

На правах рукописи



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»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью
«Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий –
Газпром ВНИИГАЗ»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кузьбожев Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: Поляков Вадим Алексеевич,
доктор технических наук, профессор,
Заместитель заведующего кафедрой по
учебной работе ФГАОУ ВО «Российский
государственный университет нефти и
газа (национальный исследовательский
университет) имени И.М. Губкина»

Ляпичев Дмитрий Михайлович, кандидат
технических наук, заместитель
генерального директора по
сопровождению эксплуатации объектов
Единой системы газоснабжения
АО «Газпром Оргэнергогаз»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный
технический университет»

Защита диссертации состоится 2 декабря 2020 г. в 14:00 на заседании
диссертационного совета Д 511.001.03 в ООО «Газпром ВНИИГАЗ», по адресу:
142717, Московская область, Ленинский район, поселок Развилка,
Проектируемый проезд № 5537, владение 15, строение 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ООО «Газпром
ВНИИГАЗ» <http://vniigaz.gazprom.ru/activities/other/education/discounsil/511.001.03>.

Автореферат разослан «___» октября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Александр Михайлович Семенцев

Общая характеристика работы

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, исключая 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:

1) 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 полно-размерном 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 не критического 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 не критических 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 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 образ-

цов из стали К60, К65 под действием изгибающей нагрузки в процессе стендового моделирования;

– расчетно-экспериментальное обоснование методики оценки изменения физико-механических 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.);

– X 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 нефтегазопроводных 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 пять 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.

Содержание работы

Во введении обоснованы актуальность и значимость выбранной темы, степень ее разработанности, охарактеризованы научно-методические пути ее решения.

В первой главе выполнен анализ особенностей металла новых высокопрочных труб, изготовленных из сталей классов прочности К60 (Х70) и К65 (Х80), из которых сооружен газопровод Бованенково – Ухта. Благодаря используемой технологии производства сталей К60 и К65 повышены их прочностные свойства, при этом обеспечиваются высокие пластические свойства.

Вместе с тем, вследствие повышения прочности трубной стали также происходит повышение ее чувствительности к дефектам и концентраторам напряжения, а также к любым технологическим воздействиям, прежде всего к сварке, а также резкое повышение чувствительности материала к воздействию механического нагружения. Это является основной предпосылкой для необходимости дальнейшего совершенствования методов оценки напряженного состояния магистральных трубопроводов и других методов, чувствительных к структурным изменениям в металле новых высокопрочных труб из стали К60 и К65 при деформационных воздействиях.

Вопросами испытаний магистральных трубопроводов занимались Бородавкин П.П., Галлиулин З.Т., Гумеров А.Г., Дубинский В.Г., Иванцов О.М., Карпов С.В., Климовский Е.М., Колотилов Ю.В., Красулин И.Д., Маянц Ю.А., Митрохин М.Ю., Мустафин Ф.М., Одишария Г.Э., Селиверстов В.Г., Харионовский В.В., Хоменко В.И., Ширин П.К., Ширяпов Д.И. и др.

Во второй главе выполнен анализ свойств металла, параметров и характеристик труб участка газопровода, разрушенного в процессе пневматических испытаний на прочность и герметичность. Были отобраны фрагменты металла труб, исследованы изломы в очагах разрушения газопровода, определен химический состав металла труб, выполнено определение твердости металла труб и исходя из этого оценка механических свойств. Установлено, что очаги разрушения 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. В ря-

де случаев исследование показало наличие незначительных технологических дефектов в сварном шве (поры, раковины, непровары). При этом в очагах разрушения зафиксированы волокнистые вязкие изломы, сопровождающиеся значительной деформацией и изменением формы и размеров поперечного сечения стенки трубы, наиболее заметных вблизи излома. Также, встречаются и хрупкие изломы, образовавшиеся в результате разрушения при отсутствии заметной пластической деформации. На трубах с номинальной толщиной стенки по сертификату 16,5 мм излом определен как волокнистый шиферный с утяжкой металла вдоль кромки разрыва до 8 мм. Излом на трубах с толщиной стенки 17,5 – 20,0 мм вязкий с утяжкой на 1 – 2 мм.

Химический состав образцов металла из труб определяли методом оптико-эмиссионной спектроскопии на приборе ARC MET 930. Анализ полученных данных показал, что имеются некоторые отклонения по химическому составу стали. Определено локальное повышение содержания 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 локально, напротив, ниже нормы, что тоже отрицательно сказывается на свойствах металла.

Определение твердости проводили 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. Констатировано наличие локальных участков труб в очагах разрушения, которые характеризуются ухудшением пластических свойств металла. В частности, на одном из образцов значения твердости находятся в интервале 207 – 229 НВ, вдоль кромки разрыва 218 – 256 НВ, что указывает на деформационное упрочнение металла на наружной поверхности трубы вблизи линии разрушения (рисунок 1). При этом предел прочности металла труб завышен до 35 %, а относительное удлинение после разрыва снижено до 29 %.

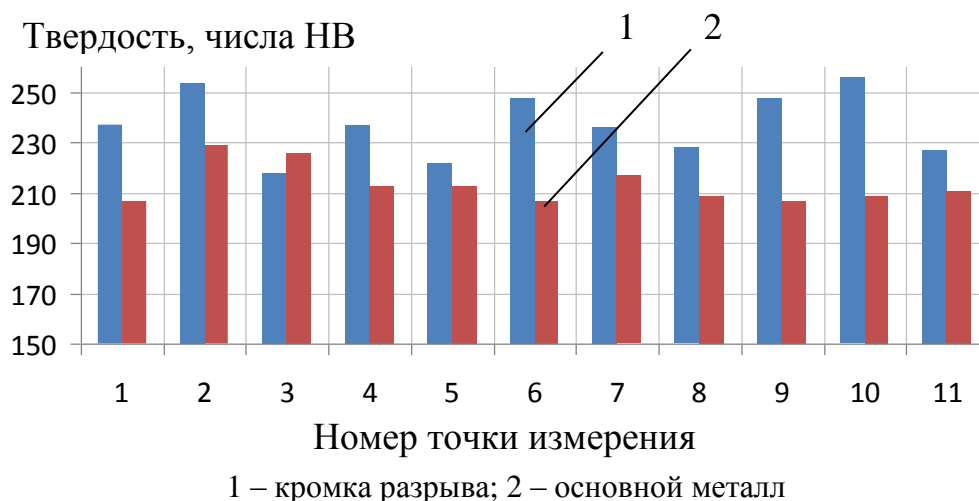


Рисунок 1. Сравнение твердости металла труб вблизи кромки разрыва и на удалении от нее

В итоге установлено, что причиной разрушения газопровода при пневматических испытаниях послужил неконтролируемый рост внутреннего испытательного давления до критических величин, при этом свойства металла труб на локальных участках оказались недостаточными для противостояния данной

нагрузке. Таким образом, стала очевидной необходимость дополнительного контроля и выявления изменения параметров металла труб и сварных соединений газопровода при воздействии внутреннего давления при испытаниях в целях оперативного выявления участков газопровода, претерпевших недопустимые упруго-пластические или пластические деформации.

