правильной формы, в приложение для расчетного моделирования);

 Static Structural (расчетное моделирование нагружения фрагмента трубопровода внутренним давлением).

Исходные данные для расчетного моделирования следующие:

 модель включает два трубных отрезка протяженностью 1 м, диаметром 1420 мм, с толщиной стенки 27,7 мм, соединенных между собой посредством сварного шва;

 в пространстве рабочей модели используется прямоугольная система координат, в которой направление оси X соответствует направлению оси трубных отрезков, ось Y направлена вертикально вверх, ось Z направлена вправо;

 – сварной шов содержит некритический дефект правильной, сферической формы диаметром 2 мм, расположенный на расстоянии 4,5 мм от поверхности валика сварного шва и на удалении 4 мм от его края;

– в данном случае предполагается, что материал труб и сварного шва идентичен по характеристикам (предел прочности – 740 МПа, предел текучести – 540 МПа, относительное удлинение при разрыве – 19 %, плотность 7850 кг/м³);

 – расчетная модель включает 280 тыс. элементов гексагональной формы, при этом стенка труб включает 10 параллельных слоев;

 – нагружение трубного отрезка внутренним давлением происходит последовательно (внутреннее давление составляет 2; 4; 7; 10 и 13 МПа);

– расчетная модель закреплена от перемещений по оси Х на одной торцевой кромке.

Внешний вид расчетной модели показан на рисунке 5.22 (для удобства отображения показана укрупненная расчетная сетка).



Рисунок 5.22 – Трехмерная модель фрагмента трубопровода со сварным кольцевым швом

По результатам проведенного расчетного моделирования (рисунок 5.23) установлено следующее:

 – сферический некритический дефект кольцевого сварного шва способствует значительному росту уровня эквивалентных напряжений на своих границах;

– эквивалентные напряжения на границах дефекта (в направлении оси Х, см. рисунок
 5.23, б), в точках пересечения оси с границами дефекта, превышают показатели, характерные для бездефектных зон, на 40 – 45 % (на границах дефекта до 455 МПа, в бездефектных зонах
 – до 330 МПа);

– эквивалентные напряжения в верхней и нижней частях дефекта (по направлению оси Y, см. рисунок 5.23, в) на 45 % превышают аналогичные показатели, характерные для соответствующих по расположению бездефектных зон (на границе дефекта до 470 МПа, в бездефектных зонах до 320 МПа);

– эквивалентные напряжения на границах дефекта (в направлении оси Z, рисунок 5.23, г) несколько ниже уровня, характерного для бездефектных зон (250 МПа у границ дефекта и 300 МПа в бездефектной зоне).


а – положение координатных осей; б – г – распределение эквивалентных
 напряжений по направлению координатных осей

Рисунок 5.23 – Результаты расчета эквивалентных напряжений в металле сварного шва, в окрестности сферического дефекта (при различном внутреннем давлении)

Расчет показывает, что при максимальном внутреннем давлении, составляющем 13 МПа, в металле кольцевого сварного шва в окрестности некритического сферического дефекта, являющегося концентратором напряжений, максимальный уровень эквивалентных напряжений не превышает предела текучести материала, но в то же время значительно (на 45 – 47 %) превышает уровень эквивалентных напряжений, фиксируемых при отсутствии дефекта. Из представленных на рисунке 5.24 полей распределений эквивалентных напряжений

181

видно, что максимальный уровень напряжений приходится на кольцевую зону, окружающую сферический дефект, ориентируемую в плоскости осей ХҮ.



а









а, в, г – положение контрольных сечений; б, г, е – результаты расчета Рисунок 5.24 – Поле распределения эквивалентных напряжений в пределах контрольных сечений, пересекающих сферический дефект сварного шва (внутреннее давление – 12 МПа)

Результаты расчета подтверждаются фактическими данными, полученными в ходе ультразвукового и радиографического обследований сварных соединений с допустимыми нарушениями после пневматических испытаний, которые показали, что развитие дефектов в сварных швах по геометрическим параметрам не произошло, и их геометрические размеры остались на ранее зафиксированном уровне.

Результаты магнитного контроля дефектных зон сварных швов представлены на рисунке 5.25.



а – шурф № 2, 4 ч; б – шурф № 2, 10 ч; в – шурф № 3, 1 ч; г – шурф № 4, 8 ч;
1 – уровень коэрцитивной силы до пневматических испытаний;
2 – уровень коэрцитивной силы после пневматических испытаний Рисунок 5.25 – Результаты магнитного контроля материала труб и сварных швов с дефектами до и после пневматических испытаний (ориентация датчика – вдоль оси МГ) По результатам анализа представленных на рисунке 5.25 графических распределений установлено следующее:

– общий характер изменения уровня коэрцитивной силы при последовательном магнитном сканировании металла труб в околошовных зонах, а также металла сварного шва с некритическим дефектом соответствует распределениям, полученным при обследовании как лабораторных образцов, так и металла труб и сварного шва без дефектов;

– отмечается, что в отличие от результатов магнитного сканирования металла кольцевого сварного шва без дефектов, после пневматических испытаний уровень коэрцитивной силы над сварным швом с некритическим дефектом остается на прежнем уровне или увеличивается на 1 - 3 %, что может говорить о структурных изменениях металла сварного шва в окрестности дефекта вследствие высокого уровня внутренних напряжений.

5.6. Анализ результатов тензометрии

Тензометрию проводили в три этапа:

- 1 этап - с 24 по 27 апреля 2012 г. (после установки тензометрических линий);

 – 2 этап – с 6 по 8 мая 2012 г. (перед началом пневматических испытаний трубопровода);

 – 3 этап – с 12 по 17 июня 2012 г. (после окончания пневматических испытаний трубопровода).

На первом этапе мониторинга произведены работы по: установке тензодатчиков, монтажу тензометрических линий в четырех шурфах и снятию начальных показаний тензометрии. На втором этапе в связи с затоплением шурфов талыми водами и невозможностью проведения работ непосредственно в шурфах произведено снятие показаний тензометрических линий в четырех шурфах. На третьем этапе, после откачки воды из шурфов и просушки тензодатчиков, произведено снятие показаний тензодатчиков всех тензометрических линий.

Для проведения тензометрического обследования использовали тензорезисторы типа 2ФКП-5-200 производства ЗАО «Сибтензоприбор».

