

На правах рукописи



Шафиков Рустам Рашитович

**РЕМОНТ ГАЗОПРОВОДОВ МЕТОДОМ НАПЛАВКИ БЕЗ ОСТАНОВКИ
ТРАНСПОРТИРОВКИ ГАЗА**

Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз
и хранилищ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2015

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе «Оргэнергогаз»

Научный руководитель - Решетников Александр Данович,
доктор технических наук.

Официальные оппоненты: Митрохин Михаил Юрьевич,
доктор технических наук, заместитель начальника
Управления Департамента капитального ремонта
ОАО «Газпром»;

Зорин Николай Евгеньевич,
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник лаборатории исследования процессов
коррозионного растрескивания под напряжением
ООО «Газпром ВНИИГАЗ».

Ведущая организация: Государственное унитарное предприятие
«Институт проблем транспорта энергоресурсов»
Республики Башкортостан, г. Уфа.

Защита диссертации состоится «_____» апреля 2015 г. в 13 ³⁰ часов
на заседании диссертационного совета Д 511.001.02, созданного на базе
ООО «Газпром ВНИИГАЗ».

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
ООО «Газпром ВНИИГАЗ» по адресу: 142717, Московская область, Ленинский
район, поселок Развилка. <http://www.vniigaz.ru>

Автореферат диссертации разослан «_____» февраля 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



Ирина Николаевна Курганова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Система магистральных газопроводов является одной из важнейших составных частей экономики страны, обеспечивающей практически все отрасли промышленности сырьем, топливом, энергией. Общая протяженность магистральных газопроводов в настоящее время составляет около 176 тыс. км. При этом следует отметить, что протяженность одноконтурных газопроводов и газопроводов-отводов ориентировочно составляет 24% от протяженности всей газотранспортной системы ОАО «Газпром», что составляет 42 тыс. км. Осуществить ремонт таких газопроводов традиционными методами (переизоляция с частичной заменой труб, полная замена дефектных труб) не представляется возможным в связи с отсутствием возможности отключения газопроводов по режимам транспортировки и подачи газа потребителям. Кроме того, в настоящее время значительная часть газопроводов (порядка 30%) имеет средний срок эксплуатации 35 лет и вступает в период интенсификации потока отказов. В связи с этим только современная и эффективная технология и средства технического обслуживания позволят обеспечить надежную и безопасную эксплуатацию газопроводов.

Учитывая изложенное, задача разработки новых методов ремонта, создания новых более эффективных технологий и технических средств для текущего и аварийного ремонта газопроводов без остановки транспорта газа является весьма актуальной.

Цель работы: разработка технологии эффективного и безопасного ремонта поверхностных дефектов на газопроводах без остановки транспортировки газа методом ручной дуговой сварочной наплавки металла.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

- экспериментальное исследование режимов ремонтной сварочной наплавки, исключая термический прожог стенки трубы и предотвращающих образование закалочных структур с повышенной твердостью, склонных к водородному растрескиванию.

- исследование термических циклов и тепловых полей в стенке трубы при ремонтной наплавке с применением метода численного моделирования для гарантии безопасности использования технологии ремонтной наплавки.

- исследование режимов и разработка технологии многопроходного ремонта сварочной наплавкой поверхностных дефектов труб по методу «отпущенного валика», как наиболее эффективного и безопасного вида ремонта.

Научная новизна полученных результатов заключается в комплексном подходе к решению проблемы ремонта поверхностных дефектов на действующем газопроводе с применением сварочной наплавки, начиная с экспериментальных исследований различных параметров наплавки и заканчивая определением технико-экономических показателей ремонта газопровода.

Выполненные исследования технологических режимов процесса ремонта газопровода позволили научно обосновать организационно-технологическую схему производства ремонтно-восстановительных работ.

Обоснована эффективная и безопасная технология ремонта поверхностных дефектов действующего газопровода с учетом критериев термического, металлографического и термомеханического анализа.

Впервые разработана методика использования модели термической «коррозионной язвы» с применением МКЭ.

Защищаемые положения.

1. Научное обоснование технологии эффективного ремонта поверхностных дефектов на действующем газопроводе методом сварочной наплавки, разработанной на основе экспериментального исследования режимов данной наплавки, исключающих термический прожог стенки трубы и предотвращающих образование закалочных структур с повышенной твердостью, склонных к водородному растрескиванию;

2. Экспериментально-теоретическое обоснование методики определения технологически допустимых предельных величин тепловложения по данным термического и металлографического анализа зон ремонтной наплавки;

3. Обоснование оценки допустимого давления газа в зоне ремонтной наплавки с привлечением модели термической «коррозионной язвы»;

4. Экспериментально-теоретическое обоснование технологий многопроходного ремонта сварочной наплавки по методу «отпущенного валика», как наиболее эффективного и безопасного вида ремонта глубоких поверхностных дефектов труб.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

Научно обоснована и предложена наиболее экономичная технология ремонта поверхностных дефектов на действующем газопроводе методом сварочной наплавки. Эта технология гарантирует выполнение быстрого и наиболее эффективного вида ремонта поверхностных повреждений газопровода без риска теплового прожога стенки трубы и постсварочного растрескивания шва наплавки. Результаты работы были внедрены в ООО «Газпром трансгаз Уфа» для подготовки сварщиков, выполняющих работы по ремонту газопроводов.

Достоверность результатов обеспечивается статистическим анализом полученных данных, научным обоснованием используемых зависимостей,

принятых допущений и ограничений, представлением результатов моделирования по МКЭ и сравнением их с экспериментальными.

Апробация результатов работы.

Основные результаты и научные положения работы докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции «Проблемы и методы обеспечения надёжности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа» (г. Уфа, 2010 г.); VI Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт» (г. Уфа, 2010 г.); Десятой международной научно-практической конференции «Энергоэффективность. Проблемы и решения» (г. Уфа, 2010 г.); Седьмой международной конференции «Обслуживания и ремонт газонефтепроводов» (г. Сочи, 2014 г.)

Публикации.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 14 научных трудах, в том числе 13 – в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, библиографического списка использованной литературы, включающего 86 наименований. Работа изложена на 143 страницах машинописного текста, содержит 73 рисунка, 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность рассматриваемой проблемы, сформулированы цель и основные задачи, обозначены положения, выносимые на защиту, обоснована научная новизна и практическая ценность результатов работы.

Исследования в работе проведены с опорой на теоретические и практические работы отечественных и зарубежных ученых в области ремонтной сварочной наплавки на действующих трубопроводах, – В.Л Березина, А.Г. Гумерова, Н.Н.Рыкалина, А.С. Собачкина, О.И Стеклова, W.A. Bruce, J. Goldak, D.L. Hicks, J.F Kiefner, W.S. Kim, M. Painter, J.B.Wade, и других.

В первой главе представлен анализ методов выполнения ремонтных работ на действующих газопроводах. Дан обзор традиционных способов восстановления работоспособности стенки трубы действующих газопроводов при помощи ремонтных муфт, врезкой под давлением и методом наплавки.

Ремонт полимерно-композитными муфтами (Клок Спринг, КСМ ВНИИСТ, ГАРС, и т.д.) применяется в индустрии трубопроводного транспорта в течение 30 лет как средство усиления секций трубы, стенки которой ослаблены коррозией.

Однако при проведении ремонтных работ полимерно-композитными муфтами температура окружающей среды должна быть не ниже +5°C, что ограничивает их широкое применение в газовой отрасли.