В третьей главе выполнены экспериментальные исследования по изучению взаимосвязи механических напряжений в трубах из сталей К60, К65 и их коэрцитивной силой. Магистральные газопроводы на стадии эксплуатации находятся в условиях объемного напряженного состояния, составляющими компонентами которого являются кольцевые ($\sigma_{кц}$), продольные ($\sigma_{пр}$) и радиальные (σ_r) напряжения.

Степень опасности такого напряженного состояния оценивается по величине эквивалентных напряжений ($\sigma_{экр}$), определяемых по одной из существующих теорий прочности. В инженерных расчетах магистральных газопроводов (МГ) радиальные напряжения σ_r не учитываются, то есть рассматривается не объемное, а плоское напряженное состояние в каждой точке трубопровода. Кольцевые напряжения зависят только от внутреннего давления и геометрических параметров трубы. Продольные напряжения определяются внутренним давлением, температурным перепадом и упругим изгибом оси. Модуль упругости E и коэффициент поперечной деформации μ материала труб при расчете продольных напряжений определяют в зависимости от значений эквивалентных напряжений и деформаций в конкретной элементарной площадке сечения трубопровода с учетом диаграммы деформирования материала труб в координатах «напряжение – деформация» ($\sigma - \varepsilon$). Диаграмма $\sigma - \varepsilon$ может быть представлена в виде трех участков: участок упругой работы, упругопластической работы и упрочнения. При этом на участках упругой работы и упрочнения диаграмма описывается линейными функциями, а на участке упругопластической работы – нелинейной зависимостью.

Линейные участки диаграммы $\sigma - \varepsilon$ представлены следующими выражениями:

– на участке упругой работы, т. е. при $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_n$

$$\sigma = E_0 \varepsilon; \quad (1)$$

– на участке упрочнения, т. е. при $\varepsilon_{0,2} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_\sigma$

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

где E_0 – модуль упругости материала, 206000 МПа; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести материала, МПа; $\varepsilon_n = 0,7\sigma_{0,2}/E_0$; $\varepsilon_{0,2} = 0,002 + \sigma_{0,2}/E_0$; $\varepsilon_\sigma = 0,2\delta_5$; $E_1 = (\sigma_\sigma - \sigma_{0,2})/(\varepsilon_\sigma - \varepsilon_{0,2})$; σ_σ – временное сопротивление (предел прочности) материала, МПа.

Нелинейный участок диаграммы $\sigma - \varepsilon$, т. е. при $\varepsilon_n < \varepsilon < \varepsilon_{0,2}$, представлен следующей зависимостью

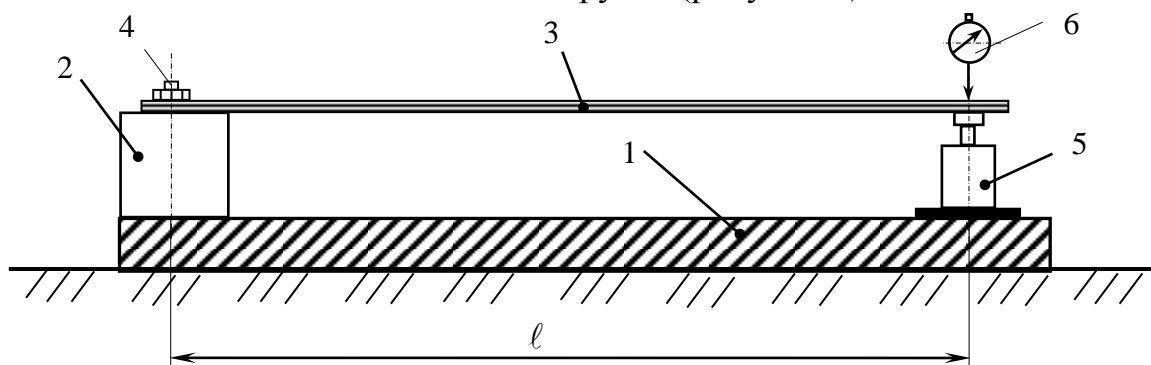
$$\sigma = 0,7\sigma_{0,2} + E_0 (\varepsilon - \varepsilon_n) + a_2 (\varepsilon - \varepsilon_n)^{a_3}, \quad (3)$$

где $a_2 = -(E_0 (\varepsilon_{0,2} - \varepsilon_n) - 0,3\sigma_{0,2} (\varepsilon_{0,2} - \varepsilon_n)^{a_3})$; $a_3 = (1 - E_1/E_0)/(1 - 0,3\sigma_{0,2}/(E_0 (\varepsilon_{0,2} - \varepsilon_n)))$.

При сооружении линейной части магистрального газопровода Бованенково – Ухта использованы трубы с 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 используются 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. Результаты расчетов 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) показывают, что при испытании МГ Бованенково – Ухта металл труб с толщиной стенки 27,7 мм при отсутствии 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.

Исследование взаимосвязи механических напряжений в трубах из сталей К60, К65 и их коэрцитивной силой проведено путем ступенчатого (пошагового) деформирования образцов изгибающей нагрузкой и измерении величины коэрцитивной силы материала при возникающем уровне механических напряжений. Испытания выполнены на плоских образцах (300 × 80 × 10 мм), фрезерованных из фрагментов труб, которые были использованы при сооружении МГ Бованенково – Ухта. Образцы закрепляли в устройство для создания напряженного состояния под действием изгибающей нагрузки (рисунок 2).



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

Рисунок 2. Схема устройства для деформирования
образца изгибающей нагрузкой

Изгибающую нагрузку создавали при помощи винтового домкрата, деформирование свободного конца образца от приложенной нагрузки измерялось индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм и диапазоном измерений 50 мм. На каждом шаге нагружения образца, не снимая приложенной статической нагрузки, в трех контрольных точках в сжатой зоне произведено измерение коэрцитивной силы двукратно с разворотом датчика на 180° вдоль ($H_{c(1)}''$, $H_{c(2)}''$) и

двукратно поперек ($H_{c(1)}^\perp, H_{c(2)}^\perp$) образца с помощью прибора КРМ-Ц-К2М. По результатам измерений выполнен расчет анизотропии коэрцитивной силы (АКС).

$$\Delta H_c = (H_{c(1)}^\perp + H_{c(2)}^\perp) / 2 - (H_{c(1)}^{\parallel} + H_{c(2)}^{\parallel}) / 2. \quad (4)$$

Установлено, что исходные значения коэрцитивной силы, измеренные на исходных трубных фрагментах для изготовления образцов, составляли 3,38 – 3,58 и 5,15 – 5,22 А/см соответственно, для фрагментов № 1 и 2, АКС близка к нулю (таблица 1, рисунок 3). После фрезерования фрагментов до толщины 10 мм (образцы № 1 и 2) коэрцитивная сила возросла до 6,33 – 7,84 и 8,41 – 9,72 А/см, соответственно, АКС – до 1,44 и 1,27 А/см, а после фрезерования до толщины 5 мм (образцы № 3 и 4) коэрцитивная сила возросла до 7,07 – 11,16 и 8,92 – 12,38 А/см, соответственно, АКС – до 4,05 и 3,40 А/см.

