

На правах рукописи

УДК 621.791

Пономарев Павел Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕСУРСА  
УЧАСТКА НЕФТЕПРОВОДА СВАРНЫМИ МУФТАМИ**

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2017

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете  
имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**КУРКИН Алексей Сергеевич**,  
МГТУ им. Н.Э.Баумана, профессор

Официальные оппоненты: доктор технических наук (05.02.10)  
**ДУБРОВСКИЙ Владимир Анатольевич**,  
НПП «ВЕЛД», директор  
кандидат технических наук (05.02.10)  
**ПОНОМАРЕВА Ирина Николаевна**,  
НУЦ «Качество», заместитель директора

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ)  
имени И.М. Губкина»** (г. Москва)

Защита состоится «02» марта 2017 года в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент



**А.В. Коновалов**

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** При повреждении нефтепровода требуется оперативно ремонтировать дефектный участок. Установка ремонтной конструкции (муфты) является эффективным способом ремонта, поскольку позволяет проводить его без остановки перекачки нефти. Это актуально при прокладке нефтепровода как в населенных местностях, где возможны несанкционированные врезки для кражи нефти, так и труднодоступных и сейсмоопасных районах, где повышаются вероятность возникновения дефектов и затруднен оперативный ремонт. Одним из условий ввода в строй нефтепровода Восточная Сибирь – Тихий океан была разработка технологии его ремонта и создание запаса муфт. Установка муфты должна обеспечивать не временный, а капитальный ремонт, т. е. гарантировать работу до конца срока эксплуатации. Этот срок в настоящее время составляет 30 лет, в течение которых нефтепровод испытывает в среднем 10000 сбросов давления. Развитие нефтепроводного транспорта (повышение пропускной способности и продление срока службы нефтепроводов) приводит к тому, что даже те ремонтные конструкции, которые соответствуют современным требованиям, в перспективе становятся слабым звеном.

Большое разнообразие и появление все новых конструкций муфт свидетельствует о том, что традиционные средства разработки не обеспечивают создания эффективных муфт с заданными параметрами. Нередко обеспечение необходимого ресурса достигается за счет увеличения их размеров и массы. Такие муфты непригодны для оперативного ремонта из-за трудностей их транспортировки, сложности и длительности монтажа.

Снижение массы возможно за счет выбора рациональных формы и геометрических параметров конструкции. Применение научно-обоснованных подходов к проектированию и оценке ресурса ремонтных муфт является весьма актуальной задачей.

**Цель работы** – обеспечение полного восстановления ресурса участка нефтепровода в результате ремонта.

### **Задачи исследований:**

1. Проанализировать существующие конструкции ремонтных муфт и известные методы повышения их ресурса.
2. Разработать методическое обеспечение для моделирования процессов, протекающих при установке ремонтных муфт и эксплуатации отремонтированных участков нефтепроводов.
3. Провести оценку влияния технологии сварки на ресурс муфт.
4. Выявить причины, лимитирующие ресурс ремонтных муфт, и разработать рациональные варианты ремонтных конструкций.
5. Оценить работоспособность разработанных конструкций муфт по результатам натурных испытаний.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач применялись расчетные и экспериментальные методы исследований.

Расчетные методы включали в себя моделирование процессов распространения теплоты при сварке и образования остаточных сварочных деформаций, а также расчет напряженно-деформированного состояния при эксплуатации ремонтных

конструкций с помощью программного комплекса «Сварка», реализующего метод конечных элементов.

Экспериментальные исследования включали испытания лабораторных образцов, имитирующих условия нагружения шва, и натурных образцов в виде участка трубопровода с установленной муфтой. Испытания лабораторных образцов проведены для исследования влияния технологии сварки на ресурс сварного соединения. Испытания натурных образцов проведены для подтверждения адекватности расчетных моделей и результатов расчета.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Установлено, что главной причиной разрушения кольцевого сварного шва является взаимный поворот стенок трубы и муфты, приводящий к дополнительному растяжению в корне шва.

2. Установлено, что причиной пониженной долговечности сварных разрезных тройников является поперечная утяжка металла магистрали тройника в зоне высоких растягивающих кольцевых напряжений. Вследствие этого на участок кольцевого шва рядом с патрубком действует дополнительная растягивающая нагрузка.

3. Установлены зависимости долговечности ремонтных конструкций от их конструктивных параметров.

**На защиту выносятся:**

1. Методика восстановления ресурса участка нефтепровода с помощью сварных муфт.

2. Установленные в результате применения разработанной методики факторы, лимитирующие ресурс муфт, а также наиболее эффективные пути повышения ресурса.

3. Результаты экспериментальных и расчетных исследований влияния технологии сборки и сварки муфт на ресурс сварных соединений.

**Практическая значимость работы** заключается во внедрении разработанных ремонтных конструкций и технологий их монтажа в нефтетранспортной отрасли. Соответствующие изменения внесены в нормативный документ ПАО «Транснефть» РД-75.180.00-КТН-274-10.

Результаты диссертационной работы рекомендованы к внедрению на предприятиях ПАО «Транснефть», ПАО «Газпром», ЗАО «СтройТрансГаз» и на других машиностроительных предприятиях нефтяной и газовой промышленности.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на научном семинаре кафедры технологий сварки и диагностики МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2016 г.), на Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2016 г.).

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликованы 7 научных статей, в том числе 5 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, литературы из 107 наименований. Общий объем работы 142 страницы, в которых содержится 89 рисунков и 10 таблиц.

## **2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Первая глава** посвящена анализу современных ремонтных конструкций нефтепроводов, а также обзору методов оценки и повышения их ресурса.

Ремонтная муфта состоит из двух цилиндрических частей, которые устанавливают поверх поврежденного участка нефтепровода, не потерявшего герметичность, и соединяют продольными швами, затем муфту приваривают к трубе кольцевыми швами (Рис. 1,а). Наиболее универсальным видом муфты является разрезной тройник (Рис. 1,б). Он пригоден для ремонта таких специфических повреждений, как врезки для кражи нефти.