Для выборочного ремонта магистральных газопроводов в настоящее время промышленностью разработаны и изготовлены стеклопластиковые муфты с резьбовой затяжкой. Положительные результаты испытаний ремонтных муфт этого типа, к сожалению, пока не позволяют гарантировать их длительной прочности в течение всего срока службы отремонтированного газопровода.

В отечественной и зарубежной практике общим и наиболее широко применяемым средством восстановления прочности участков трубопроводов с поверхностными дефектами большой площади являются сварные муфты. Применение полноохватных стальных ремонтных муфт типа А и В, а также муфт с заполнением зазора «муфта-труба» является эффективным средством выборочного ремонта магистральных газопроводов. Однако такой способ ремонта очень металлоемок, требует значительных объемов квалифицированных сварочных работ, тщательной диагностики сварных швов, использования эпоксидных и прочих наполнителей и сопровождается довольно высокими затратами.

Врезка под давлением – является одним из способов устранения дефектов на действующем трубопроводе. При помощи этого метода устраняют многие виды повреждений: вмятины, коррозию и т.д. Очевидно, что данная технология ремонта осуществима только для дефектов, расположенных в верхней части трубопровода (9÷3ч). Ремонт магистральных газопроводов врезкой под давлением является очень трудоемким методом, требующим больших материальных затрат.

Во второй главе представлен анализ исследования возможности использования ручной дуговой сварки при ремонте действующих газопроводов.

В мировой практике применяют метод дуговой сварочной наплавки металла при ремонте поверхностных коррозионных дефектов действующих трубопроводов. Этот прямой метод прост и эффективен. Однако при ремонте дуговой сварочной наплавкой возникают проблемы сквозного прожога, водородного растрескивания и восстановления как статической, так и усталостной прочности трубопровода.

Определение риска прожога при сварке на действующем газопроводе непосредственно связано с распределением тепла в зоне сварки и тепловыми характеристиками прочности трубной стали. Возникновение прожога при сварке на действующих трубопроводах связано с изменением механических свойств металла трубы, нагреваемого теплом сварочной дуги. При этом ряд отечественных и зарубежных авторов в 80-90 г.г. прошлого века пришли к заключению о незначительном влиянии внутреннего давления на допустимую

толщину стенки трубы при сварке на действующем трубопроводе. Результаты работ последних лет, выполненных с привлечением более совершенных технических средств, заставляют по-новому взглянуть на выводы и заключения более ранних работ.

Определение риска прожога при сварке на действующем газопроводе определяется не только экспериментально, но и с применением математических моделей. Например, модели термического анализа предсказывают риск прожога по температуре поверхности внутренней стенки трубы. Модели Battelle и PRCI свидетельствуют о том, что если температура внутренней стенки трубы в процессе дуговой сварки не превышает 980°C ($t_{\text{внутр.}} \leq 980^{\circ}\text{C}$), то риск сквозного прожога маловероятен.

Модели Battelle и PRCI не учитывают напряжения, которые давление газа создает в стенке трубы. В связи с этим обе модели приводят к заниженным результатам при применении.

Модель CRC/CSIRO (Австралия) основана на том, что зона под сварочной ванной, нагретая выше 700°C , теряет механическую прочность и действует подобно термической «коррозионной язве». Модель CRC/CSIRO оценивает три критерия при определении безопасных параметров сварки на действующих трубопроводах:

- критерий $t_{\text{внутр.}} \leq 980^{\circ}\text{C}$ (как и в моделях Battelle и PRCI);
- критерий модели термической «коррозионной язвы»,
- критерий эффективной остаточной толщины стенки трубы.

Модель CRC/CSIRO сопоставляет предсказанные безопасные сварочные параметры по всем трем критериям и рекомендует наиболее консервативный результат, т.е. наименьшую величину тепловложения.

Новая «модель 46345», разработанная в EWI, включает положения модели CRC/CSIRO и в два этапа выполняет термомеханический анализ. На первом этапе выполняется термический анализ. На втором – температурные профили применяются как термические нагрузки в механическом анализе. Затем вычисляется механическая реакция трубы и сварного шва под действием термической и механической нагрузок.

Термический анализ обеспечивает вычисление температурных профилей в стенке трубы как результат сварки. Вводные, требуемые для термического анализа, включают в себя: геометрию трубы, марку трубной стали, параметры сварки, размеры сварочного сгустка (включая ЗТВ), а также рабочее давление газа в трубопроводе. В механическом анализе, который проводился для трубной стали марки API 5L X-52, учитываются действия напряжений для кольцевого и продольного сварных швов. Данных по стали X70 не представлено. Взятая в

качестве вводной температурная зависимость механических свойств стали X-52 показывает, что предел текучести σ_T снижается в диапазоне 427С-760⁰С до $\sim 5\div 10\%$ от σ_T при 25⁰С.

Цель модели 46345 – снизить консерватизм, связанный с критерием $t_{\text{внутр.}} \leq 980^{\circ}\text{C}$. Применение модели показало, что давление в трубе оказывает значительное влияние на риск прожога. Установлено, что сварные швы с толщиной стенки большей чем 6,4 мм, наложенные на действующем трубопроводе, могут быть небезопасны. Этот результат находится в противоречии со сложившимся представлением, что при выполнении сварки на действующем трубопроводе со стенкой толще 6,4 мм, прожог маловероятен. Разрешение этого противоречия является одной из задач настоящей работы.

Критерий любой модели – «минимальное тепловложение – наименьший риск прожога» при сварке на действующем трубопроводе может конфликтовать с требованиями предотвращения водородного растрескивания.

Возникновение водородного растрескивания связано с тремя условиями, которые должны удовлетворяться одновременно:

- наличием водорода в сварном шве,
- развитием микроструктуры сварного шва, чувствительной к растрескиванию,
- действием растягивающего напряжения в сварном шве.

Чтобы предотвратить водородное растрескивание, необходимо устранить или ослабить действие хотя бы одного из этих условий. Остаточные напряжения растяжения, действующие в сварном шве, не могут быть устранены и должны всегда учитываться. Поэтому первым шагом, предпринимаемым для предотвращения водородного растрескивания швов, является минимизация уровней водорода в швах путем применения электродов с низким содержанием водорода и сварочных процессов с минимальным количеством водорода.

Скорость охлаждения сварного шва до 100⁰С является параметром, который используется для оценки риска водородного растрескивания. Этот параметр учитывает не только время охлаждения, в течение которого аустенит разлагается на продукты (феррит, бейнит и т.п.), но также время, за которое водород может диффундировать к поверхности шва. Отметим, что более высокое тепловложение приводит к более низким уровням водорода в шве, поскольку скорость охлаждения шва может быть меньше. Однако большое тепловложение (кроме риска прожога) ведет к росту зерен аустенита в ЗТВ, что повышает твердость. В связи с этим необходимо минимизировать диапазон тепловложения.

Разработаны процедуры, которые минимизируют образование микроструктур, чувствительных к растрескиванию. В трассовых условиях обеспечение низких уровней водорода не может быть гарантировано. В работе

смоделированы условия, подтверждающие, что прогнозируемые параметры сварки методом наплавки пригодны в трассовых условиях. При этом в качестве индикатора микроструктуры сварного шва, склонной к образованию трещин используются твердость ЗТВ.