При нагружении образцов изгибающей нагрузкой, вызывающей изгибные напряжения до 75 % от предела текучести материала, значения коэрцитивной силы, установившиеся после фрезерования, практически не изменялись. Возрастание коэрцитивной силы после фрезерования может быть объяснено появлением внутренних сжимающих напряжений в образце, прилегающего к наружной поверхности трубного фрагмента при последовательном уменьшении его толщины. Другой причиной может быть развитие пластических деформаций на поверхности образцов после механической обработки, при которой произошли структурные изменения, предопределяющие существенный рост коэрцитивной силы и АКС. В результате этого АКС достигла максимально возможных значений, не изменяющихся затем при нагружении образцов, т. е. изменения вследствие деформирования образцов оказались малозначительны по сравнению с произошедшими структурными изменениями при изготовлении образцов.

Таблица 1

Изменение коэрцитивной силы при изготовлении и термообработке образцов

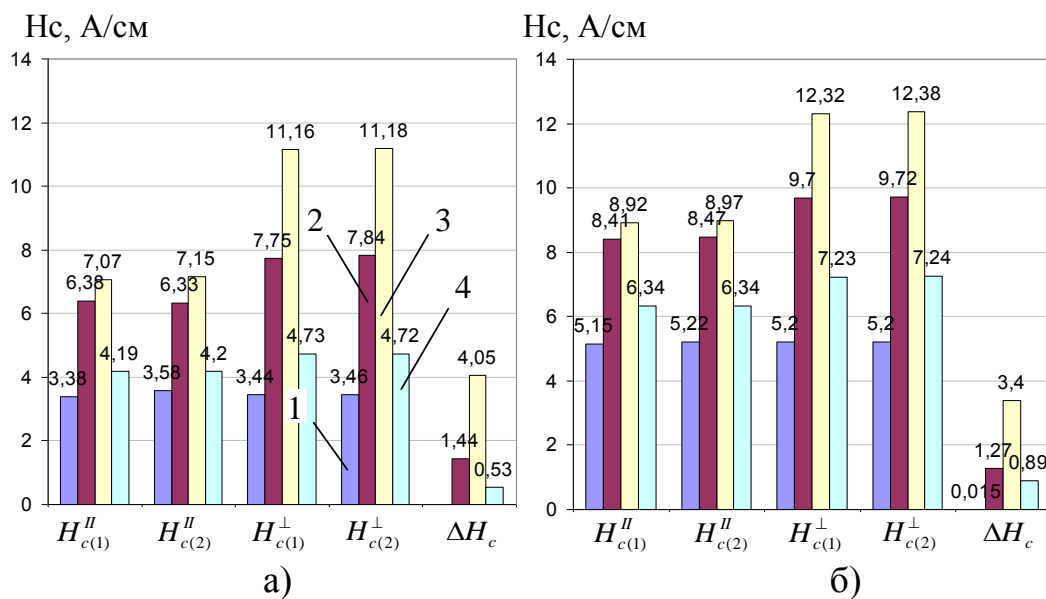
Номер образца	$H_{c(1)}^{\parallel}$	$H_{c(2)}^{\parallel}$	$H_{c(1)}^\perp$	$H_{c(2)}^\perp$	ΔH_c
Исходный фрагмент № 1	3,38	3,58	3,44	3,46	– 0,020
Исходный фрагмент № 2	5,15	5,22	5,20	5,20	0,015
№ 1 (фрез.)	6,38	6,33	7,75	7,84	1,440
№ 1 (шлиф.)	6,15	6,13	7,53	7,62	1,440
№ 2 (фрез.)	8,41	8,47	9,70	9,72	1,270
№ 2 (шлиф.)	8,22	8,22	9,46	9,48	1,250
№ 3 (фрез.)	7,07	7,15	11,16	11,18	4,050
№ 3 (шлиф.)	7,02	7,11	11,10	11,15	4,060
№ 4 (фрез.)	8,92	8,97	12,32	12,38	3,400
№ 4 (шлиф.)	8,84	8,85	12,32	12,33	3,480
№ 3Т	4,19	4,20	4,73	4,72	0,530
№ 4Т	6,34	6,34	7,23	7,24	0,890

Для устранения остаточных напряжений образцы № 3 и 4 были подвергнуты отжигу, включавшему нагрев образца до 650°C, выдержку образца в течение одного часа и последующее его охлаждение вместе с печью в течение 24 ч (новая нумерация образцов № 3Т и 4Т).

При изготовлении и термообработке проводили оценку характеристик механических свойств образцов (таблица 2).

После термообработки образцов при их нагружении изгибающей нагрузкой происходило заметное возрастание значений коэрцитивной силы H_c^\perp и H_c^{\parallel} и ΔH_c (рисунок 4). В частности, при деформировании образца № 3Т от 0 до 0,37 %, значение H_c^{\parallel} увеличилось на 1,1 А/см (25 %), а значение H_c^\perp – на 3,38 А/см (69 %).

Деформирование образца № 4Т от 0 до 0,35 % вызвало увеличение H_c^{\parallel} на 0,70 А/см (11 %), а H_c^\perp – на 2,37 А/см (34 %). После некоторого порогового значения относительной деформации образца ее увеличение не вызывало увеличения коэрцитивной силы и АКС. У образца № 3Т это происходило при значении относительной деформации 0,3 %, а у образца № 4Т пороговое значение относительной деформации не было достигнуто, вероятнее всего, в силу более высоких прочностных свойств материала. На рисунке 5 результаты испытания образцов № 3Т и 4Т представлены в координатах $\Delta H_c / \sum H_c - \sigma / \sigma_m$.



1 – исходное состояние; 2 – фрезерование до толщины 10 мм;
3 – фрезерование до толщины 5 мм; 4 – термообработка

Рисунок 3. Изменение коэрцитивной силы в процессе фрезерования и термообработки образцов: а) фрагмент № 1, б) фрагмент № 2

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

– для образца № 3Т из стали К60

$$\Delta \bar{H}_c = -0,000012\bar{\sigma}^3 + 0,00061\bar{\sigma}^2 + 0,233\bar{\sigma} + 2,64; \quad (5)$$

– для образца № 4Т из стали К65

$$\Delta \bar{H}_c = 0,000005\bar{\sigma}^3 + 0,00061\bar{\sigma}^2 + 0,133\bar{\sigma} + 5,35, \quad (6)$$

Зависимости (5) и (6) могут быть использованы для определения напряжений, составляющих до 90 % от предела текучести материала.

В четвертой главе разработана расчетно-экспериментальная методика определения механических напряжений в газопроводах и проведена ее верификация на трубном стенде. На первой стадии проводят расчет продольных напряжений на основе данных геодезического позиционирования пространственного положения газопровода. Определяют участки с напряжениями, пре-

вышающими допустимую величину, на которых проводят измерения коэрцитивной силы и рассчитывают АКС по формуле (1). Для труб из стали К60, К65 расчетно-экспериментальные значения эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ определяют по зависимостям (5) и (6).