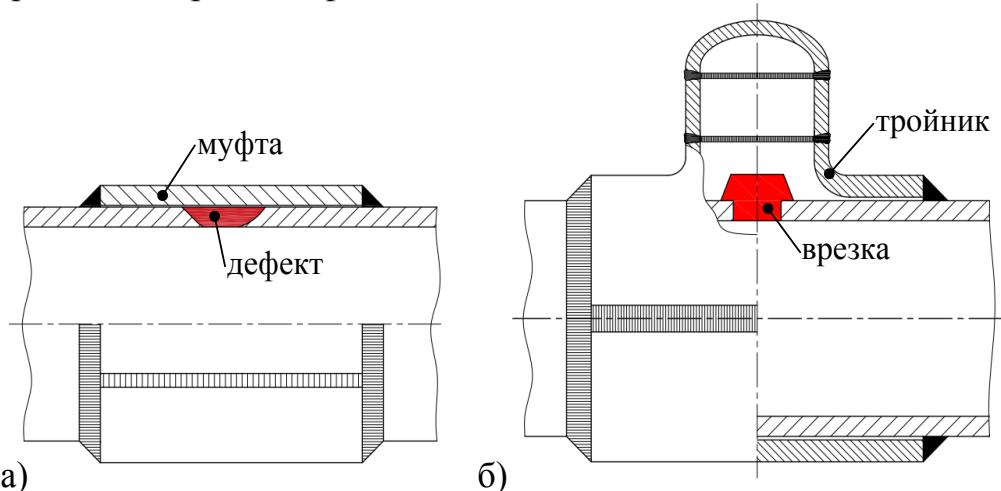


Рис. 1. Ремонт поврежденного участка установкой: а) гладкой муфты; б) разрезного тройника

Ремонтную конструкцию устанавливают на поврежденный участок, еще не потерявший герметичность. Установка муфты направлена на восстановление его ресурса до уровня неповрежденных участков нефтепровода.

Процесс функционирования отремонтированного участка состоит из двух стадий. На первой стадии роль муфты заключается в замедлении роста дефекта за счет частичной разгрузки участка трубы. Эффективная работа муфты при этом требует плотной посадки муфты на трубу, чтобы обеспечить совместную работу муфты с трубой (Рис. 2,а). Для этого муфту обжимают с помощью наружных центраторов. Дополнительное обжатие возникает за счет поперечной усадки продольных швов муфты после сварки. Создание плотного контакта муфты с трубой затруднено в случае овальности трубы. Как правило, полного прекращения роста дефекта под муфтой достичь не удается.

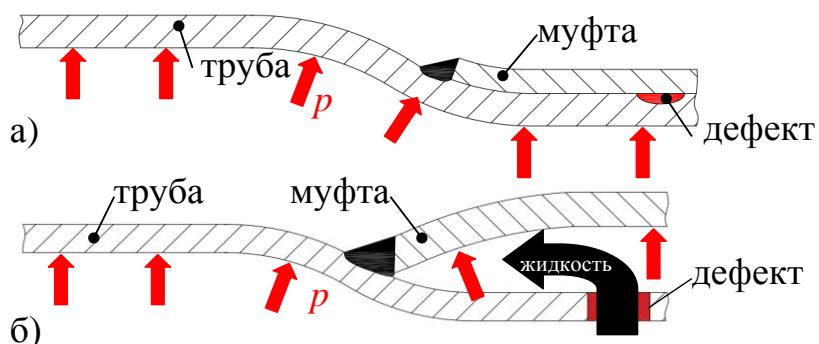


Рис. 2. Стадийность работы муфты: а) совместная работа муфты и трубы до образования сквозного дефекта; б) работа муфты при сквозном дефекте

На второй стадии, после образования сквозного дефекта, муфта должна выдерживать внутреннее давление перекачиваемой жидкости взамен потерявшего герметичность участка трубы (Рис. 2,б). Для ряда конструкций муфт, предназначенных для ремонта гофров и вмятин, степень разгрузки существенно ниже (в осо-

бенности это относится к тройникам). Поэтому велик риск быстрого прорастания дефекта насквозь, тогда большую часть срока эксплуатации муфта будет работать на второй стадии (взамен трубы). В связи с этим именно вторая стадия работы является решающей для повышения ресурса трубопровода после ремонта. Ресурс на этой стадии определяется долговечностью кольцевого углового шва, соединяющего муфту с трубой.

Опыт эксплуатации ремонтных конструкций показывает, что угловой шов является слабым местом, по которому происходят преждевременные разрушения. Основные причины низкого ресурса сварного соединения связаны с двумя факторами. Во-первых, после разгерметизации участка трубы жидкость, попавшая под муфту, создает расклинивающий эффект и вызывает высокие растягивающие напряжения в корне шва. Во-вторых, в корне шва имеется острый трещиноподобный концентратор напряжения. Его острота зависит от технологии сварки и определяется условиями подготовки и видом разделки кромок, а также величиной зазора между трубой и муфтой. Неблагоприятная схема нагружения в сочетании с циклической нагрузкой и острый концентратор в корне шва и приводят к появлению и росту усталостной трещины.

Исследования ресурса стальных муфт и способы его повышения представлены в работах отечественных (А.Г. Гумеров, Р.С. Зайнуллин, В.И. Махненко, С.В. Романцов, А.М. Шарыгин, А.С. Зандберг, Р.С. Харисов, Р.К. Адиев) и зарубежных (W. Bruce, J. Keifner, J. Otegui, J. Duell, A. Cisilino) авторов. Предложенные авторами меры повышения ресурса ремонтных конструкций нацелены на укрепление кольцевого шва. Одной из мер является увеличение расчетного сечения шва за счет увеличения катетов или выпуклости шва, а также за счет применения обратной разделки. Установка поверх ремонтной конструкции дополнительных кольцевых бандажей позволяет уменьшить изгиб, вызванный попаданием жидкости под муфту. Наиболее кардинальной мерой повышения ресурса является изменение типа сварного соединения муфты с трубой, например, переход к нахлесточнostaиковому соединению, при котором разгрузочные бандажи на трубе привариваются к торцу муфты. Отмечен также положительный эффект при замене нахлесточного соединения муфты с трубой тавровым, в связи с этим предложены торосегментный и торо-цилиндрический варианты конструкции муфт.