В третьей главе представлены экспериментальные исследования температурных циклов при ремонте методом наплавки металла на действующем газопроводе. Для оптимизации технологии ремонтной наплавки на экспериментальном стенде были выполнены эксперименты, включающие:

- измерение ключевых термических циклов $t_{\text{внутр}} = f(\tau)$ на внутренней поверхности стенки трубы при наплавке для оценки предельных величин тепловложения W и предотвращения теплового прожога стенки при остаточных толщинах: 15,7; 12,7; 10,0; 8,0; 7,6 и 6,0мм;

- измерение скорости охлаждения ЗТВ и времени $\tau_{8/5}$ (времени охлаждения ЗТВ от 800°C до 500°C) для оценки вероятности образования закалочных структур ЗТВ, склонных к растрескиванию.

Эксперименты для определения допустимых режимов сварки при ремонте наплавкой действующих газопроводов проводились на образцах в виде фрагментов, вырезанных из бывшей в эксплуатации трубы $\text{Ø}1420\text{мм}$. Размеры образцов: ширина – 400мм, длина – 400мм, толщина стенки – 18,7мм, сталь марки Х70. На наружной поверхности образцов трубы выполнили фрезеровку пазов с остаточной толщиной стенки трубы в интервале: 15,7; 10; 8; 7,6 и 6мм, имитирующих зоны с уменьшенной толщиной стенки трубы вследствие действия коррозии. К обратной стороне образцов трубной стали в контрольных точках приваривались хромель-алюмелевые (ХА) термопары для регистрации термических циклов при сварке. В некоторых экспериментах ХА-термопары заделывались в отверстия, высверленные на заданную глубину. Экспериментальный образец устанавливался на стенд, в котором производился обдув образца с внутренней стороны со скоростью потока воздуха 8 м/с при температуре 25°C . В процессе наложения сварочного металла контролировались следующие параметры: напряжение, сварочный ток, скорость перемещения электрода, количество наложенного металла. Чтобы определить тепловложение, регистрировалось время каждого сварочного прохода и измерялась длина валика. По этим данным рассчитывалась средняя скорость перемещения электрода V для каждого сварочного прохода, необходимая для определения объема тепловложения. Регистрация температуры на внутренней стенке образца при сварочной наплавке металла производилась двумя 6-канальными регистраторами типа РМТ-69.

Численное моделирование процесса ремонта методом сварочной наплавки дает возможность определить температурные циклы и поля по параметрам

дуговой сварки: току I , напряжению U и скорости перемещения электрода V . Путем моделирования оценивалась пригодность ремонта методом сварочной наплавки, при этом затратный и трудоемкий экспериментальный подход «проб и ошибок» замещался более экономичным компьютерным моделированием. Разумеется, на этапе освоения результаты моделирования должны подтверждаться экспериментально.

Для моделирования ремонта методом сварочной наплавки применялся метод конечных элементов (МКЭ), сущность которого заключается в том, что тело трубы в зоне наплавки разбивают на несколько частей (элементов) конечного объема, простых по форме для того, чтобы численное интегрирование даже сложных функций по объему каждого из элементов не вызывало затруднений.

Экспериментальные исследования температурных циклов при ремонте сварочной наплавкой металла были начаты с проверки применимости типовых режимов ручной дуговой сварки при наплавке металла на поверхность фрагмента трубы с пазами разной глубины; остаточные толщины стенки трубы: 15,7мм; 12,7мм и 7,6мм; ($\delta_{\text{ном}}=18,7\text{мм}$).

Алгоритм оценки режимов ремонта сварочной наплавкой приведен на рисунке 1.

Результаты экспериментальных исследований термических циклов сварочной дуговой наплавки и рекомендованные режимы сварки, удовлетворяющие критериям, сведены в таблице 1.

Как видно из результатов таблицы 1, снижая ток I (понижая Q) и повышая скорость V (уменьшая W), создаем благоприятные условия наплавки для предотвращения теплового прожога стенки трубы.

С другой стороны, наплавка при низких величинах W может способствовать быстрому охлаждению зоны сварки и образованию в ЗТВ закалочных структур с высокой твердостью, склонных к растрескиванию. Параметр $\tau_{8/5}$ [сек] - время охлаждения ЗТВ от $t^0=800\rightarrow 500^{\circ}\text{C}$ (или скорость охлаждения $V_{8/5} = (800^{\circ}\text{C} \rightarrow 500^{\circ}\text{C})/\tau_{8/5}$, [$^{\circ}\text{C}/\text{сек}$]), характеризует образование таких структур.

Экспериментально полученные величины $\tau_{8/5}$ показали значительный разброс, обусловленный спецификой проведения таких измерений (метод «загарпунивания» ХА-термопар). Вместе с тем тенденция увеличения $\tau_{8/5}$ с повышением уровня тепловложения W очевидна.

Результаты экспериментов приводят к заключению о том, что не следует стремиться только к предельному снижению тепловложения W во избежание прожога; необходима оптимизация диапазона W для каждого значения остаточной толщины стенки.

Металлографические исследования зоны сварочной наплавки проводились на шлифах, изготовленных по стандартной методике, чтобы установить

распределение сварочного металла, зону проплавления, глубину и твердость ЗТВ для каждого испытания. Глубина проплавления сварочного металла, а также глубина ЗТВ определялась по структуре шлифов при помощи металлографических оптических измерений, фиксируя параметры разрешения и увеличения микроскопа.



Рисунок 1 - Алгоритм оценки режимов ремонта методом сварочной наплавки

Результаты, представленные на рисунке 2, показывают, что тенденция увеличения глубины ЗТВ с ростом W очевидна.

Тенденция увеличения глубины проплавления с ростом W также наблюдается, хотя и менее четко. Разброс данных связан со спецификой металлографических измерений и определяется естественной размытостью структурных границ ЗТВ. Обработка экспериментальных результатов (рисунок 2) позволила оценить допустимые величины тепловложения W_{\max} для остаточных толщин стенки трубы δ .

Таблица 1 – Экспериментальные режимы дуговой сварочной наплавки и их соответствие критериям Battelle ($t_{вн} < 980^{\circ}\text{C}$) и термомеханической модели ($t_{вн} < 700^{\circ}\text{C}$)

№ п/п	δ , мм	$\varnothing_{эл}$, мм	Ток I, А	v , мм/с ($\pm 20\%$)	$t_{внутр}$, $^{\circ}\text{C}$	Q, Вт	W, кДж/мм ($\pm 20\%$)	Критерий Battelle $t < 980^{\circ}\text{C}$ Да/Нет	Критерий т/механ. $t < 700^{\circ}\text{C}$ Да/Нет	Рекомендация режима Да/Нет	Примечание
1	15,7	3,2	130	2,0	350	2145	1,07	Да	Да	Да	
2	12,7	-«-	-«-	- «-	370	- «-	- «-	Да	Да	Да	
3	7,6	-«-	-«-	- «-	670	- «-	- «-	Да	Да	Нет	Снизить ток < 130А
4	-«-	-«-	100	1,5	580	1650	1,07÷1,1	Да	Да	Да	
5	15,7	-«-	130	1,0	360	2145	2,14	Да	Да	Да	
6	10,0	-«-	-«-	- «-	605	- «-	- «-	Да	Да	Да	В-на W погранична; нужен т/механич. анализ
7	8,0	-«-	- «-	- «-	940	-«-	- «-	Да	Нет	Нет	В-на W за пределами
8	6,0	-«-	- « -	-«-	1030	- « -	- « -	Нет	Нет	Нет	В-на W за пределами
9	15,7	-«-	100	1,0	325	1650	1,65	Да	Да	Да	
10	10,0	-«-	- «-	-«-	530	- «-	- «-	Да	Да	Да	
11	8,0	-«-	- «-	-«-	715	- «-	- «-	Да	Нет	Нет	Снизить I, увеличить v
12	6,0	2,5	- « -	-«-	940	- « -	- « -	Да	Нет	Нет	Снизить I, увеличить v
13	15,7	3,2	70	0,8	330	1155	1,44	Да	Да	Да	
14	10,0	-«-	-«-	- «-	485	- «-	- «-	Да	Да	Да	
15	8,0	-«-	- «-	-«-	565	- «-	- «-	Да	Да	Да	
16	6,0	2,5	-«-	- « -	770	- « -	- « -	Да	Нет	Нет	Увеличить v
17	6,0	-«-	- « -	1,5	650	-«-	0,77	Да	Да	Да	

Предпрожоговое состояние достигается в том случае, когда глубина ЗТВ достигает внутренней поверхности стенки трубы.