Таблица 2

Механические свойства образцов

Номер образца	Временное сопротивление σ_b , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Относительное удлинение, δ_5 , %, не менее	Твердость по Бринеллю
Исходный фрагмент № 1	670	478	19	205
Исходный фрагмент № 2	755	561	18	226
№ 1 (фрез.)	658	465	20	202
№ 1 (шлиф.)	682	487	20	208
№ 2 (фрез.)	758	563	18	227
№ 2 (шлиф.)	706	512	19	214
№ 3 (фрез.)	667	474	20	204
№ 3 (шлиф.)	702	508	19	213
№ 4 (фрез.)	751	556	18	225
№ 4 (шлиф.)	803	607	17	238
№ 3Т (фрез.)	640	446	21	197
№ 3Т (шлиф.)	636	443	21	196
№ 4Т (фрез.)	745	550	18	224
№ 4Т (шлиф.)	769	574	18	230

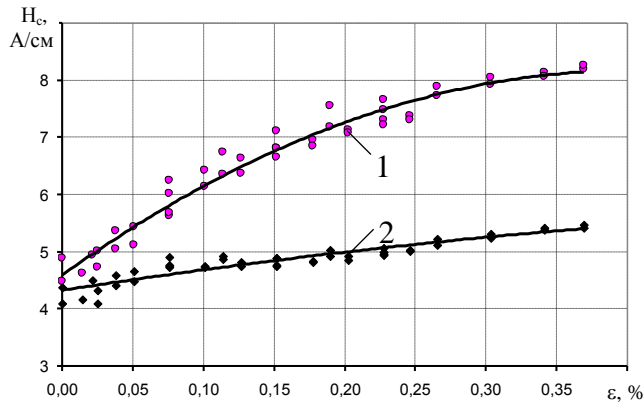
При полном снятии нагрузки может быть установлен характер действовавших напряжений в трубопроводе при его эксплуатации. Если после снятия нагрузок значения коэрцитивной силы соответствуют значениям коэрцитивной силы материала в ненагруженном состоянии, а также отсутствует анизотропия магнитных свойств 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 анизотропия магнитных свойств в продольном и поперечном направлениях, то при нагружении материал испытывал не только упругие, но и пластические деформации.

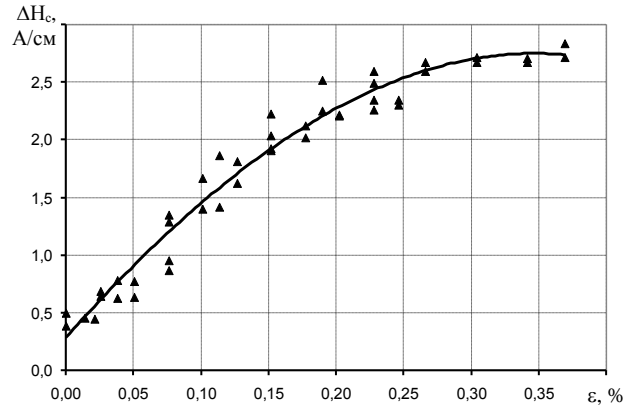
При этом более значительное отличие значений коэрцитивной силы после снятия нагрузки от значений коэрцитивной силы материала в ненагруженном состоянии, а также увеличение анизотропии магнитных свойств материала в ненагруженном состоянии указывает на более высокую степень пластического деформирования металла при действовавших нагрузках.

Верификация разработанной методики измерения напряжений выполнена на трубной секции, сваренной из 14-ти труб класса прочности К60 наружным диаметром 1420 мм. Секция была установлена на две грунтовые опоры на концевых участках, координаты опор 21,5 и 124,2 м, общая длина секции 162 м. Под собственным весом секция подверглась воздействию равномерно распределенной поперечной нагрузки вследствие изгиба.

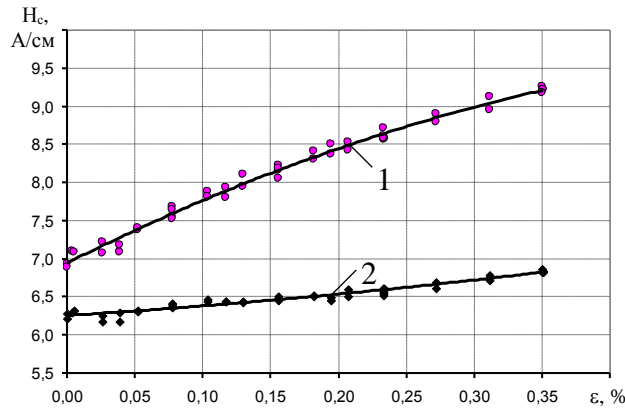
Конфигурация трубной секции определена методом геометрического нивелирования верхней образующей труб в контрольных точках (рис. 6, а).



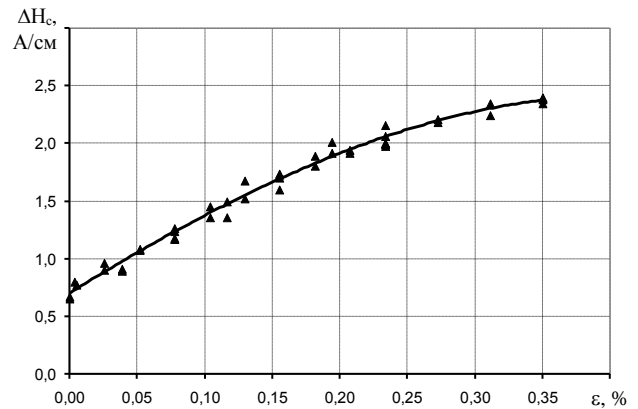
а)



б)



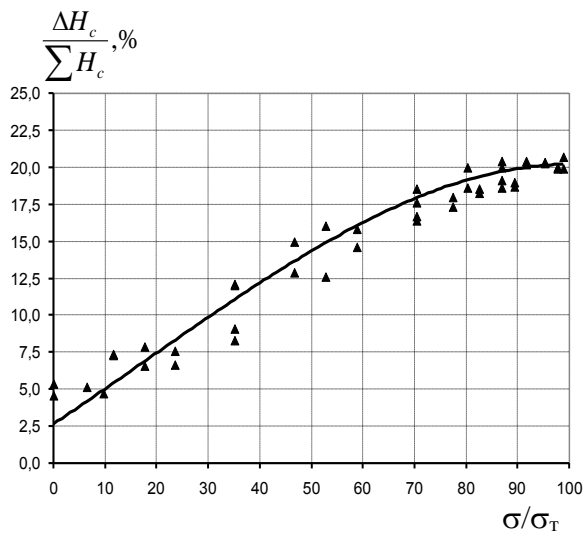
в)



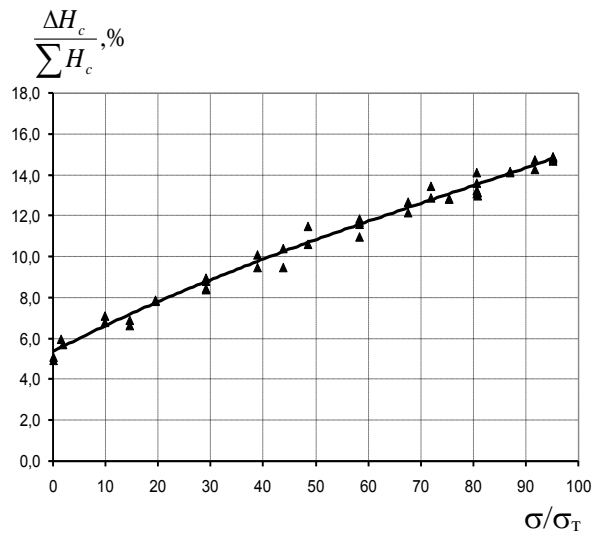
г)

1 – H_c^I ; 2 – H_c^{II}

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



а)



б)

где $\Delta \bar{H}_c = \frac{\Delta H_c}{H_c^I + H_c^{II}} 100\%$; $\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_m} 100\%$

Рисунок 5. Изменение относительной АКС ΔH_c при деформировании образцов № 3Т (а) и 4Т (б),

Изгибные напряжения определялись 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. Установлено, что верхняя образующая плети на отрезке с 27,4 по 106,7 м подвержена сжимающим напряжениям, а концевых участки – растягивающим (рис. 6, б).