Эти меры потребовали усложнения и утяжеления муфты, но не привели к существенному росту ресурса, поскольку не устранили опасный концентратор напряжения в корне кольцевого шва. Наименее эффективными они оказались для разрезного тройника, где при испытаниях возникала преждевременная течь по кольцевому шву напротив патрубка. Для выявления причин разрушения и поиска эффективных технических решений, необходим всесторонний анализ работы ремонтной конструкции под давлением.

**Вторая глава** посвящена разработке методики восстановления ресурса поврежденного участка нефтепровода с помощью сварной муфты.

На ресурс муфты, помимо концентраторов напряжений, оказывает влияние характер прилагаемых нагрузок и технологический процесс сварки. В связи с этим важен единый методический подход, позволяющий выявить и устранить ожидаемые проблемы на стадии проектирования. В рамках такого подхода предлагается методика, включающая ряд этапов.

1. Расчет и анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) сварной муфты и тройника для выявления узких мест - причин низкого ресурса. При этом важен правильный выбор критериев оценки опасных мест в соответствии с условиями эксплуатации конструкции.

2. Определение наиболее эффективных способов усиления муфт. Выбор окончательной формы и основных размеров производится по результатам параметрического исследования – численных экспериментов на компьютерной модели ремонтной конструкции.

3. Оценка влияния технологии изготовления и монтажа на прочность и ресурс. Наиболее важным и сложным элементом технологии является выполнение сварных соединений. Наряду с расчетными методами используются экспериментальные - испытания образцов-имитаторов сварных соединений.

4. Экспериментальная проверка принятых технических решений. В связи с ответственностью и большим объемом применения муфт, целесообразны приемочные испытания натурных образцов муфт, установленных на дефектный участок трубопровода.

Методика носит расчетно-экспериментальный характер. Наиболее эффективным средством анализа и оценки ресурса является численное моделирование методом конечных элементов. Рациональная область применения экспериментальных методов состоит в определении свойств материалов и в контрольных испытаниях разработанных конструкций. Расчетная часть методики предполагает прогнозирование ресурса на основе уравнения малоцикловой усталости, а также моделирование направления роста трещины.

В сварном соединении муфты с трубой под действием циклически изменяющегося внутреннего давления и остаточных сварочных напряжений возникает двухосное напряженное состояние. Растворяющие напряжения вдоль оси трубы представляет наибольшую опасность, так как способствуют раскрытию трещиноподобных протяженных концентраторов в корне кольцевого шва и росту трещин от них. Возникновению таких напряжений способствует осесимметричный изгиб в зоне соединения муфты с трубой, а также поперечная усадка кольцевого углового шва. Циклическое изменение давления и концентрация напряжения в корне шва приводят к тому, что сварное соединение работает в условиях малоцикловой усталости. Согласно уравнению малоцикловой усталости Мэнсона-Коффина, долговечность ремонтной конструкции обратно пропорциональна квадрату амплитуды пластической деформации в концентраторе. Постоянные составляющие нагрузки, такие, как сварочные остаточные напряжения от поперечной усадки кольцевого шва, не изменяют амплитуду пластических деформаций и оказывают незначительное влияние на ресурс сварного соединения муфты с трубой.

Для адекватного моделирования пластической деформации при циклическом нагружении применена модель изотропного материала с трансляционным упрочнением. Более простые модели приводят к завышению пластической деформации за цикл и занижению показателей долговечности при сложном нагружении. Эта модель реализована в программном комплексе (ПК) «Сварка», разработанном на кафедре технологий сварки и диагностики МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Эффективным способом выбора варианта усиления является численное параметрическое моделирование с анализом напряженного состояния. Целевой

функцией при выборе является минимизация массы варианта при обеспечении требуемого эксплуатационного ресурса.

Для наглядной оценки эффективности способов усиления муфт сопоставим их по ожидаемой долговечности с базовой конструкцией. Приняв ресурс обычной гладкой муфты равным 15 годам (5000 циклов), можно получить оценку изменения долговечности (ресурса)  $N$  в зависимости от параметров шва и разгрузочного кольца:

$$N = N_B \cdot \left( \frac{\varepsilon_{B.PL}}{\varepsilon_{PL}} \right)^2,$$

где  $\varepsilon_{B.PL}$ ,  $\varepsilon_{PL}$  - амплитуда пластической деформации в базовой конструкции муфты без мер усиления и рассматриваемого варианта, соответственно;  $N_B$  – долговечность базового варианта муфты.

Разрушение сварного соединения происходит в результате роста усталостной трещины. Прогнозирование траектории роста трещины позволяет определить слабое сечение, по которому произойдёт разрушение. Для моделирования процесса разрушения применен предложенный В.В. Болотиным метод варьирования роста трещины «по Гриффитсу». Метод основан на сопоставлении величины коэффициента интенсивности напряжений (КИН) при различных вариантах продвижения трещины и выбор такого продвижения, при котором КИН максимален. С учетом выбранной модели материала при моделировании напряженного состояния в вершине трещины необходимо прослеживать несколько циклов нагружения для определения установившегося уровня пластической деформации за цикл в вершине трещиноподобного дефекта и корректной оценки КИН.

Комплекс процессов, протекающих при сварке и работе конструкции в зоне корня углового шва, достаточно сложен и подвержен влиянию большого числа случайных факторов технологического характера. Структурные и фазовые превращения при повторном нагреве вызывают изменение свойств материалов и могут приводить к металлическим дефектам (горячим и холодным трещинам) и разрушению, несвязанному с условиями эксплуатации. Изменение величины зазора приводит к непостоянным условиям формирования шва, что в сочетании со случайным характером условий подготовки кромок может вызвать непровар. В результате острота концентратора в корне шва имеет неопределенный характер. Влияние величины зазора и формы разделки кромок на остроту концентратора изучалась на небольших лабораторных образцах, каждый из которых включал участок нахлесточного соединения с угловым швом. Такие образцы должны быть изготовлены по монтажной технологии. Это обеспечит воспроизведение механических свойств и структурного и фазового состава сварного соединения реальной конструкции на лабораторных образцах.