Из рисунка 2 видно, что для разных толщин линия роста глубины ЗТВ с ростом W пересечет внутреннюю поверхность стенки в точках:

для $\delta=10$ мм, $W_{max}=3,2$ кДж/мм (рисунок 2а);

для $\delta=8,0$ мм, $W_{max}=2,3$ кДж/мм (рисунок 2б);

для $\delta=6,0$ мм, $W_{max}=1,4$ кДж/мм (рисунок 2в).

Для вычисления W_{max} применено уравнение линейной регрессии, график которого проходит через начало координат: $P = kW$, где P – глубина ЗТВ, мм; k – коэффициент пропорциональности. Для $\delta=10$ мм $k=3,0$, для $\delta=8,0$ мм $k=3,4$ и для $\delta=6,0$ мм $k=4,3$.

С уменьшением толщины стенки, картина теплового потока изменяется от двух- к трехразмерной. Это видно из рисунка 2в, поскольку при $W \geq 1,1$ кДж/мм

глубина ЗТВ приближается к толщине стенки $\delta = 6,0\text{мм}$. Глубина ЗТВ возрастает быстрее из-за отражения теплового потока от внутренней поверхности стенки.

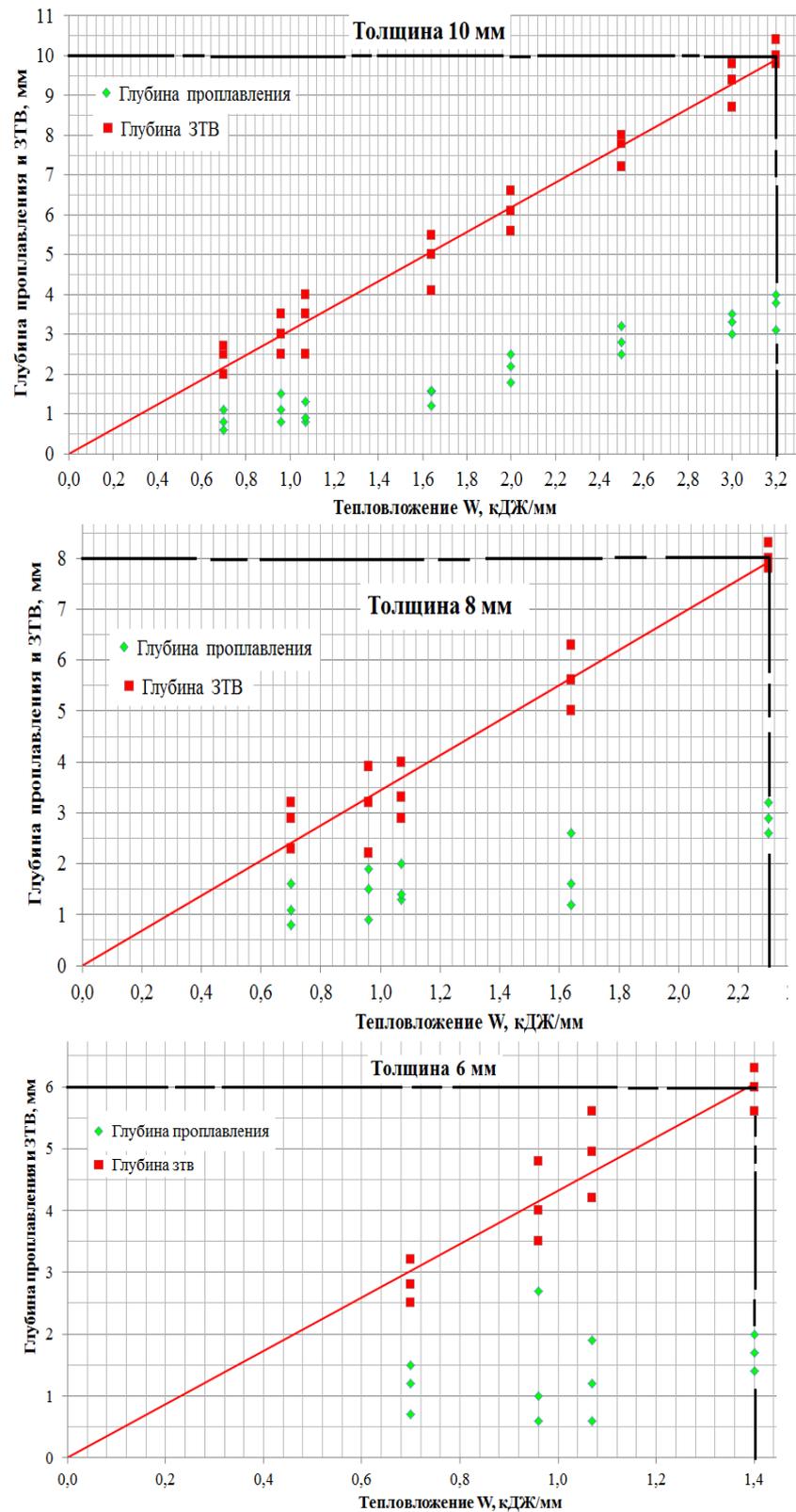


Рисунок 2 – Зависимость глубины проплавления и ЗТВ от величины тепловложения W для остаточных толщин стенки трубы: а) $\delta=10\text{мм}$; б) $\delta=8\text{мм}$; в) $\delta=6\text{мм}$

Этот вывод подтверждается данными металлографического анализа. С учетом этого для $\delta \approx 6,0$ мм целесообразно снизить предел безопасности до $W_{\max} = 0,9 \div 1,1$ кДж/мм.

Следует отметить, что при сварочной наплавке на действующем газопроводе за счет отбора тепла потоком газа глубина ЗТВ может быть только меньше, чем ЗТВ при наплавке на воздухе при таких же режимах сварки. Это обстоятельство оправдывает затраты усилий и средств на лабораторные исследования, поскольку такие эксперименты позволяют определить величину тепловложения W_{\max} , не прибегая к опасным и затратным экспериментам на действующем газопроводе.

Измерения твердости показали, что твердость ЗТВ для всех примененных в работе режимов сварочной наплавки (таблица 1) не превышает критической величины $HV < 350$. Все валики наплавки, выполненные в данной работе, не склонны к растрескиванию. Этот вывод подтверждают данные металлографического анализа: ни в одном образце шлифа не обнаружено трещин постсварочного растрескивания.

Расчеты в соответствии с моделью МКЭ выполнены для исследования температурных циклов пограничных режимов наплавки. Наплавка по режиму п. 3 таблицы 1 ($\delta = 7,6$ мм, $\varnothing_{\text{эл}} 3,2$ мм, $U = 22$ В, $I = 130$ А, $V = 2$ мм/с, $Q = 2145$ Вт, $W = 1,07$ кДж/мм, подогрев 100°C) сопровождается температурным циклом с пограничной величиной $t_{\text{вн}} \approx 700^{\circ}\text{C}$ (рисунок 3).