Максимальное значение сжимающих изгибных напряжений, равное 272,7 МПа, наблюдается в поперечном сечении трубной плети с координатой 66 м. Для оценки относительного уровня напряжений определялись характеристики механических свойств (предел прочности, условный предел текучести, относительное удлинение) с помощью прибора ПИМ-ДВ-1.

Установлено, что параметры НДС трубной секции после установки на грунтовые опоры изменяются по длине существенно, а именно:

– верх середины трубной секции с 27,4 по 106,7 м испытывает сжимающие деформации, напряжения изменяются от 11,6 до 272,7 МПа, а по отношению к пределу текучести труб от 2,3 до 56,0 %;

– верхние концевые участки секции испытывали растягивающие деформации, напряжения изменялись от 4,4 до 174,0 МПа, а по отношению к пределу текучести труб от 0,9 до 35,5 %.

В местах, подверженных растягивающим деформациям, коэрцитивная сила вдоль образующей трубы превышает значения, измеренные поперек, а в местах сжимающих деформаций наблюдается обратная закономерность.

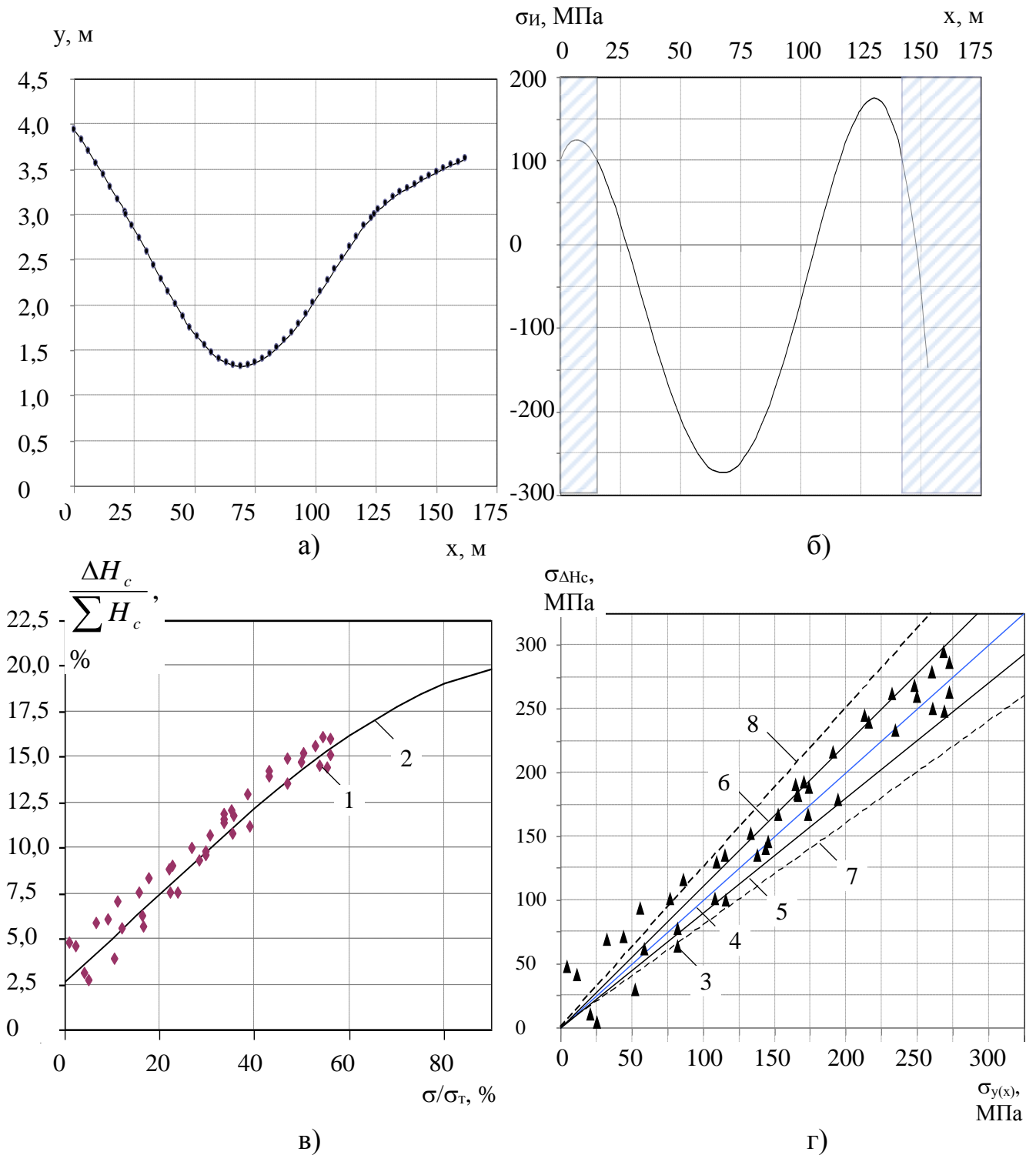
Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало, что их расхождение разнонаправлено (рисунок 6, в, г). Наибольшая погрешность определения напряжений соответствует невысоком уровню НДС труб, не превышающему 20 % от предела текучести материала труб. При напряжениях более 20 % от предела текучести материала труб максимальная погрешность определения напряжений составила 18,1%, средняя погрешность 8,6 %. При превышении напряжениями уровня 50 % от предела текучести материала труб погрешность экспериментального определения напряжений составила не более 10 %.

В пятой главе приведено описание выполненного экспериментального апробирования методов оценки физико-механических свойств металла труб в процессе пневматических испытаний на прочность газопровода Бованенково – Ухта.

Для проведения диагностирования газопровода в шурфах был выбран участок линейной части системы МГ Бованенково – Ухта, выполненный из труб диаметром 1420 мм, с толщиной стенки 26,4 и 27,7 мм, расположенный на расстоянии 28,3 км на север от компрессорной станции Воркутинская.