Включение натурных экспериментов в заключительную стадию методики повышения ресурса позволяет подтвердить результаты расчета и эффективность принятых технических решений. Натурные испытания являются наиболее надёжным способом подтверждения достоверности результатов расчета. Такие испытания обязательно проводят при приемке конструкции и подтверждения её ресурса.

Результаты расчетных и экспериментальных исследований должны обеспечить возможность выбора рационального сочетания параметров конструкции и технологии ремонта для повышения долговечности.

**В третьей главе** представлены результаты применения разработанной методики для оценки эффективности работоспособности гладких муфт и тройников.

Анализ НДС позволил выявить особенности работы ремонтных конструкций под давлением. После потери герметичности трубы участок трубы под муфтой не нагружен. В результате происходит изгиб стенки трубы на выходе из-под муфты. Прилегающий участок стенки муфты под действием внутреннего давления поворачивается относительно стенки трубы. Эти перемещения направлены так, что вызывают поперечное растяжение корня кольцевого шва. Такой характер нагружения в сочетании с острым концентратором в корне шва и является причиной низкого ресурса гладких ремонтных муфт. Установка разгрузочного кольца на трубу или муфту позволяет снизить взаимный поворот трубы и муфты и повышает ресурс сварного соединения (Рис. 3).

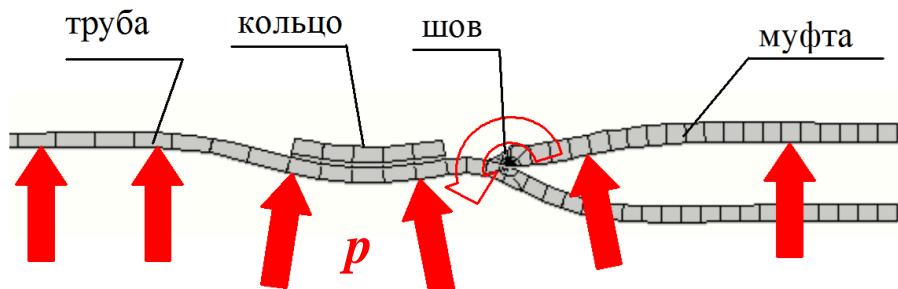


Рис. 3. Схема разгрузки углового шва гладкой муфты разгрузочным кольцом

Определение рациональных параметров усиливающих конструкций проведено путем параметрического анализа. Расчеты выполнены в соответствии с разработанной методикой. Из результатов расчетов (Рис. 4) следует, что даже при небольшой толщине разгрузочное кольцо на трубе вплотную к кольцевому шву муфты позволяет обеспечить требуемый ресурс, но только при условии его плотной посадки на трубу. Наиболее значимым размером кольца является его ширина. Различные способы увеличения минимального сечения шва также дают положительный эффект.

Анализ НДС объемной модели тройника под действием внутреннего давления показал наличие приблизительно трехкратной концентрации растягивающего напряжения  $\sigma_{\text{прод}}$  вдоль образующей магистрали напротив патрубка (Рис. 5). Эта компонента напряжения ложится в качестве поперечной нагрузки на кольцевой шов соединения тройника с трубой. По мере удаления от патрубка напряжения снижаются до уровня, характерного для гладкой муфты. Причиной концентрации нагрузки на шов является поперечная утяжка магистрали тройника (эффект Пуассона). Участки магистрали тройника рядом с патрубком находятся под действием высоких кольцевых напряжений  $\sigma_{\text{кол}}$ , в 3 раза превосходящих аналогичные напряжения в гладкой муфте. В результате поперечного сокращения этих участков возникает дополнительная нагрузка на кольцевой шов, которая увеличивает размах напряжений в цикле и снижает его ресурс.

Аналогичную картину можно наблюдать при растяжении плоской пластины с отверстием (Рис. 6). Если боковые края пластины не закреплены, то поперечная утяжка напротив отверстия существенно больше, чем вдали от него. При этом поперечные напряжения малы. Если края закреплены швом, то на него действует дополнительная растягивающая нагрузка от продольного растяжения пластины.