Рисунок 3 – Сравнение экспериментального и расчетного температурных циклов на внутренней поверхности стенки ($\delta = 7,6$ мм); наплавка по режиму п.3 таблицы 1

Из рисунка 3 видно, что вычисленная по МКЭ $t_{\text{вн}} = 724^{\circ}\text{C}$ соответствует экспериментальной $t_{\text{вн}} = 670^{\circ}\text{C}$ в пределах точности $\pm 10\%$. Это означает, что изотерма 700°C может захватывать внутреннюю поверхность стенки трубы, а ЗТВ выходить на эту поверхность с потерей механических свойств (в соответствии с критерием термомеханической прочности). Результаты расчета теплового поля по модели МКЭ при наплавке по этому режиму подтверждают этот вывод (рисунок 4).

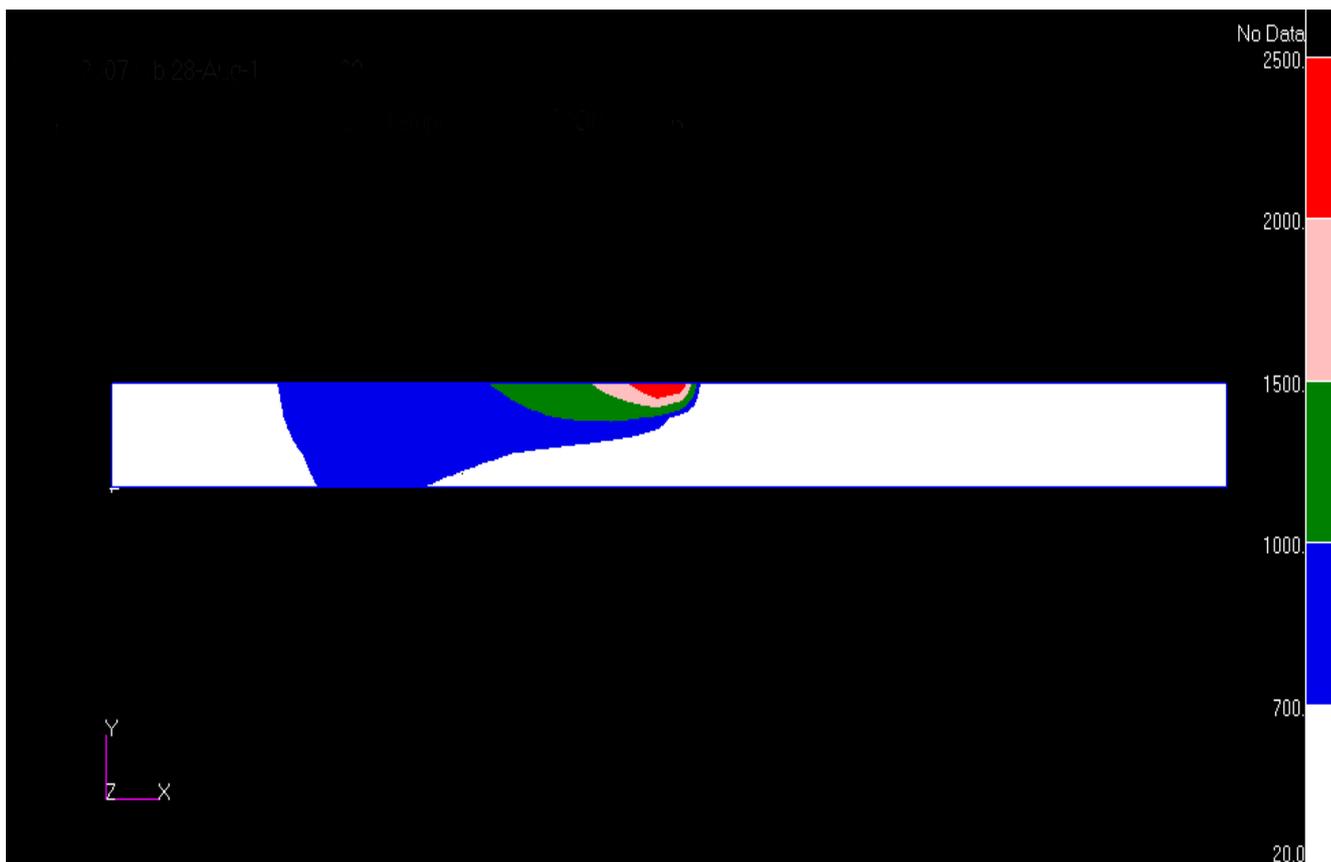


Рисунок 4 – Расчет теплового поля в стенке трубы ($\delta=7,6\text{мм}$) при наплавке по режиму п. 3 таблицы 1 через 25 сек от начала сварки

Видно, что тепловое поле захватывает внутреннюю поверхность стенки. Это означает, что: а) ЗТВ распространяется на всю толщину стенки; б) имеет место влияние потока тепла, отраженного от внутренней поверхности стенки; в) это приводит к повышению $t_{\text{внутр.}}$ до критических значений при величине тепловложения ниже допустимого W_{max} , установленного по уравнению регрессии.

В соответствии с рекомендацией п.3 таблицы 1 снижаем сварочный ток I до 100А и уменьшаем V до $1,5\text{мм/с}$. В результате получаем: $t_{\text{внутр}}=580^{\circ}\text{C}$ (эксперимент), $t_{\text{внутр}}=617^{\circ}\text{C}$ (расчет по МКЭ). Расчет теплового поля представлен на рисунке 5; поле не достигает поверхности внутренней стенки.