В процессе подготовки к тензометрическому обследованию на трубах, расположенных в четырех шурфах, было установлено 30 активных датчиков, подключаемых по полумостовой схеме (с одним компенсационным тензорезистором на каждый активный тензорезистор). В шурфе № 1 установлено три продольных и два кольцевых датчика; в шурфе № 2 – шесть продольных, четыре кольцевых, четыре датчика, расположенных под углом 45° к образующей трубы, и один контрольный датчик, установленный на металлической пластине из трубной стали; в шурфе № 3 – три продольных и два кольцевых датчика; в шурфе № 4 – три

продольных и два кольцевых датчика. Датчики устанавливали группами в районе образующих трубы, расположенных на 3, 9 и 12 ч в окружной ориентации. На трубе, находящейся в шурфе № 2, каждый датчик дублировался. После установки датчиков и проверки работоспособности их покрывали защитным слоем АК-22 (производства фирмы «Куоwа», Япония).

Показания с датчиков, установленных в шурфах № 1, 3, 4 (таблица 5.7), получали с использованием измерителя цифрового тензометрического ЦТИ-1 (производства Красноярского завода тензометрических приборов). Для коммутации установленных на трубах тензодатчиков с измерительными приборами использовали кабеля КММ 4 × 0,35 мм² производства ООО «Минимакс» (г. Санкт-Петербург). Длина тензометрических кабелей для использования с измерителем ЦТИ-1 – 10 м, для использования с UCAM 60B – 50 м.

Коэффициент тензочувствительности, экспериментально определенный посредством нагружения на изгиб образца с установленными на нем по полумостовой схеме тензодатчиками из используемой партии (один активный и один компенсационный), составил К = 2,25.

При известном коэффициенте тензочувствительности по приращениям показаний тензометрических приборов получили значения изменения линейной деформации в е.о.д. (единица относительной деформации, 1 е.о.д. = 10⁻⁶).

Анализ данных показал, что тензометрические линии, установленные в шурфе № 1 и 2, вышли из строя вследствие разгерметизации защитного слоя и обрыва измерительных кабелей в процессе удаления воды из шурфа экскаватором.

Также вышли из строя датчики № 4 и 5, установленные на 3 и 9 ч на трубе, расположенной в шурфе № 4, и датчик № 5, установленный на 9 ч на трубе в шурфе № 3.

Остаточное удлинение, соответствующее условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$, составляет 0,2 % или 2000 е.о.д.

По показаниям уцелевших тензодатчиков, установленных на трубах в шурфах № 3 и 4, видно, что остаточная деформация металла труб не превышает 12 % от остаточной деформации, соответствующей условному пределу текучести.

Такие деформации могут возникать под действием внутреннего давления на локальных участках вследствие выправления несовершенств цилиндрической формы трубы, возникающих на стадии формовки листа, а также в процессе трубного производства.

	Давле-	Номер, расположение, ориентация					
Дата, время		12 и		З ч		ин, с.о.д. О п	Примечание
) 1	
bpellin	iiiie, uiiii	Nº 1,	<u>N</u> º 2,	<u>N</u> º 3,	№ 4, кош	Nº 5,	
		продо- льный	коль- певой	продо- льный	коль- цевой	продо- льный	
Шурф № 1							
27.04.2012 9:36 9:45	0	0	0	0	0	0	t _{окр.возд} = − 1 °C. Воды в шурфе нет.
08.05.2012 12:50 12:52	30	- 20	449	28	128	- 9	t _{окр.возд.} = 3 °C. Зеркало воды в шурфе на уровне 4 – 8 ч
09.06.2012 14:31	0	- 263	614	730	- 306	- 2059	t _{окр.возд.} = 14 °C. Зеркало воды в шурфе совпадает с уровнем дневной поверхности земли
Шурф № 3							
27.04.2012 10:38 10:44	0	0	0	0	0	0	t _{окр.возд.} = − 1 °C. Воды в шурфе нет.
06.05.2012 11:13 11:15	0	- 28	101	- 895	1038	62	t _{окр.возд.} = − 3 °С. Зеркало воды в шурфе на уровне 1 − 11 ч
08.05.2012 14:05 14:07	0	3151	- 1157	- 1849	- 281	91	t _{окр.возд.} = 3 °C. Верхняя образующая трубы под водой
15.06.2012 13:00 13:20	80	2629	- 596	7656	2015	7682	t _{окр.возд.} = 21 °C. Шурф полностью заполнен водой
16.06.2012 12:00 12:02	0	1360	- 1837	9450	- 402	7711	t _{окр.возд} = 12 °C. Идет откачка воды.
16.06.2012 17:00 17:02	0	- 226	46	75	2	_	t _{окр.возд.} = 12 °C. Вода из шурфа удалена, датчики просушены феном
Шурф № 4							
26.04.2012 15:48 15:49	0	0	0	0	0	0	t _{окр.возд} =-2 °С. Вода в шурфе отсутствует.
27.04.2012 11:34 11:39	0	16	-9	-9	9	9	t _{окр.возд} =−1 °C. Вода в шурфе отсутствует.
07.05.2012 12:55 12:59	0	-7	64	11	3936	- 9	t _{окр.возд} = – 2 °C. Зеркало воды ниже нижней образующей трубы на 0,5 м
08.05.2012 14:30 14:32	0	18	-7	36	4838	- 45	t _{окр.возд.} = 3 °C. Зеркало воды ниже нижней образующей трубы на 0,4 м
17.06.2012 12:25 12:27	0	7	34	98	_	_	t _{окр.возд.} = 13 °С. Вода из шурфа удалена, датчики просушены феном

Таблица 5.7 – Результаты тензометрического обследования труб в шурфах № 1, 3, 4 прибором ЦТИ-1

5.7. Выводы по главе 5

При проведении работ по мониторингу участков МГ Бованенково – Ухта при пневматических испытаниях был последовательно реализован следующий комплекс мероприятий.

Выполнен обзор данных проектной и исполнительной документации, разработана методика проведения исследований, предложены методы интерпретации получаемых при измерениях данных, произведен выбор участков проведения исследований, проведено шурфование МГ и последующее двукратное диагностирование до и после проведения пневматических испытаний, выполнен анализ полученных при диагностировании результатов.

Проведены работы по диагностированию дефектного состояния основного металла труб и сварных соединений МГ до и после пневматических испытаний с помощью ВИК, магнитопорошкового контроля, ультразвуковой толщинометрии, ультразвукового контроля сплошности основного металла и сварных соединений труб, радиографического контроля сварных соединений.