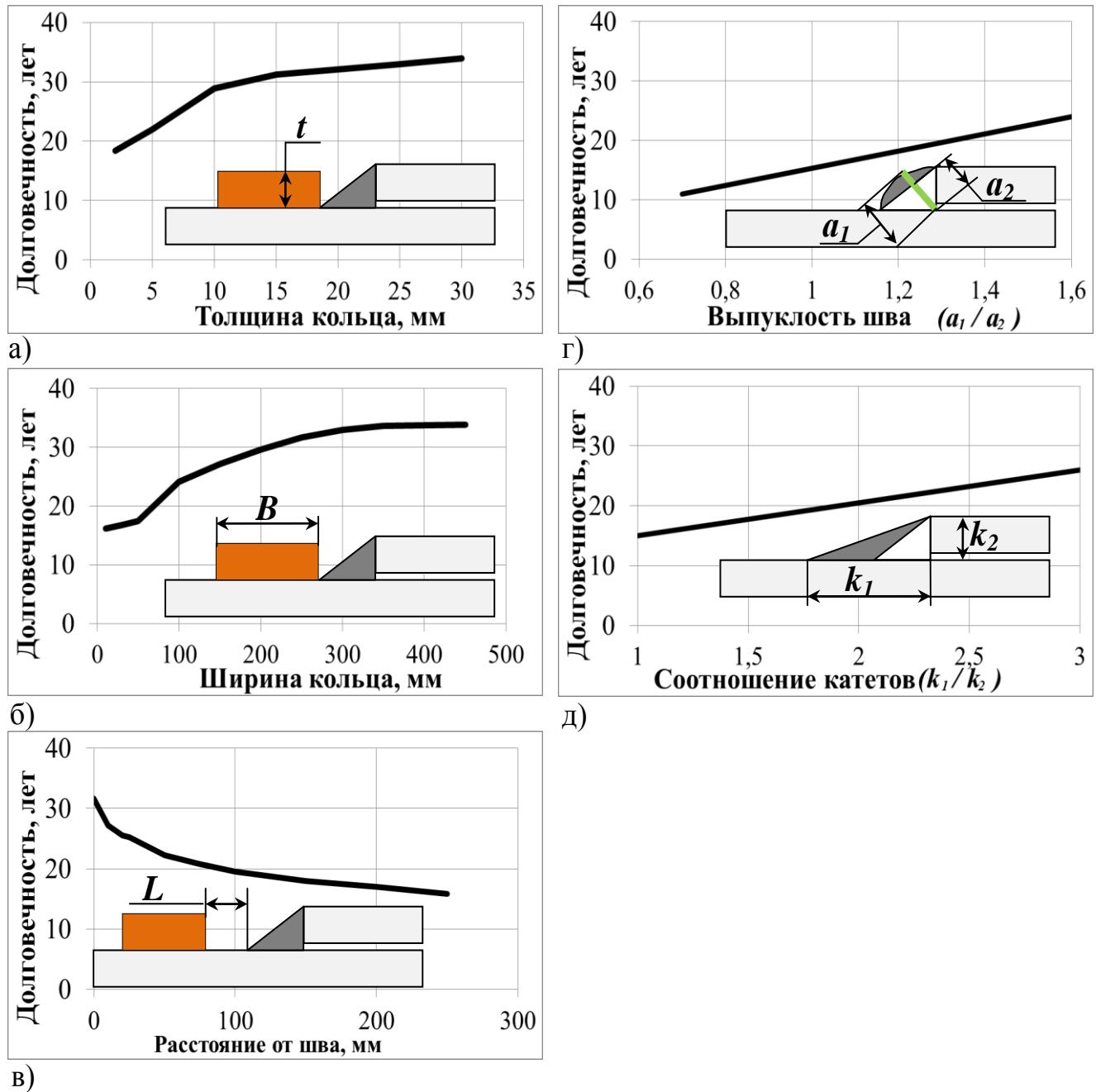


Рис. 4. Зависимости долговечности муфты от толщины разгрузочного кольца (а), расположения кольца на трубе (б), ширины кольца (в), выпуклости шва (г) и соотношения катетов шва (д)

Выявленный механизм позволил оценить эффективность существующих приемов усиления разрезных тройников. Увеличение длины магистрали снижает неравномерность поперечной нагрузки на шов. Увеличение толщины также снижает нагрузку на шов, однако увеличение этих размеров приводит к резкому росту массы тройника.

Установка локальных кольцевых бандажей дает меньший прирост массы, но, как показали расчеты, их влияние на работу кольцевого шва оказалось незначительным, а в некоторых случаях негативным (Рис. 7). Так, установка бандажа на патрубок повышала нагрузку на шов. Наибольшую разгрузку кольцевого шва, приближающую ресурс тройника к ресурсу гладкой муфты, дает приварка небольшой накладки на участок магистрали напротив патрубка. Недостаток такой

накладки – необходимость сварки углового шва с большим катетом для равномерного распределения нагрузки между тройником и усиливающей накладкой.