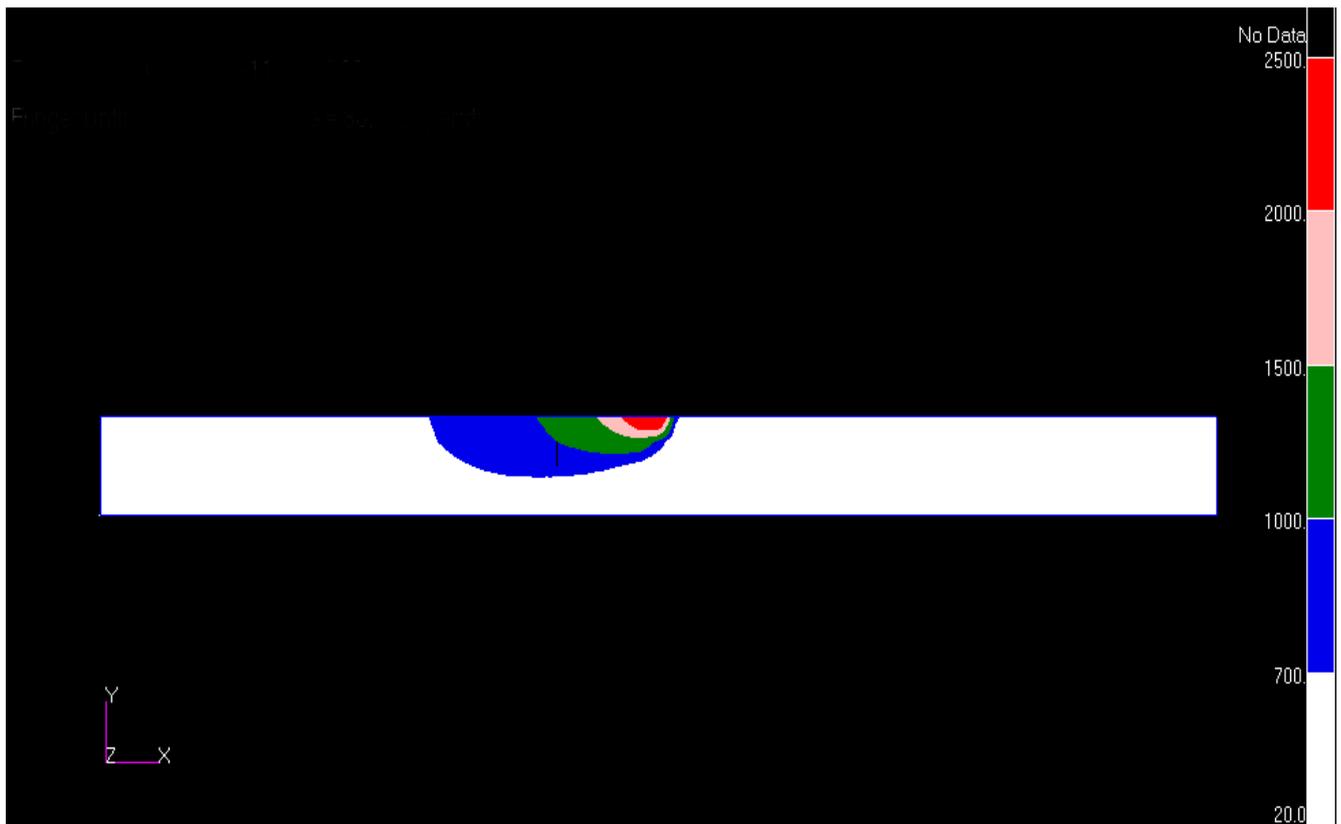


Рисунок 5 – Расчет теплового поля в стенке трубы ($\delta=7,6\text{мм}$) при наплавке по режиму п.4 таблицы 1 через 33 сек от начала сварки

Аналогичным образом проведен МКЭ-анализ других режимов сварочной наплавки, представленных в таблице 1.

Полученные результаты МКЭ-анализов режимов наплавки позволяют сделать следующий вывод: при термическом анализе процессов дуговой сварочной наплавки недостаточно ориентироваться только на величину тепловложения, необходимо знать, в каком сочетании параметров сварки обеспечивается такое тепловложение. При этом доминирующую роль играет сварочный ток.

Расчет допустимого давления для стенки трубы с дефектом «коррозионной язвы» сложного профиля. При $t^0 \geq 700^0\text{C}$ эффективная прочность любой трубной стали фактически близка к нулю. Область, описываемая контуром изотермы 700^0C вокруг сварочной ванны, может быть представлена термической «коррозионной язвой» (рисунок 6).

а) Сначала проводим расчет остаточной прочности трубы ($P_{\text{доп}}$) с коррозионным дефектом без термической «коррозионной язвы». Результат расчета: $P_{\text{доп}}=8,94\text{МПа} > p_{\text{ном}}=7,4\text{ МПа}$, где $p_{\text{ном}}$ – рабочее давление.

Вывод: участок газопровода с коррозионным дефектом (рисунок 6) без термической «коррозионной язвы» работоспособен при рабочем давлении $p_{ном} = 7,4$ МПа.

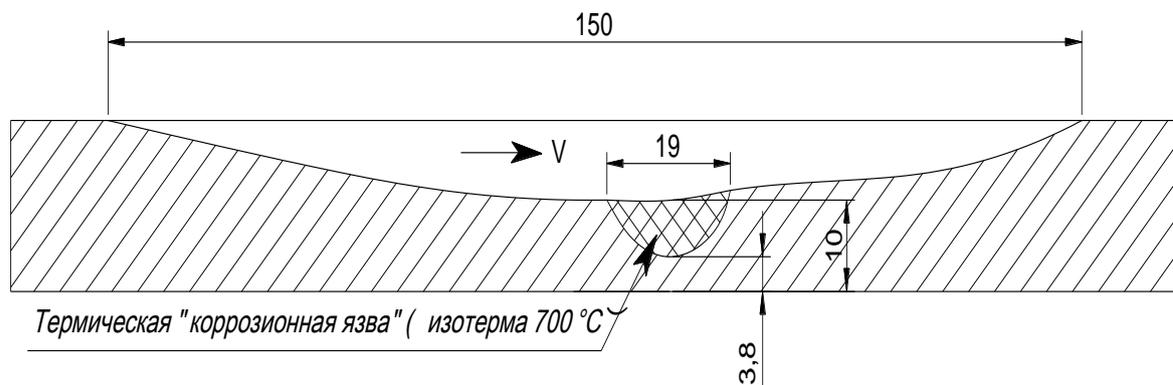


Рисунок 6 – Продольное сечение участка стенки трубы (М 1:1) с коррозионным дефектом, на который наложена термическая сварочная «коррозионная язва»; контур изотермы 700°C рассчитан по МКЭ

б) Далее оценим допустимое давление на данном участке газопровода с коррозионным дефектом и термической сварочной «коррозионной язвой» с учетом максимальной глубины составного дефекта и общей длины дефекта. Результат расчета: $P_{до} = 6,84 \text{ МПа} < p_{ном} = 7,4 \text{ МПа}$.

Вывод: участок газопровода с составным дефектом максимальной глубины d_{max} на длине $l_{общ}$ не может быть признан работоспособным при рабочем давлении $p_{ном} = 7,4$ МПа.

в) Выполним уточняющий расчет разрушающего и допустимого давлений с использованием стандартной процедуры последовательных приращений по глубине составного дефекта сложной формы (рисунок 6). Результат расчета: $p_{доп} = p_p / K = 14,39 / 1,6 = 8,99 \text{ МПа}$.

Вывод: оцениваемый участок газопровода удовлетворяет критерию работоспособности: $p_{доп} = 8,99 \text{ МПа} > p_{ном} = 7,4 \text{ МПа}$ и может быть отремонтирован по методу дуговой сварочной наплавки при соблюдении рекомендованного режима сварки без снижения рабочего давления $p_{раб}$.

В четвертой главе представлена разработка технологии и организация сварочных работ при ремонте газопровода без остановки перекачки газа (рисунок 7).

Ремонт сваркой на действующем газопроводе квалифицируется как огневые работы. В связи с этим необходимо соблюдение основных мероприятий по обеспечению безопасности при производстве ремонтных работ методом сварочной наплавки (СТО ГАЗПРОМ 14-2005) (рисунок 8).

Если максимальное тепловложение W_{\max} , при котором не происходит прожога, является недостаточным для обеспечения адекватной защиты от водородного растрескивания, должны применяться альтернативные меры, например, особая последовательность наложения «валик на плоскости/отпущенный валик».

При ремонте наплавкой сначала накладывается сварной шов по периметру дефекта, за ним следуют слои последовательных параллельных заполняющих проходов, которые желательно накладывать в круговом направлении трубы.