Проведены работы по оценке физико-механических свойств металла труб с использованием методов определения твердости основного металла трубопровода, включая определение характеристик механических свойств металла труб по твердости на основе регистрации диаграммы вдавливания шара (по методу Бринелля) и многократного определения твердости по методу Виккерса, а также определения структурного состояния основного металла труб магнитным методом измерения коэрцитивной силы.

По исходным данным (физико-механические свойства труб, пространственное положение трубопровода, давление испытания, рабочее давление) выполнен расчет НДС газопровода, который включал сопоставление уровня механических напряжений в стенке труб со значением предела текучести их материала. По результатам расчета установлено, что при испытании рассматриваемого участка газопровода давлением, равным $p_{ucn} = 1,1p_{pa6}$, а также в процессе его эксплуатации при давлении p = 11,8 МПа, материал всех смонтированных труб испытывает только упругие деформации. Появление упруго-пластических деформаций возможно на трубах с номинальной толщиной стенки 26,4 мм при испытании газопровода давлением, равным $p_{ucn} = 1,25p_{pa6}$. При снятии такой нагрузки уровень остаточных деформаций составит не более 0,012 %.

По результатам измерений механических свойств металла околошовной зоны в шурфе № 4 с помощью прибора ПИМ-ДВ-1 двух сваренных между собой труб до и после пневматических испытаний установлено следующее: – среднее значение твердости металла труб (НВ) на удалении от границ кольцевого сварного шва на 30 мм, на первой трубе составило 217 единиц, на второй – 216 единиц, с сохранением указанных результатов после пневматических испытаний;

 – на удалении от границ кольцевого сварного шва на 20 мм среднее значение твердости составило 223 единицы у первой трубы и 224 у второй, со снижением после пневматических испытаний до 214 – 216 единиц;

 в зонах, удаленных от кольцевого сварного шва на 10 мм, среднее значение твердости составило 230 единиц у первой трубы и 240 единиц у второй, со снижением после пневматических испытаний до 215 – 218 единиц;

– установлено, что первая контрольная зона, удаленная от границ кольцевого сварного шва на 10 мм, предположительно соответствует области упрочнения металла, соответственно, характеризуется повышенными прочностными показателями (предел текучести в среднем выше нормативного значения на 5 – 8 %, предел прочности выше нормативного значения на 5 – 9 %);

– на расстоянии 20 мм от границ кольцевого сварного шва, предположительно, находится переходная область, прочность металла в которой несколько ниже, чем в области упрочнения, но выше основного металла труб или соответствует нормативным значениям прочностных показателей (предел прочности 740 МПа, предел текучести 555 МПа);

– контрольная зона, удаленная от границ кольцевого сварного шва на 30 мм, находится в области отпуска металла, соответственно, характеризуется несколько сниженными, по сравнению с основным металлом труб, характеристиками (предел текучести в среднем ниже на 4,5 – 6,0 %, предел прочности ниже на 2,7 – 3,3 %);

– после пневматических испытаний наблюдается выравнивание прочностных показателей в зонах, удаленных от кольцевого сварного шва на 10 и 20 мм, при этом предел текучести материала достигает величины 515 – 530 МПа (ниже нормативного значения на 4,5 – 7,0 %), предел прочности 707 – 725 МПа (ниже нормативного значения на 2,0 –4,5 %).

Характер изменения значений коэрцитивной силы в контрольных сечениях по окружности трубы до и после пневматических испытаний во всех шурфах идентичен. По результатам измерений, проведенных перед пневматическими испытаниями, установлено:

– на всех объектах контроля (в четырех шурфах), при последовательном перемещении датчика вдоль оси МГ с пересечением кольцевого сварного шва наблюдается характерное (первоначально зафиксированное при лабораторных испытаниях, см. п 5.5.3) изменение уровня коэрцитивной силы с последовательным снижением с приближением к кольцевому

сварному шву первой трубы, ростом над сварным швом, снижением в околошовной зоне второй трубы и повышением при переходе к основному металлу второй трубы;

– коэрцитивная сила, измеренная над кольцевым сварным швом, выше уровня, наблюдаемого при измерении на основном металле трубы на 14 – 16 %, что в данном случае, вероятно, обусловлено более высокими механическими характеристиками металла кольцевого сварного шва, а также особенностями его геометрии.

По результатам проведения измерений коэрцитивной силы после пневматических испытаний участка МГ установлено:

– коэрцитивная сила, измеренная над кольцевым сварным швом, ниже уровня, зафиксированного перед пневматическими испытаниями на 3,0 – 4,5 %, что, возможно, связано с перераспределением, а также снижением уровня остаточных напряжений, образуемых в металле сварного шва и околошовной зоны при сварке;

– в зонах с низким уровнем коэрцитивной силы (характерные минимумы на удалении 0,03 – 0,04 м от границ кольцевого сварного шва) после пневматических испытаний наблюдается рост указанного параметра, что в данном случае, возможно, связано с повторным упрочнением зон отпуска металла труб;

– на удалении от зоны термического влияния (на 0,06 – 0,08 м) остается на прежнем уровне или изменяется на величину до 2,5 %, как в сторону увеличения, так и уменьшения.

Результаты анализа данных, полученных в ходе магнитного сканирования металла околошовных зон и кольцевого сварного шва, содержащего некритические дефекты, показывают следующее:

– общий характер изменения уровня коэрцитивной силы при последовательном магнитном сканировании металла труб в околошовных зонах, а также металла сварного шва с некритическим дефектом соответствует распределениям, полученным при обследовании, как лабораторных образцов, так и металла труб и сварного шва без дефектов;

– после пневматических испытаний уровень коэрцитивной силы над сварным швом с некритическим дефектом остается на прежнем уровне или увеличивается на 1 – 3 %, что может говорить о структурных изменениях металла сварного шва в окрестности дефекта вследствие высокого уровня внутренних напряжений, что подтверждено результатами расчетного моделирования.