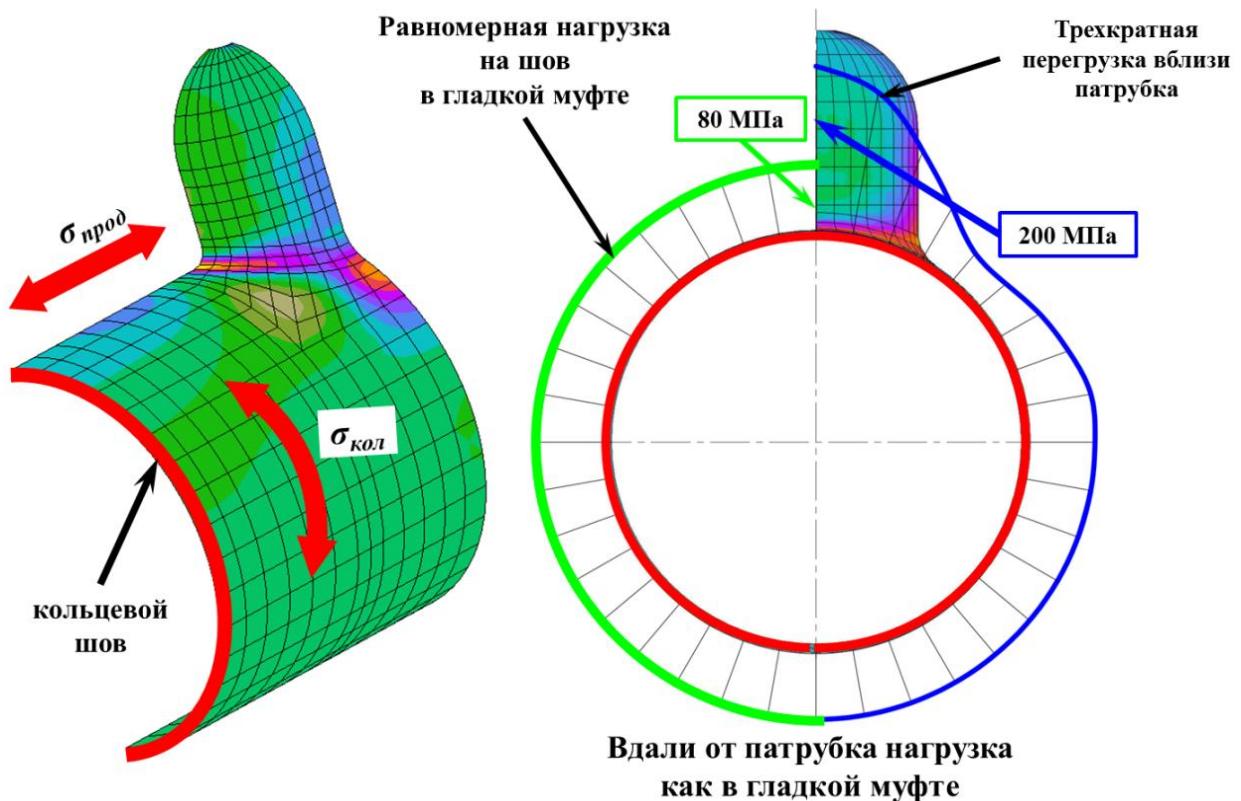


Рис. 5. Распределение нагрузки на шов в муфте и разрезном тройнике

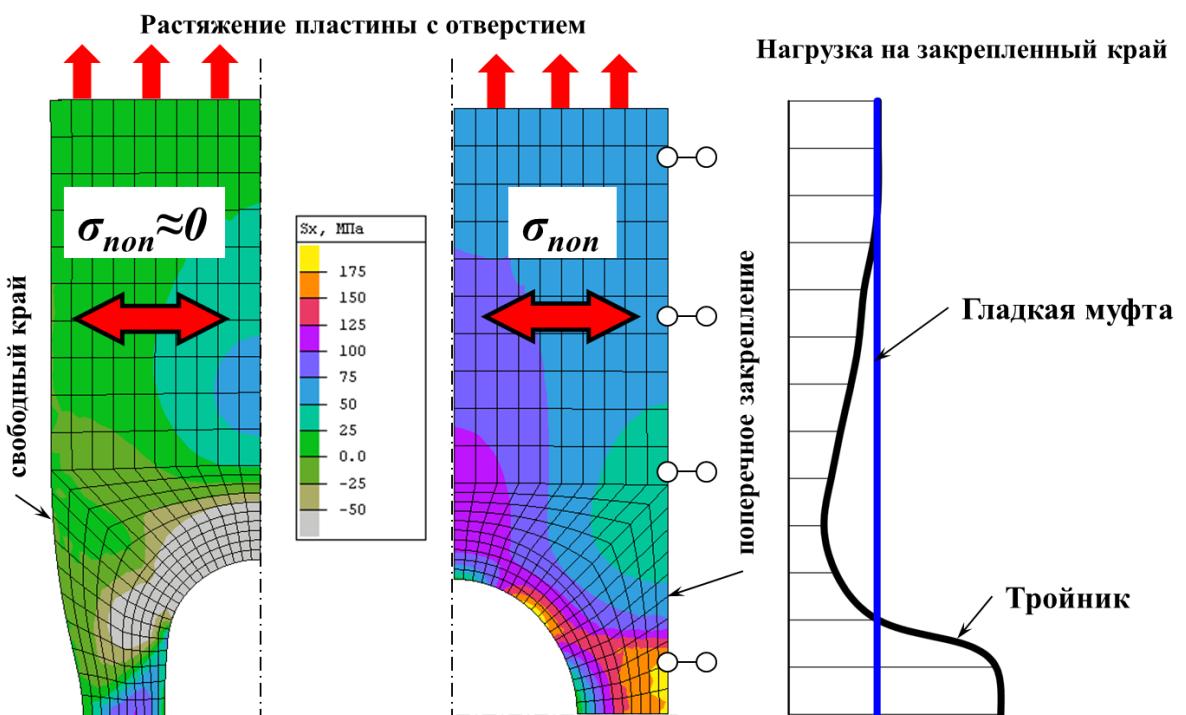


Рис. 6. Модель нагружения кольцевого шва тройника напротив патрубка

Проведенное моделирование опасности разрушения вследствие роста трещины в тройнике показало, что разрушение тройника из-за дополнительного растяжения будет происходить поперек толщины его стенки (Рис. 8). В связи с особенностями роста трещины в тройнике, установка разгрузочного кольца и увеличение минимального сечения шва для разрезных тройников менее эффективны,

чем для гладких муфт. При моделировании использована модель деформирования материала с трансляционным упрочнением (с учетом эффекта Баушингера).