Для контроля основного металла, а также характеристик физико-механических свойств металла труб и сварных соединений газопровода, применяли следующие методы диагностирования:

- визуальный и измерительный контроль;
- магнитопорошковый контроль;
- ультразвуковая толщинометрия;
- ультразвуковой контроль сплошности металла труб;
- ультразвуковой контроль кольцевых сварных соединений;
- радиографический контроль кольцевых сварных соединений;



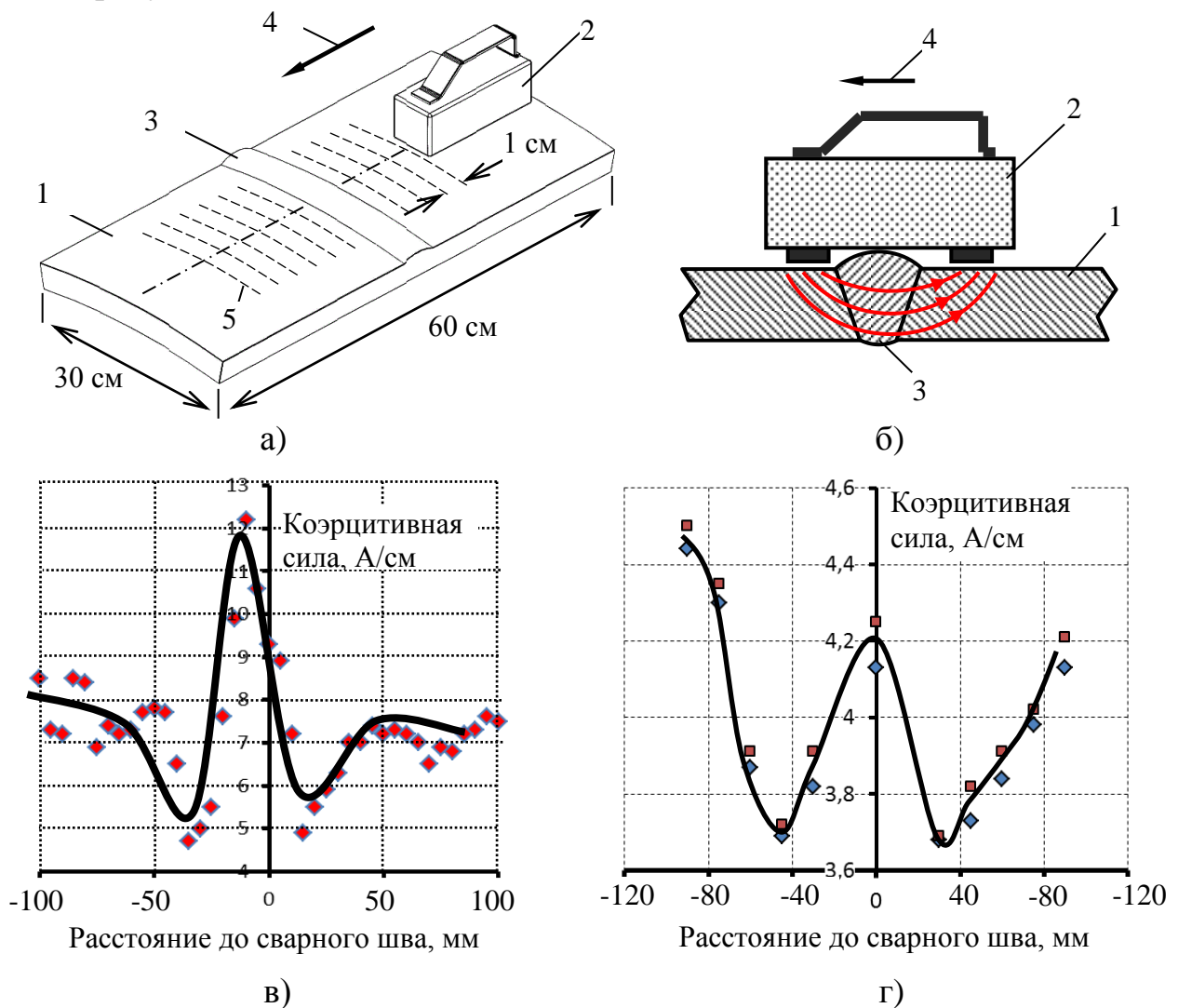
- 1 – экспериментальные данные; 2 – расчетные значения, $\sigma_{\Delta H_c}$ – напряжения, рассчитанные по коэрцитивной силе; $\sigma_{y(x)}$ – напряжения, рассчитанные по конфигурации оси сечения;
 3 – напряжения $\sigma_{\Delta H_c}$ в контрольных точках; 4 – линия равенства напряжений $\sigma_{\Delta H_c}$ и $\sigma_{y(x)}$;
 5 – линия выполнения условия $\sigma_{\Delta H_c} = 0,9\sigma_{y(x)}$; 6 – линия выполнения условия $\sigma_{\Delta H_c} = 1,1\sigma_{y(x)}$;
 7 – линия выполнения условия $\sigma_{\Delta H_c} = 0,8\sigma_{y(x)}$; 8 – линия выполнения условия $\sigma_{\Delta H_c} = 1,2\sigma_{y(x)}$

Рисунок 6. Конфигурация трубной секции в вертикальной плоскости (а), изгибные напряжения по верху трубы (б), зависимость относительной АКС от относительного уровня изгибных напряжений (в) и сопоставление напряжений, определенных экспериментально и путем расчета (г)

- определение твердости основного металла трубопровода, включая определение характеристик механических свойств металла труб по твердости на основе регистрации диаграммы вдавливания шара (по методу Бринелля);
- определение структурного состояния основного металла труб магнитным методом измерения коэрцитивной силы.

Расчетными методами были определены параметры НДС участка проведения исследований, которые показали, что как при пневматических испытаниях, так и в процессе эксплуатации материал всех смонтированных труб испытывает только упругие деформации (максимальные кольцевые напряжения не превышают 350 МПа, продольные – 175 МПа). Появление упругопластических деформаций возможно на трубах с номинальной толщиной стенки 26,4 мм при испытании газопровода давлением, превышающим рабочее давление на 25 %.

Для предварительной 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 (рисунок 7).



1 – образец; 2 – измерительный датчик коэрцитиметра; 3 – сварной шов; 4 – направление перемещения датчика; 5 – линии координатной сетки на поверхности образца

Рисунок 7. Схемы контроля (а, б) и распределение коэрцитивной силы на образце с кольцевым (в) и продольным сварным швом (г)

По результатам магнитного контроля лабораторных образцов установлено:

- уровень коэрцитивной силы, измеренный в процессе последовательного перемещения датчика вдоль образца, имеет три выраженных экстремума;
- в зоне термического влияния, вследствие разупрочнения металла, величина коэрцитивной силы снижается на 16 – 37 % от величины, характерной для металла трубы, не подверженного температурному воздействию;
- для образца, содержащего фрагменты новых труб, в зоне сварного шва величина коэрцитивной силы увеличивается в 1,5 раза от величины, характерной для основного металла образца;
- на образце, содержащем продольный сварной шов, уровень коэрцитивной силы соответствует величинам, характерным для основного металла трубы.

По результатам радиографического и ультразвукового метода контроля в металле кольцевых сварных швов было установлено наличие не критических нарушений в виде одиночных или групповых неметаллических включений с максимальными размерами 2,0 × 2,0 × 2,0 мм.