Проведенные исследования показали, что физико-механические характеристики металла (определенные различными методами) в окрестности кольцевых сварных швов труб МГ Бованенково – Ухта в ходе проведения пневматических испытаний изменились незначительно. Расчет НДС металла труб (с учетом изменившихся физико-механических свойств металла после пневматических испытаний) показал, что трубы под воздействием, как испытательного, так и рабочего давления испытывают упругие деформации, т. е. структурные изменения в металле труб незначительны. Таким образом, металл труб МГ Бованенково – Ухта в окрестности сварных кольцевых швов обладает необходимыми прочностными характеристиками механических свойств, отвечающими требованиям, предъявляемым к МГ, за исключением несоответствия сертификатным значениям характеристик пластических свойств, характеризуемых относительным удлинением после разрыва.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Разработаны и экспериментально реализованы методы оценки изменения физикомеханических свойств металла труб из высокопрочных сталей К60 и К65 в ходе испытаний газопровода на прочность при двукратном диагностировании газопровода до и после проведения пневматических испытаний с использованием методов определения твердости основного металла трубопровода, включая определение характеристик механических свойств металла труб по твердости на основе регистрации диаграммы вдавливания, а также определения состояния основного металла труб магнитным методом измерения коэрцитивной силы.

2) Разработана и реализована методика испытания образцов из трубных сталей К60 и К65 для получения градуировочных зависимостей коэрцитивной силы металла от параметров напряженного состояния и ориентации магнитного потока датчика прибора относительно вектора возникающих напряжений на лабораторном стенде для создания в металлических образцах напряженного состояния под действием изгибающей нагрузки.

3) Разработана для практического использования и прошла верификацию на полноразмерном трубном стенде методика оценки параметров НДС газопроводов из высокопрочных сталей К60 и К65 при эксплуатации, позволяющая сопоставить диагностические результаты с нормативными требованиями и установить характер деформаций (упругие, упругопластические), которые испытывал материал трубопровода при его испытании.

4) На основе оценки возможности влияния внешних факторов на изменение технического состояния газопровода при испытаниях на прочность внутренним давлением определены критерии и даны рекомендации по выбору участков газопроводов, которые предрасположены к накоплению повреждений, зарождению и развитию дефектов при проведении испытаний.

5) Разработаны рекомендации по проведению пневматических испытаний на прочность при условии 1,25-кратного превышения рабочего давления для участков категории H, обеспечившие оптимизацию материальных и временных затрат за счет расчетного обоснования возможности и прогнозирования последствий проведения таких испытаний при строительстве. Данные рекомендации внедрены при вводе в эксплуатацию участка МГ "Бованенково-Ухта".

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авдеев Б.А. Техника определения механических свойств материалов. – М.: Машиностроение, 1965. – 488 с.

2. Агиней Р.В. Разработка методики оценки напряженного состояния нефтегазопроводов по коэрцитивной силе металла: автореф. дис. канд. техн. наук – Ухта, 2005. – 21 с.

3. Агиней Р.В., Андронов И.Н. Коэрцитиметрический контроль трубопроводов в условиях двуосного напряженного состояния / Воронеж. гос. у-нт. VI Междунар. конф. Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов: Тез. докл. – Воронеж, 2004. – С. 199 – 202.

4. Агиней Р.В., Андронов И.Н., Кузьбожев А.С. Учет состояния материала конструкции при определении механических напряжений коэрцитиметрическим методом // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 5. – С. 6 – 8.

5. Агиней Р.В., Андронов И.Н., Теплинский Ю.А. Определение напряженного состояния трубопроводов коэрцитиметрическим методом / Воронеж. гос. у-нт. Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в физических, химических и технических системах. М-лы III Междунар. семинара 22 – 24 апр. 2004 г. – Воронеж, 2004. – С. 200 – 203.

6. Агиней Р.В., Андронов И.Н., Теплинский Ю.А. Оценка механических свойств и структуры стали 17Г1С магнитным методом / Воронеж. гос. у-нт. Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в физических, химических и технических системах. Млы III Междунар. семинара, 22 – 24 апр. 2004 г. – Воронеж, 2004. – С. 197 – 199.

7. Агиней Р.В., Теплинский Ю.А., Кузьбожев А.С. Магнитный метод как средство оценки напряженного состояния надземных трубопроводов / Тринадцатая Междунар. деловая встреча «Диагностика-2003», Мальта, апр. 2003 г. Т.З. Ч.1. Диагностика линейной части магистральных и распределительных газопроводов, ГРС и КЗ МГ. – ООО ИРЦ «Газпром», 2003. – С.79 – 84.

8. Айнбиндер А.Б., Камерштейн Л.Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. – М.: Недра, 1982. – 341 с.

9. Ангалев А.М., Стрельцов С.А., Перов С.Л., Якубович В.А. Анализ фактических статических и динамических нагрузок на технологические трубопроводы компрессорных станций // В сб. докл. 12-й межд. дел. встр. «Диагностика-2002». – М.: ИРЦ «Газпром», 1999. – С. 119 – 121.

10. А.с. 1080064 СССР, МПК G 01 N 3/00. Способ определения напряжений при нагружении деталей из ферромагнитных материалов на железной основе / Н.Н. Качанов, Р.К. Вахитов, А.П. Дегтерев и др. – № 3924801/25-28; заявл. 10.07.85; опубл. 23.10.86, Бюл. № 39.

11. Бабич В.К., Гуль Ю.П., Долженов И.Е. Деформационное старение стали – М.: Машиностроение, 1972. – 320 с.

12. Бердник М.М. Развитие метода оценки напряженно-деформированного состояния нефтегазопроводов по коэрцитивной силе металла: автореф. дис. канд. техн. наук – Ухта, 2010. – 24 с.

13. Бида Г.В. О корреляции ударной вязкости литых вагоностроительных сталей с коэрцитивной силой: тезисы докладов III Российской научно-технической конференции «Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций».– Белинск: 2007. – С. 23 – 29.

14. Боровкова М.А., Захаров В.А. Влияние двухосных нагрузок на коэрцитивную силу углеродистых сталей // Современные методы неразрушающего контроля и их метрологическое обеспечение. Тезисы докладов. – Ижевск, 1984. – С. 26 – 27.

15. Бородавкин П.П., Синюков А.М. Прочность магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1984. – 245 с.

16. Боченин В.И., Лисицкая С.И., Шигарев Ю.А. Радиоизотопный анализ остаточных напряжений в крупногабаритных изделиях // Изотопы в СССР. – 1981. – № 3/62. – С. 7 – 9.

17. Булычев С.И., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.

18. Визуально-оптический и измерительный контроль как средства технического диагностирования металлических конструкций зданий и сооружений / В.Е. Гордиенко, Н.В. Овчинников, А.О. Бакшеев и др. // Вестник гражданских инженеров. – 2005. – № 4 (5). – С. 20 – 24.