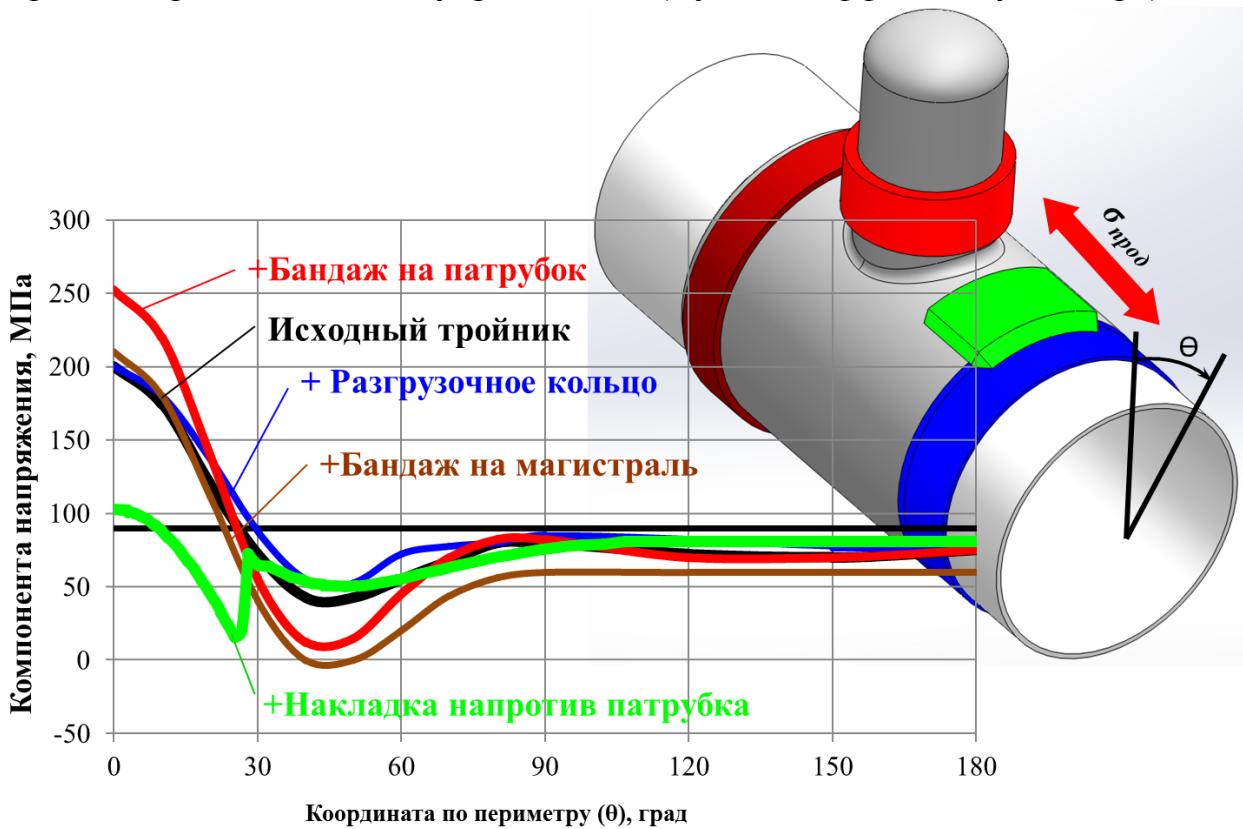


Рис. 7. Результаты анализа способов усиления разрезных тройников

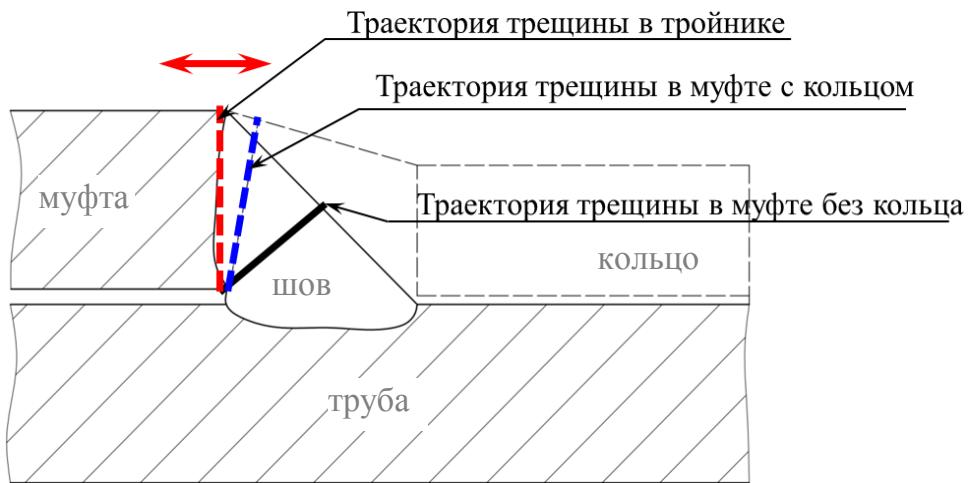


Рис. 8. Результаты моделирования роста трещины в тройнике

**Четвертая глава** посвящена оценке влияния технологии сварки на ресурс сварного соединения и проверке адекватности разработанных моделей и результатов расчета.

Образцы вырезали из фрагмента сварного соединения муфты с трубой. Материал трубы и муфты - сталь класса прочности К60. Ручную дуговую сварку производили электродами с основным типом покрытия согласно РД-75.180.00-КТН-274-10. Для сварки корня шва использовали электроды типа Э50 (LB52U), заполняющие и облицовочные слои выполняли электродами типа Э60 (ОК74.70). Перед сваркой корневого слоя выполняли предварительный подогрев газовой горелкой до  $+100^{\circ}\text{C}$ . Испытания проводили для двух типов разделки кромок и величин зазора 0, 4 и 8 мм (Рис. 9). На основе компьютерного моделирования была рассчитана

нагрузка на образец  $P$ , соответствующая условиям эксплуатации муфты. После испытаний проводился обмер длины трещин на торцах образцов. Небольшие трещины росли по минимальному сечению шва уже за пределами назначенного 30-летнего ресурса (Рис. 10).

По результатам испытаний установлено:

- 1) трещины возникают как при минимальном, так и при большом зазоре;
- 2) место начала трещины – край корня шва со стороны стенки тройника;
- 3) направление роста трещины – по сварному шву;
- 4) после возникновения усталостная трещина растет быстрее при большем зазоре;
- 5) глубокое проплавление в образцах с разделкой тормозит рост усталостных трещин.