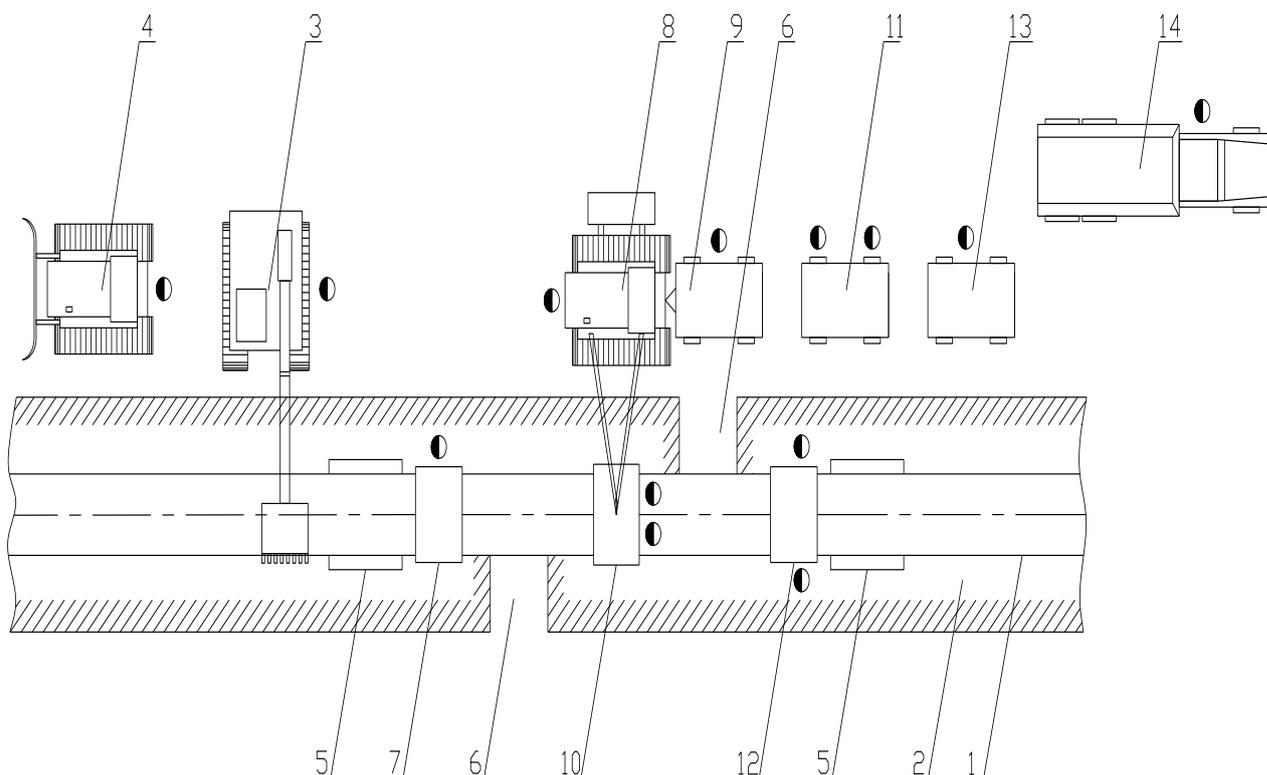


Рисунок 7 – Технологическая схема ремонта дефекта газопровода без остановки перекачки газа методом прямой сварочной наплавки металла.

1 - ремонтируемый газопровод; 2 - протяженный шурф; 3 - вскрышной экскаватор; 4 - бульдозер; 5 - передвижная опора; 6 - выход из шурфа; 7 - очистная машина; 8 - трубоукладчик; 9 - электростанция; 10 - ремонтный сварочный пост; 11 - лаборатория неразрушающего контроля; 12 - устройство для изоляции труб; 13 - лаборатория контроля качества изоляционного покрытия; 14 - автомобиль повышенной проходимости. Состав ремонтной бригады – 13 человек

Начальный проход по периметру определяет границу наплавки; здесь же выявляется расположение начальных и конечных точек последовательно накладываемых швов (рисунок 9а).

Заполняющие проходы первого слоя должны накладываться с использованием пределов тепловложения, чтобы минимизировать риск прожога. Если остаточная толщина стенки меньше 8,0мм, то первый слой должен накладываться с применением электродов $\varnothing 2,5\text{мм}$ или меньше ($\varnothing 2,0\text{мм}$). При наложении параллельного валика положение электрода должно обеспечивать перекрытие не меньше $\sim 50\%$.



Рисунок 8 – Основные мероприятия по обеспечению безопасности при производстве ремонтных работ методом сварочной наплавки (СТО ГАЗПРОМ 14-2005)

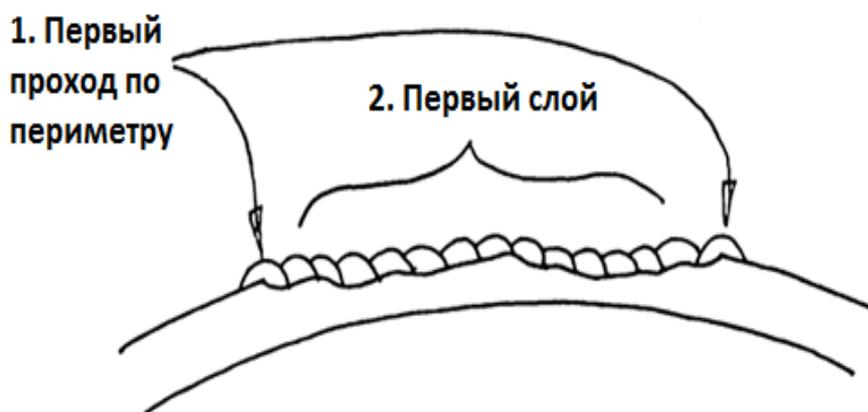


Рисунок 9а – Схема наложения первого слоя сварочной наплавки 1 - первый проход по периметру; 2 - первый слой

После наложения первого слоя осуществляется шлифовка прохода по периметру (рисунок 9б).

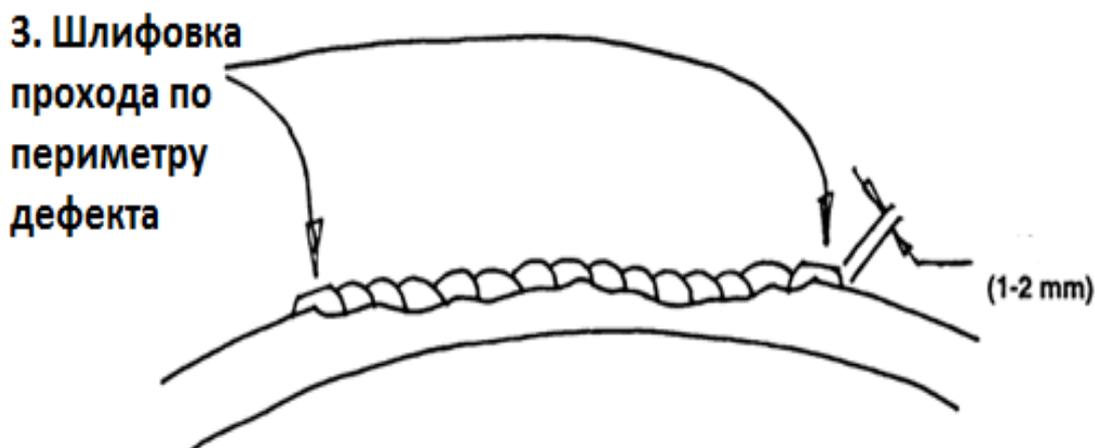


Рисунок 9б – Схема шлифовки сварочного прохода. 3 - шлифовка прохода по периметру дефекта; высота – 1-2мм

Многопроходный ремонт обеспечивает наибольшую величину отпуска ЗТВ первого прохода. Выбор числа проходов зависит от глубины коррозии и потребности в отпуске. Два прохода выполняются при коррозии глубже 3,2мм при ремонте газопровода методом прямой наплавки без остановки перекачки газа.

Далее перечислены меры, принимаемые для организации сварочных работ при ремонте газопровода методом прямой наплавки без остановки перекачки газа.