19. Влияние внешних напряжений на коэрцитивную силу углеродистых сталей / В.А. Захаров, М.А. Боровкова, В.А. Комаров и др. // Дефектоскопия. – 1992. – № 1. – С. 41 – 46.

20. Влияние деформационного старения высокопрочных трубных сталей на их свариваемость / Л.А. Ефименко, О.Ю. Елагина, А.А. Шкапенко, В.Ю. Илюхин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2011. – № 5. – С. 44 – 47.

21. Влияние структурных изменений при отпуске на обратимые процессы намагничивания в конструкционных сталях / А.П. Ничипурук, Э.С. Горкунов, В.Г. Кулеев и др. // Дефектоскопия. – 1990. – № 8. – С. 68 – 75.

22. Вонсовский С.В. Магнетизм – М.: Наука, 1971. – 1032 с.

23. Вязкие свойства малоперлитной стали с ванадием и ниобием / А.В. Рудченко, Б.М. Овсянников, Д.А. Литвиненко и др. // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». – 1974. – № 8. – С. 47 – 49.

24. Гапченко М.Н. Хрупкое разрушение сварных соединений и конструкций. – М.: Машгиз, 1963. – 121 с.

25. Гладштейн Л.И., Литвиненко Д.А., Рудченко А.В. Влияние легирующих элементов на структуру и свойства низколегированной стали с азотом и ванадием // Сталь. – № 1. – С. 74 – 79.

26. Герасимов В.Г., Останин Ю.Я., Покровский А.Д. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами. – М.: Энергия, 1978. – 216 с.

27. Голованенко С.А., Невская О.Н. Влияние контролируемой прокатки на характер разрушения малоперлитных сталей для труб большого диаметра // Сталь. – 1984. – № 12. – С. 51 – 56.

28. Гольдштейн М.И. Количественная оценка предела текучести стали по параметрам структуры (обзор) // Термическая обработка и физика металлов. – 1979. – Вып. 3. – С. 5 – 16.

29. Горбаш В.Г. Модуляционный метод контроля механических напряжений в ферромагнитных материалах по магнитной анизотропии с использованием накладных преобразователей: автореф. дис. канд. техн. наук. – Минск, 1985. – 28 с.

30. Гордиенко В.Е. К вопросу оценки НДС металла при упругопластическом деформировании // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 1. – С. 54 – 55.

31. Гордиенко В.Е. К вопросу повышения надежности строительных металлических конструкций // Вестник гражданских инженеров. – 2006. – № 3 (8). – С. 37 – 42.

32. Гордиенко В.Е. Научные основы неразрушающего контроля металлических конструкций по остаточной намагниченности в области Рэлея: дисс. д-ра техн. наук. – СПб, 2009. – 356 с.

33. Горицкий В.М., Кулемин А.М. Анализ причин трещинообразования стали 09Г2С при изготовлении сварного кожуха доменной печи // Промышленное и гражданское строительство. – 2005. – № 5. – С. 29 – 31.

34. ГОСТ 166-89. Штангенциркули. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1989.

35. ГОСТ 427-75. Линейки измерительные металлические. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1975.

36. ГОСТ 577-68 (СТ СЭВ 3138-81). Индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 9 с.

37. ГОСТ 7268-82. Сталь. Метод определения склонности к механическому старению по испытанию на ударный изгиб. – Взамен ГОСТ 7269-67; введ. 01.01.1983, утв. 03.09.1982. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 17 с.

38. Гуща О.И. Ультразвуковой метод определения остаточных напряжений, состояния и перспективы // Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. – Киев: Институт электросварки, 1983. – С. 77 – 89.

39. Дрозд М.С. Определение механических свойств металла без разрушения. – М.: Металлургия, 1965. – 170 с.

40. Дубов А.А., Дубов А.А., Колокольников С.М. Метод магнитной памяти (ММП) металла и приборы контроля. Учеб. пособ. – М.: Изд-во ЗАО «Тиссо», 2003. – 320 с.

41. Дунаев Ф.Н. Влияние упругих напряжений на ориентацию намагниченности в ферромагнитном многоосном кристалле: Учен. записки Уральского госуниверситета. – 1968. – вып. 4. – С. 10 – 29.

42. Дунаев Ф.Н. О влиянии упругих напряжений на магнитные свойства ферромагнетиков // Магнитные, механические, тепловые и оптические свойства твердых тел. – Свердловск: УрГУ, 1965. – С. 92 – 96.

43. Елфимов А.В., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н., Шишкин И.В. Расчетная модель всплытия и осадки магистрального газопровода Бованенково – Ухта при оттаивании многолетнемерзлых грунтов // Газовая промышленность. – 2014. – № 2. – С. 39 – 43.

44. Елфимов А.В., Колотовский А.Н. Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н. Диагностирование инженерно-геокриологических условий по трассе МГ «Бованенково – Ухта» // Газовая промышленность. – 2015. – № 724 (специальный выпуск). – С. 28 – 33.

45. Елфимов А.В., Сальников А.В., Быков И.Ю., Бирилло И.Н., Кузьбожев П.А. Исследование магнитных характеристик высокопрочной трубной стали при изгибе // Инженернефтяник. – 2015. – № 3. – С. 55 – 59.

46. Елфимов А.В., Сальников А.В., Быков И.Ю., Бирилло И.Н., Кузьбожев П.А. Расчетно-экспериментальный контроль силового нагружения газопроводов при проведении пневматических испытаний на прочность // Инженер-нефтяник. – 2015. – № 4. – С. 45 – 50.

47. Елфимов А.В. Анализ результатов магнитного контроля кольцевых сварных швов с допустимыми дефектами в ходе пневматических испытаний газопровода Бованенково – Ухта // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2019. – № 2. – С. 53 – 58.

48. Елфимов А.В., Будревич Д.Г., Стеклова Е.О. и др. Формирование требований к автоматизированному ультразвуковому контролю качества сварных соединений газопроводов

на примере квалификационных испытаний комплекса Rotoscan для контроля качества сварных соединений морского перехода через Байдарацкую губу МГ Бованенково – Ухта // В сб. докладов IV Межд. конф. GTS-2009, 2010. – С. 322 – 327.