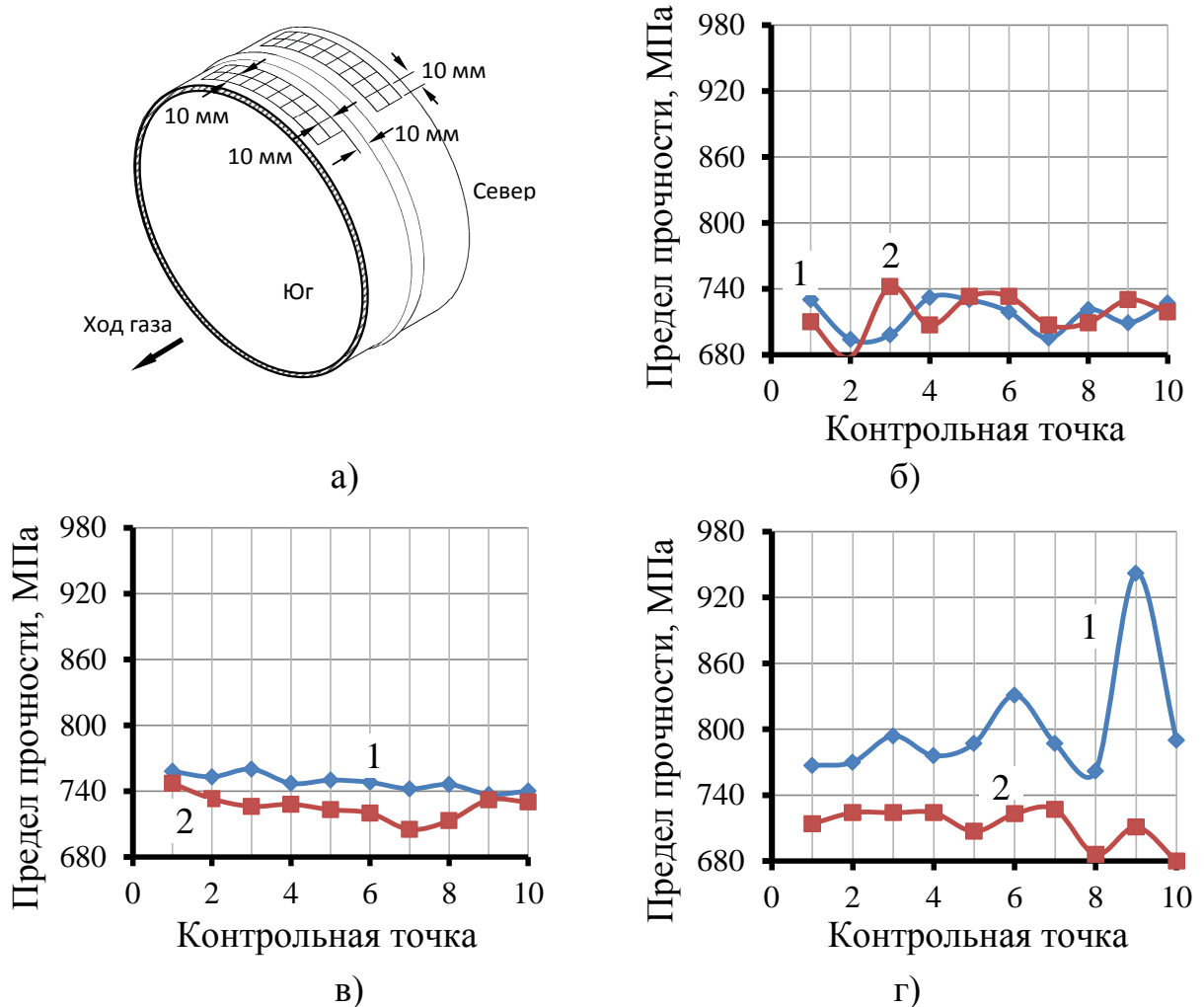
Измерение механических характеристик металла труб проводилось с помощью прибора ПИМ-ДВ-1. В автоматическом режиме на основании результатов измерения поверхностной твердости произведен расчет временного сопротивления трубной стали (рисунок 8).

По результатам измерения механических характеристик металла установлено следующее:

- среднее значение твердости металла труб (НВ) в зоне, удаленной 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. 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 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;
- 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 %);
- вторая контрольная зона, удаленная от границ кольцевого сварного шва на 20 мм, предположительно находится в переходной области, 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);
- третья контрольная зона, удаленная от границ кольцевого сварного шва на 30 мм, находится в области отпуска металла и характеризуется несколько сниженными по сравнению с основным металлом 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 %).

Измерение коэрцитивной силы выполнялось с помощью коэрцитиметра КРМ-Ц-К2М. Измерения выполнялись в контрольных областях, расположенных на верхней (12 ч), нижней (6 ч) и боковых (3; 9 ч) образующих трубы (рисунок 9).

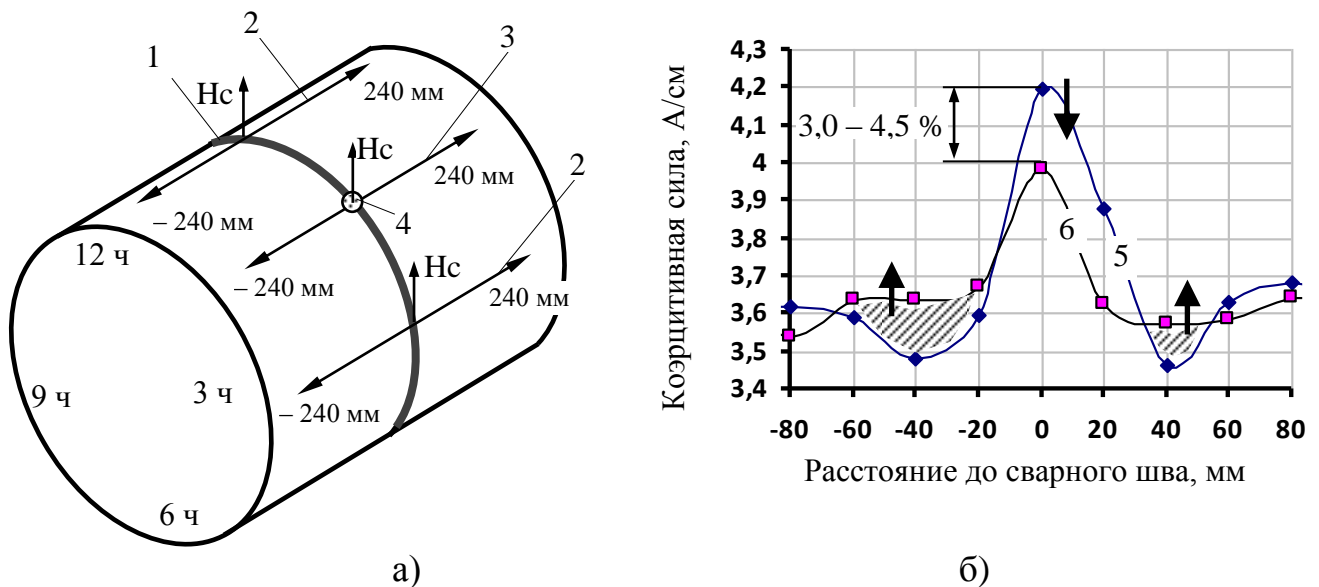


1 – перед пневматическими испытаниями; 2 – после испытаний

Рисунок 8. Схема контроля (а) и результаты определения временного сопротивления металла на удалении 30 (б), 20 (в) и 10 мм (г) от сварного шва газопровода

По результатам измерения коэрцитивной силы с последовательным перемещением датчика коэрцитиметра вдоль оси трубы установлено следующее:

- на всех объектах контроля (в четырех контрольных сечениях) при последовательном перемещении датчика наблюдается характерное (зафиксированное при лабораторных испытаниях) изменение уровня коэрцитивной силы;
- 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) б)
 1 – кольцевой сварной шов; 2 – линия сканирования бездефектной области сварного шва;
 3 – линия сканирования сварного шва, содержащего некритический дефект;
 4 – местоположение дефекта сварного шва; 5, 6 – результаты измерения
 коэрцитивной силы перед и после пневматических испытаний

Рисунок 9. Схема контроля (а) и коэрцитивная сила (б) в бездефектной области кольцевого сварного шва газопровода

По результатам проведения измерений коэрцитивной силы после пневматических испытаний участка газопровода установлено следующее:

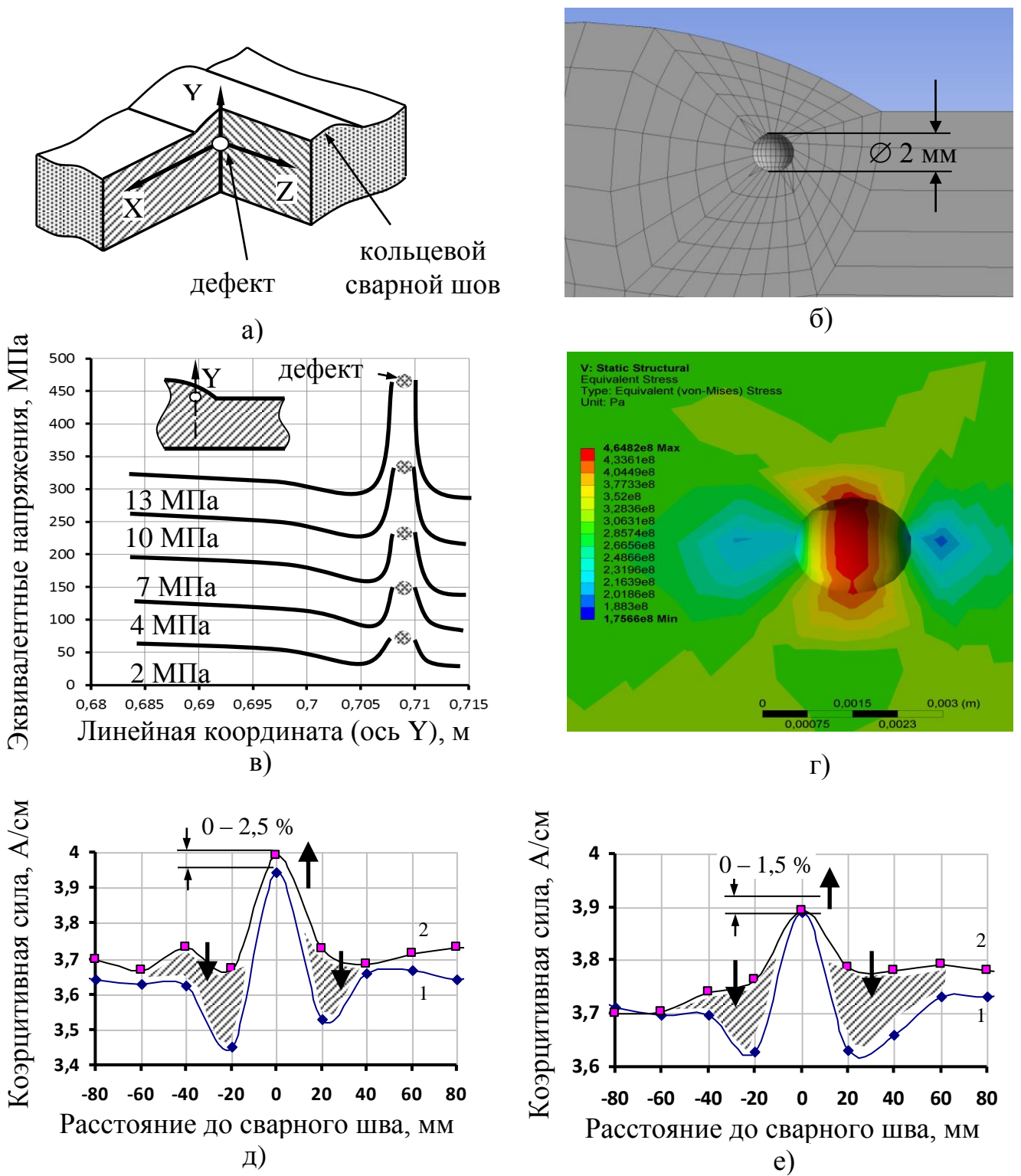
- коэрцитивная сила, измеренная над кольцевым сварным швом, ниже уровня, зафиксированного перед пневматическими испытаниями, на 3,0 – 4,5 %;
- в зонах с низким уровнем коэрцитивной силы (характерные минимумы на удалении 0,03 – 0,04 м от границ кольцевого сварного шва) после пневматических испытаний наблюдается рост указанного параметра;
- 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.

Установлен характер изменения коэрцитивной силы при обследовании металла в дефектных областях кольцевого сварного шва (рисунок 10):

- при наличии единичного некритического дефекта коэрцитивная сила после пневматических испытаний увеличивается до 2,5 % от первоначального значения (рисунок 10, д);
- при наличии группы некритических дефектов увеличение коэрцитивной силы составляет до 1,5 % от первоначального значения (рисунок 10, е).

Также установлены следующие особенности изменения площадей фигур, ограниченных кривыми, характеризующими изменение коэрцитивной силы околошовной зоны труб, построенными по данным, полученным до и после пневматических испытаний:

- при наличии единичного некритического дефекта размерами 2×2×2 мм, площадь увеличивается в 3,5 – 4,0 раза (по сравнению с бездефектным состоянием);
- при наличии группы некритических дефектов с размерами 1×1×1 мм, площадь увеличивается в 4,5– 5,0 раз (по сравнению с бездефектным состоянием).



1 – перед пневматическими испытаниями; 2 – после испытаний

Рисунок 10. Схема расположения дефекта (а), геометрическая сетка конечноэлементной модели (б), результаты моделирования (в, г), коэрцитивная сила до и после пневматических испытаний при контроле металла кольцевого сварного шва с единичным некритическим дефектом (д) и группой некритических дефектов (е)

Основные выводы:

1. Разработаны и экспериментально реализованы методы оценки изменения физико-механических 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.

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.

2. 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.

3. 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.

4. Разработаны рекомендации по проведению пневматических испытаний на прочность при условии 1,25-кратного превышения рабочего давления для участков категории Н, 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».

**Основные положения диссертации опубликованы
в следующих работах:**

– в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. 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.
2. 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.
3. Елфимов А.В., Сальников А.В., Быков И.Ю., Бирилло И.Н., Кузьбожев П.А. Исследование магнитных характеристик высокопрочной трубной стали при изгибе // Инженер-нефтяник. – 2015. – № 3. – С. 55 – 59.
4. 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.
5. 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.

– в остальных изданиях

6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.

10. Елфимов А.В., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н. Исследование изменения физико-механических 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

Подписано к печати «____» октября 2020 г.

Заказ №____

Тираж 100 экз.

1 уч. – изд.л, ф-т 60×84/16

Отпечатано в ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
По адресу: 142717, Московская область,
Ленинский район, пос. Развилка,
Проектируемый проезд № 5537, владение 15, строение 1.