Затем выполняется второй проход по периметру шлифованного валика; при этом осуществляется отпуск ЗТВ в подошве первого прохода (рисунок 9в).



Рисунок 9в – Схема наложения слоя второго прохода. 4 - второй проход по периметру; 5 - второй слой; в пунктирном круге – подошва второго прохода по периметру как раз захватывает ступеньку, выполненную при шлифовке валика первого прохода. При втором проходе в базовом металле не возникает новой ЗТВ

В мировой практике применяют метод дуговой сварочной наплавки металла при ремонте поверхностных коррозионных дефектов действующих

трубопроводов. Однако несомненными преимуществами ремонта сварочной наплавкой являются минимальные трудоемкость и время ремонта, а также наименьшая величина ремонтных затрат (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнение затрат для различных методов ремонта трубопровода

Метод ремонта	Затраты млн. руб. (на ремонт одного дефектного участка)
Вырезка участка трубы и замена	1, 445
Композитная обмотка (Clock Spring)	0, 610
Эпоксидно-заполненная муфта	0, 619
Сварная муфта	0, 508
Сварочная наплавка металла	0, 378

Как показывают расчеты, проведение ремонта методом наплавки на действующем газопроводе позволит снизить затраты по отношению к другим методам ремонта:

- на 1, 067 млн. руб. к ремонту методом вырезки участка трубы и его замена;
- на 0, 232 млн. руб. к ремонту композитной обмоткой «Clock Spring»;
- на 0, 241 млн. руб. к ремонту эпоксидно-заполненной муфтой;
- на 0, 130 млн. руб. по отношению к ремонту сварной муфтой

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе проведенных исследований разработана и предложена эффективная и безопасная технология ремонта дефектов на поверхности газопроводов методом сварочной дуговой наплавки металла без остановки транспортировки газа.

2. Экспериментально обоснован выбор оптимальных технологических параметров ремонтной наплавки в зависимости от следующих видов рисков: а) риск термического прожога стенки трубы в зоне дефекта, б) риск водородного постсварочного растрескивания. Показано, что в качестве критерия оценки риска прожога при наплавке следует рассматривать не только температуру на внутренней поверхности стенки трубы, но и влияние рабочего давления газа.

3. Анализ зон ремонтной наплавки показал, что предпрожоговое состояние достигается в том случае, когда глубина ЗТВ достигает внутренней поверхности стенки трубы. Определены предельные величины безопасных тепловложений W_{max} для различных толщин стенки ремонтируемых труб. Измерения твердости ЗТВ (HV<350 ед.) подтвердили, что риск водородного растрескивание швов ремонтной наплавки отсутствует.

4. Численное моделирование технологических режимов ремонтной сварочной наплавки по МКЭ показало, что результаты расчетов совпадают с лабораторными экспериментальными данными.

5. Разработана методика определения давления разрушения в процессе ремонта действующего газопровода наплавкой, в которой ремонтная зона представлена в виде составного сложного профиля, содержащего модельную термическую «коррозионную язву». Проверка несущей способности ремонтируемого участка газопровода по СТО Газпром 2-2.3-112-2007 показала, что данный участок газопровода удовлетворяет критерию работоспособности и может быть отремонтирован наплавкой по рекомендованному режиму без снижения рабочего давления в газопроводе.

6. Разработана технология многопроходной ремонтной наплавки в сочетании с последовательностью наложения «валик на поверхности/отпущенный валик», позволяет обеспечить надежность и качество производство ремонтных работ на газопроводе.

**Основные результаты диссертационной работы опубликованы
в следующих научных трудах:**

1. Шафиков Р.Р. Экономическая эффективность применения методов ремонта газопроводов без остановки перекачки газа потребителю // Территория нефтегаз. – М.: ООО «БЭСТ-принт». – 2009 – № 4. – С. 44-48.

2. Шафиков Р.Р. Экспериментальное обоснование ремонта магистральных трубопроводов с использованием сварочных технологий без остановки перекачки газа // Территория нефтегаз. – М.: ООО «БЭСТ-принт». – 2009. – № 4. – С. 48-51.

3. Шафиков Р.Р. Контроль и прогнозирование роста коррозионных дефектов // Территория нефтегаз. – М.: ООО «БЭСТ-принт». – 2009. – № 5. – С. 56-59.

4. Шафиков Р.Р. Моделирование тепловых процессов при сварке на действующем газопроводе методом конечных элементов // Территория нефтегаз. – М.: ООО «БЭСТ-принт». – 2009. – № 5. – С. 60-61.

5. Шафиков Р.Р. Ремонт магистральных газопроводов с использованием сварочных и родственных технологий без остановки перекачки газа // Территория нефтегаз. – М.: ООО «БЭСТ-принт». – 2009. – № 6. – С. 80-83.

6. Стеклов О.И., Севастьянов С.П., Шафиков Р.Р. Теоретико-экспериментальное обоснование возможности ремонта магистральных трубопроводов с использованием сварочных технологий без остановки перекачки газа // Сварочное производство. – 2009. – № 7. – С. 12-17.

7. Велиюлин И. И., Решетников А.Д., Колотовский П.А., Арбузов М.В. Шафигов Р.Р. Совершенствование проектирования капитального ремонта линейной части магистральных газопроводов // Территория нефтегаз. – М.: ООО «БЭСТ-принт». – 2009. – № 12. – С. 44-49.
8. Сунагатов М.Ф., Климов П.В., Гумеров А.К., Шафигов Р.Р. Стресс-коррозия на магистральных газопроводах и человеческий фактор // Территория нефтегаз. – М.: ООО «БЭСТ-принт». – 2010. – № 8. – С. 32-37.
9. Сунагатов М.Ф., Фролов А.В., Гумеров А.К., Шафигов Р.Р. Моделирование напряжённо-деформированного состояния трубопровода за пределами упругости // Территория нефтегаз. – М.: ООО «БЭСТ-принт». – 2010. – № 8. – С. 62-67.
10. Колотовский П.А., Касьянов А.Н., Шафигов Р.Р., Александров А.В. Современные наружные сканеры-дефектоскопы для диагностирования трубопроводов // Материалы XXVIII тематического семинара «Диагностика оборудования и трубопроводов КС». – М.: ООО «Газпром экспо». – 2010. – Т. 1. – С. 101-106.
11. Велиюлин И. И., Решетников А.Д., Ремизов Д.И., Мигунов Д.К., Емельянов П.С., Шафигов Р.Р. Анализ эффективности диагностических и ремонтных работ на линейной части магистральных газопроводов // Газовая промышленность. – М.: «Газойл пресс». – 2011. – № 6. – С. 57-59.
12. Сунагатов М.Ф., Митюшников В.А., Шафигов Р.Р. Оценка возможности получения равнопрочного соединения труб методом обжатия // Территория нефтегаз. – М.: ООО «БЭСТ-принт». – 2011. – № 10. – С. 56-61.
13. Аскаргов Р.М., Мустаев А.Г., Шафигов Р.Р. Экспериментальные работы по определению НДС участка газопровода // Территория нефтегаз.- М.: ООО «БЭСТ-принт». – 2012. – № 10. – С. 78-81.
14. Решетников А.Д., Шафигов Р.Р. Ремонт газопроводов без остановки транспорта газа // Ремонт, восстановление, модернизация, 2014. – № 6. – С. 16-21.

Подписано к печати «18» февраля 2015г.
Заказ № 4199
Тираж 100 экз.
1 уч.-изд. л., ф-т 60×84/16

Отпечатано в ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,
142717, Московская область, Ленинский р-н,
п. Развилка, ООО «Газпром ВНИИГАЗ»