49. Елфимов А.В., Карпов С.В., Алихашкин А.С. Технические решения по заполнению газом северных газопроводов на примере магистрального газопровода Бованенково – Ухта // В сб. докладов III, IV Межд. конф. GTS-2011, 2012. – С. 61 – 72.

50. Елфимов А.В., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н. Результаты экспериментального исследования изменения коэрцитивной силы сталей К60 и К65 от воздействия изгибающей нагрузки // В юбилейном сб. статей к 55-летию филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта, 2015. – С. 187 – 197.

51. Елфимов А.В., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н. Анализ особенностей определения температуры мерзлых грунтов на участках прокладки газопровода Бованенково – Ухта // В юбилейном сб. статей к 55-летию филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта, 2015. – С. 100 – 107.

52. Елфимов А.В., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н. Исследование изменения физикомеханических свойств материала труб после проведения пневматических испытаний при вводе в эксплуатацию МГ Бованенково – Ухта // В юбилейном сб. статей к 55-летию филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта, 2015. – С. 151 – 162.

53. Елфимов А.В., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н. Применение георадиолокационного метода для диагностирования газопроводов Бованенково – Ухта на многолетнемерзлых грунтах // В юбилейном сб. статей к 55-летию филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта, 2015. – С. 163 – 172.

54. Елфимов А.В., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н. Особенности оценки устойчивого положения технологической обвязки и запорной арматуры крановых узлов магистрального газопровода Бованенково – Ухта на начальной стадии эксплуатации // В юбилейном сб. статей к 55-летию филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта, 2015. – С. 208 – 216.

55. Елфимов А.В., Сальников А.В., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н. Прогноз изменения инженерно-геокриологических условий по трассе магистрального газопровода Бованенково – Ухта // В юбилейном сб. статей к 55-летию филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта, 2015. – С. 172 – 179.

56. Захаров В.А., Боровкова М.А., Бабкин С.Э. О связи коэрцитивной силы с механическими напряжениями в конструкционных сталях // Неразрушающие физические методы и средства контроля материалов и изделий. Тезисы докладов. – Ижевск, 1984. – С. 62 – 64. 57. Заявка 60-1576 Япония, МКИ G 01 N 23/207, G 01 L /1/00, G 21 G 4/04, публикация 16.01.85, № 6-40. Устройство для измерения механического напряжения в материалах с помощью широкополосного рентгеновского излучения.

58. Ивакин Б.И., Карус Е.В., Кузнецов Е.Л. Акустический метод исследования скважин. – М.: 1978. – 320 с.

59. Измерение напряжений в стали с помощью коэрцитиметра / В.Ф. Новиков,
 М.С. Бахарев, В.В. Нассонов и др. // Нефть и газ. – 2005. – № 2. – С. 89 – 94.

60. Ильюшин А.А. Пластичность – М.: ОГИЗ, 1948. – 376 с.

61. Исследование и расчет напряжений в деталях машин и конструкциях / Под ред. Н.И. Пригоровского. – М.: «Наука», 1966. – 192 с.

62. Исследование связей механических и физических характеристик со структурными параметрами непрерывнолитой горячекатаной стали 45 / Э.С. Горкунов, А.Б. Бухвалов, А.З. Каганович и др. // Дефектоскопия. – 1996. – № 2. – С. 61 – 69.

63. К теории определения влияния начальных напряжений на результаты ультразвуковых измерений / А.Н. Гузь, Ф.Г. Махорт, О.Н. Гуща, В.К. Лебедев // Прикладная механика. – 1971. – № 6. – С. 110 – 113.

64. Карякин Ю.Е., Башкарев А.Я. Методы и средства неразрушающего контроля трубопроводов АЭС для оценки их остаточного ресурса: Сб. науч. тр. IV науч.-техн. конф. «Научно-инновационное сотрудничество» – М.: МИФИ, 2005. – С. 31 – 32.

65. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.

66. Константинов Л.С., Прухов А.П. Напряжения, деформации и трещины в отливках.
 – М.: Машиностроение, 1981. – 213 с.

67. Кузнецов Н.С., Кузнецов А.Н. Оценка напряженного состояния стальных конструкций по магнитным характеристикам ферромагнетиков // Дефектоскопия, 2001. – № 1. – С. 23 – 32.

68. Кулеев В.Г., Горкунов Э.С. Механизмы влияния внутренних и внешних напряжений на коэрцитивную силу ферромагнитных сталей // Дефектоскопия. – 1997. – № 11. – С. 3 – 18.

69. Курносов Д.Г., Якутович М.В. Измерение остаточных напряжений методом высверливания отверстия // Заводская лаборатория. – 1946. – № 11 – 12. – С. 960 – 967.

70. Лебедев А.А., Ковальчук Б.И., Ломашевский В.П. Расчеты при сложном напряженном состоянии (определение эквивалентных напряжений). – Киев: ИПП АН УССР, 1979. – 63 с.

71. Леонов И.С. Совершенствование коэрцитиметрического метода для анализа напряженного состояния нефтегазопроводов: автореф. дис. канд. техн. наук – Ухта, 2013. – 24 с.

72. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций грузоподъемных кранов / М.А. Мужицкий, Б.Е. Попов, Г.Я. Безлюдько и др. // Дефектоскопия. – 1996. – № 4. – С. 12 – 18.

73. Марков А.А., Бершадская Т.Н., Белоусов Н.А. Комплексное развитие средств неразрушающего контроля // Радиоэлектронные комплексы многоцелевого назначения: сб. науч. тр. ОАО «Радиоавионика», 1991 – 2006. – СПб: «Береста», 2006. – С. 23 – 24.

74. Марковец Н.П., Матюнин В.М., Шабанов В.М. Переносные приборы для измерения твердости и механических свойств // Заводская лаборатория, 1989. – Т. 55. – № 12. – С. 73 – 76.

75. Матросов Ю.И., Литвиненко Д.А., Голованенко С.А. Сталь для магистральных трубопроводов. – М., 1989. – 289 с.

76. Матросов Ю.И., Насибов А.Г. Влияние режимов регулируемой прокатки на свойства малоперлитной стали с ниобием // Специальные стали и сплавы. Отраслевой сб. – 1974. – С. 136 – 145.

77. Матросов Ю.И., Насибов А.Г. Свойства малоуглеродистой стали с добавками ванадия после контролируемой прокатки // Известия АН СССР. Металлы. – 1974. – № 2. – С. 159 – 166.

78. Матросов Ю.И., Насибов А.Г., Голиков И.Н. Свойства малоперлитных сталей с ванадием и ниобием после контролируемой прокатки // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1974. – № 1. – с. 27 – 34.

79. Методы акустического контроля металлов / Н.П. Алешки, В.Е. Белый, А.Х. Вопилкин и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с.

80. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов. Физические методы исследования материалов. / Под ред. С.Т. Кишкина. – М.: Машиностроение, 1971. – 554 с.

81. Методы исследования напряжений в конструкциях энергетического оборудования / Отв. ред. Н.И. Пригоровский. – М.: «Наука», 1966. – 192 с.

82. Михайлов О.Н., Березин Б.И. Статистические методы расчетов на прочность. Исследование методом кольца и методом канавки остаточных напряжений в контейнерах тяжелых гидропрессов. – 1970. – Вып. 4. – С. 85 – 89. 83. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля – М.: «Наука», 1993. – 252 с.

84. Моделирование диаграммы деформирования на основе измерения ее магнитных характеристик / Э.С. Горкунов, В.П. Федотов, А.Б. Бухвалов и др. // Дефектоскопия. – 1997. – № 4. – С. 87 – 95.

85. МР 1209-05 Методика определения механических напряжений в технологических трубопроводах компрессорных станций по коэрцитивной силе материала. – Ухта: филиал ООО «ВНИИГАЗ» – «Севернипигаз», 2005. – 72 с.

86. Мужицкий В.Ф., Безлюдько Г.Я. Магнитный контроль напряженнодеформированного состояния труб магистральных газопроводов: сб. докл. межд. деловой встречи «Диагностика-97», Т 2. – М.: ИРЦ «Газпром», 1999. – С. 163 – 171.

87. Мужицкий В.Ф., Попов Б.Е., Безлюдько Г.Я. Магнитный контроль напряженнодеформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций подъемных сооружений и сосудов, работающих под давлением // Контроль и диагностика. – 2000. – № 9. – С 48 – 50.

88. Мусихин С.А. О возможности неразрушающего контроля напряженного состояния трубопроводов в режиме испытаний и эксплуатации // Нефть и газ Западной Сибири. Проблема добычи и транспортировки. Тезисы докладов. – Тюмень, 1985. – С. 189 – 190.

89. Мусихин С.А., Новиков В.Ф., Лиханов В.Г. Приборная реализация коэрцитиметрического метода измерения напряжений в конструкционных сталях // Современные методы неразрушающего контроля и их метрологическое обеспечение. – Устинов, 1986. – С. 43 – 44.

90. Насибов А.Г., Литвиненко Д.А., Попова Л.В. Свойства стали 08Г2ФБ для рулонированных сосудов высокого давления // Сталь. – 1985. – № 3. – С. 73 – 75.

91. Насибов А.Г., Попова Л.В. Углеродистая сталь массового производства с микродобавками карбонитридообразующих элементов после контролируемой прокатки. Эффективные способы термической обработки и легирования для повышения свойств качественных сталей и сплавов. Отраслевой сб. – М., 1988. – С. 23 – 27.

92. Насибов А.Г., Попова Л.В., Шемякин А.В. Нормализованная сталь 13Г2АФ для газонефтепроводов // Сталь. – 1980. – № 4. – С. 75 – 78.

93. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: практ. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешкин, А.Н. Потапов. – М.: Высш. шк., 1991. – 283 с.

94. Неразрушающий контроль материалов и изделий / П.И. Беда, Б.И. Выборнов, Ю.А. Глазков и др. – М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.

95. Неразрушающий контроль материалов и элементов конструкций // Под ред. А.Н. Гузя. – Киев: Наукова думка, 1981. – С. 115 – 165.

96. Неразрушающий контроль механических свойств горячекатаной полосы магнитным методом / Н.Н. Тимошенко, Н.Г. Бочков, А.А. Алымов и др. // Заводская лаборатория. – 1976. – № 8. – С. 979 – 981.

97. Низколегированная листовая сталь повышенной прочности и вязкости / В.В. Наговицын, Ю.И. Матросов, А.Г. Насибов и др. // Металлург. – 1980. – С. 26 – 28.

98. Ничипурук А.П., Дегтярев М.В., Горкунов Э.С. Микроструктура, механические и магнитные свойства стали Ст3 и стали У8 после циклического деформирования растяжением // Дефектоскопия. – 2001. – № 1. – С. 32 – 37.

99. Новиков В.Ф., Изосимов В.А. Влияние упругих напряжений на коэрцитивную силу // Физика металлов и металловедение. – 1984. – Т.58. – Вып.1. – С. 275 – 281.

100. Новиков В.Ф., Тихонов В.П. К определению напряжений в лопатках турбин магнитоупругим методом // Проблемы прочности. – 1981. – № 1. – С. 64 – 67.

101. Новиков В.Ф., Фатеев И.Г. Магнитоупругие свойства пластически деформированных и сложнонапряженных магнетиков. – М.: Недра, 1997. – 196 с.

102. Новиков В.Ф., Яценко Т.А., Бахарев М.С. Зависимость коэрцитивной силы от одноосных напряжений (Часть 1) // Дефектоскопия. – 2001. – № 11. – С. 51 – 57.

103. Новиков В.Ф., Яценко Т.А., Бахарев М.С. Зависимость коэрцитивной силы от односных напряжений (Часть 2) // Дефектоскопия. – 2002. – № 4. – С. 10 – 17.

104. Новиков В.Ф., Яценко Т.А., Бахарев М.С. К природе пьезомагнитного эффекта остаточно намагниченного состояния магнетика // Известия вузов. Нефть и газ. – 1998. – № 4. – С.96 – 102.

105. Области применимости методов неразрушающего контроля напряжений в металлоконструкциях / Ангалев А.М., Демков А.Ю. и др. // В сб. докл. межд. дел. встр. «Диагностика-2002». – Т 1. – М.: ИРЦ «Газпром», 1999. – С. 143 – 146.

106. Опыт применения метода эффекта Баркгаузена для контроля напряженного состояния деталей из высокопрочной стали / В.В. Филинов, Ю.А. Резников, А.В. Вагин и др. // Дефектоскопия. – 1992. – № 5. – С. 17 – 20.

107. Пат. 2035690 Российская Федерация, МПК G 01 B 7/24, G 01 N 3/08. Способ определения напряжений в ферромагнитных материалах на железной основе / Н.Н. Качанов, А.П. Дегтерев, М.Н. Орлова и др. – № 4453055/28; заявл. 30.06.88; опубл. 20.05.95.

108. Попов Б.Е., Котельников В.С. Магнитная диагностика и остаточный ресурс подъемных сооружений // Безопасность труда в промышленности, 2001. – № 2. – С. 44 – 49. 109. Попова Л.В., Насибов А.Г., Карчевская Н.И. Свойства стали 17Г2АФ после нормализации и улучшения // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1986. – № 5. – С. 35 – 36.

110. Попова Л.В., Насибов А.Г., Литвиненко Д.А. Свойства стали 09Г2НБ после различных режимов контролируемой прокатки // Влияние легирования и термической обработки на свойства качественных сталей и сплавов. Отраслевой сб. – 1985. – С. 11 – 15.

111. РД ИКЦ «КРАН» – 007 – 97 – 97. Методические указания. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса подъемных сооружений при проведении их обследования и техническом диагностировании. – М., 1997 г. – 58 с.

112. Рудченко А.В., Насибов А.Г., Литвиненко Д.А. Малоперлитная сталь с ванадием и ниобием // Сталь. – 1974. – № 2. – С. 160 – 163.

113. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Клишин Г.С. Методы и технологии численного моделирования газопроводных систем – М.: Едиториал УРРО, 2002. – 448 с.

114. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*. – Введ. 01.07.2013. – М.: ФАУ «ФЦС», 2013. – 93 с.

115. СТО Газпром 2-2.1-249-2008. Магистральные газопроводы. – М.: ООО ИРЦ «Газпром», 2008. – 150 с.

116. Структура и свойства рулонной стали 09Г2НВ / Л.В. Попова, А.Г. Насибов, Н.И. Карчевская, Д.А. Литвиненко // Известия АН СССР: Металлы. – 1983. – № 6. – С. 151 – 154.

117. Табачник В.П. Влияние зазора на показания коэрцитиметра с П-образным электромагнитом // Дефектоскопия. – 1990. – № 2. – С. 42 – 52.

118. Табачник В.П., Чернова Г.С. Коэрцитиметр с приставным Н-образным магнитом // Дефектоскопия. – 1999. – № 105. – С. 67 – 75.

119. Тылкин М.А., Большаков В.И., Одесский П.Д. Структура и свойства строительной стали – М.: Металлургия, 1983. – 287 с.

120. Улучшение качества нормализованных листов из стали 17Г2АФ / В.Т. Абабков, Ю.И. Матросов, А.Г. Насибов и др. // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». – 1980. – № 5. – С. 43 – 45.

121. Ульянов А.И., Чулкина А.А. Магнитные свойства цементита и коэрцитивная сила углеродистых сталей после пластической деформации и отжига // Физика металлов и металловедение. – 2009. – № 5. – С. 472 – 481. 122. Харионовский В.В. Проблемы надежности и технологической безопасности газотранспортных систем / Сб. Проблемы надежности конструкций в газотранспортных системах. – М.: ВНИИГАЗ, 1998. – С. 6 – 25.

123. Хрущов М.М., Беркович Е.С. Приборы ПМТ-2 и ПМТ-3 для испытания на микротвердость. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – 79 с.

124. Шаммазов А.М., Зарипов Р.М., Коробков Г.Е. Разработка метода расчета НДС газопроводов, проложенных в сложных инженерно-геологических условиях // Нефтегазовое дело. – 2004. – № 2 – С. 119 – 128.

125. Экспериментальная механика. Книга I. – М.: Мир, 1990. – 607 с.

126. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справочное пособие / Под ред. Касаткина. – Киев: Наукова думка, 1981. – 582 с.

127. Harid H., Middeldorf k. Thermometrische Methoden bei der mehaniscen Werkstoffpiifung. «Werkstoffprufung, 1984, Vortr. Tag., Bad Nauheim, 6 – 7 Dez., 1984.» Berlin, 1985. – P. 441–451.

128. Hetherington M.G., Jakubovics J.P., Szpunar J.F., Tanner B.K. High-voltage Lorents electron microscopy studies of domain structures and magnetization processes in pearlinic steels // Phil. Mag. – 1987. – Vol. 56, N_{2} 5. – P. 561 – 577.

129. Jiles D.S. Magnetic properties and microstructure of AISI 1000 series carbon steels. – D.: 1988 [Appl], – P. 1186 – 1195.

130. Kneller E. Ferromagmetismus. – Berlin: 1962. – p. 553.

131. Kussmann A., Scharnov B. Uber die Koerzitivkraft und Mechanische Harte // Zs. Phis.
– 1929. Vol. 54 – P. 538 – 553.

132. Meiklejohn V.H. Experimental Study of the Coercive Force of Fine Particles // Review of Modern Physics. – 1953. – Vol. 25. – p. 302.

133. Neel L. Bases d'une champ coercitif // Ann. Univ. Grenoble. – 1946. – Vol. 22. – P. 299 –
343.

134. Ranjan R., Yieles D.C., Rastogi P.K. Magnetic properties of decarburized steels: An investigation of the effect of grain size and carbon content // JEEE Trans. Magn. – 1987. – Vol. 23, N_{2} 3. – P. 1869 – 1876.

135. Rautiaho R., Karjalanen L.P., Moilanen M. Stress response of Barkhausen noise and coercive forse in 9Ni steels // J. Magen a Magen. Mater. – 1987. – Vol. 68. – P. 321 – 327.

136. Siemers D., Nembach E. Hardening of ferromagnets by nonmagnetic inclusions // Am met. – 1979. – Vol. 27 – P. 231 – 234.

137. Sizoo G.J., Uber den Zusammhang Zwischen Korngrosse und Magnetischen Eigenschaften bei Reinem Eisen // Zeitschrift fur Phisik. – 1928. – Vol. 1. – p. 557.

138. Tanner B.K., Szpunar I.A., Willcock S.N. M. and other. Magnetic and metallurgical properties of high-tensile steels // J. Mat. Science. – 1988. – Vol. 23 – P. 4535 – 4540.

139. Trauble H. In Modern Probleme der Mettalphisik, Ed. A. Seege, B. – New York: Springer, 1966. – P.157 – 475.

140. Yensen T.D. The Magnetic Properties of the Ternary Alloys Fe-Si-C // Transactions, American Institute of Electrical Engineers. – 1924. – Vol.43. – p. 145.