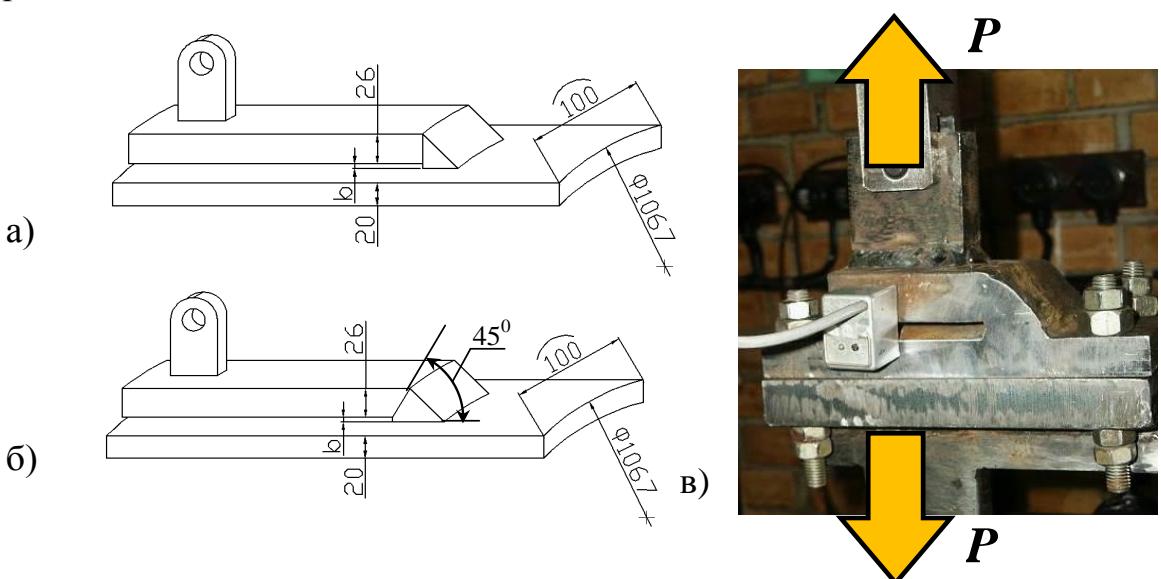


Рис. 9. Лабораторные образцы для изучения влияния технологии сборки и сварки на ресурс сварного соединения: а) образец без обратного скоса кромок; б) образец с обратным скосом кромки; в) схема приложения нагрузки к образцу

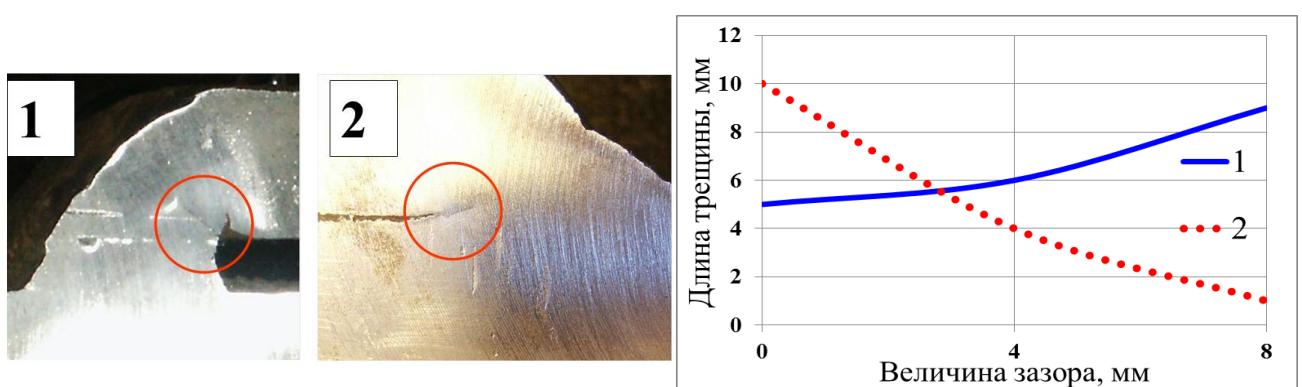


Рис. 10. Результаты испытаний лабораторных образцов: 1 – без скоса кромки; 2 – с обратной разделкой кромок

Повышение усталостной прочности при росте зазора и изменении формы разделки объясняется ростом минимального сечения сварного шва. Применение обратного скоса кромок может обеспечить повышение долговечности при больших зазорах за счет роста минимального сечения шва, но требует более тщательного неразрушающего контроля в связи с риском появления в корне шва трудно выявляемых дефектов, которые становятся очагами разрушения.

Натурные испытания проведены на образцах тройника с диаметром ответвления 219 мм и толщиной стенки магистрали 23 мм, установленных на трубу диаметром 1067 мм с толщиной стенки 20 мм, в соответствии с утвержденной в ПАО «Транснефть» методикой приемки ремонтных конструкций. В процессе испытаний тройники подвергают воздействию циклически изменяющегося внутреннего давления и внешнего изгибающего момента, изменяющегося синхронно с давлением (Таблица 1).

Таблица 1.  
Параметры испытательных нагрузок натурных образцов

Параметры нагружения	Нагрузка	
	Давление, МПа	Момент, кН·м
Циклическая нагрузка	Минимальная	3,0
	Максимальная	12,28
Статическая нагрузка	17,0	-

В ходе испытаний произошло преждевременное разрушение образцов тройников. Все разрушения происходили на участке кольцевого шва напротив патрубка (Рис. 11). При этом направление роста усталостной трещины отклонялось от минимального сечения шва и шло по основному металлу стенки тройника. На участках шва вдали от патрубка рост трещин в корне шва к моменту разрушения тройника не начался. Результаты испытаний натурных образцов тройника подтвердили результаты расчетов. Обратная разделка кромок и разгрузочные кольца позволяют повысить ресурс гладкой муфты, но для тройников оказываются неэффективными, так как разрушение происходит по стенки магистрали. Кроме того, обратная разделка кромок повышает риск непроваров в корне шва.

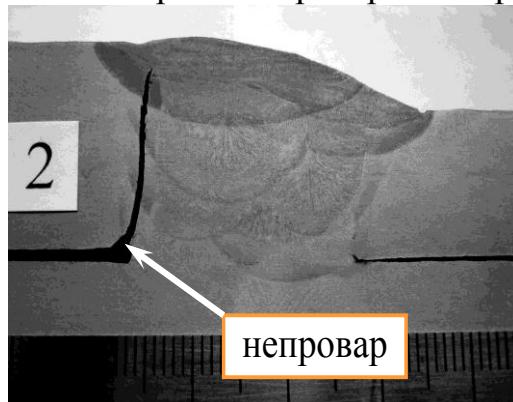


Рис. 11. Макрошлиф кольцевого углового шва натурных образцов тройника в зоне разрушения

**Пятая глава** посвящена разработке новых ремонтных конструкций и технологий сборочно-сварочных работ, обеспечивающих необходимую долговечность после ремонта. Изменением конструктивного оформления сварного соединения ремонтной конструкции с трубой может быть достигнуто путем устранения очагов зарождения и роста трещин.

Особенности установки тройника при ремонте позволили предложить для него специфическое решение проблемы обеспечения ресурса, не применимое для гладких муфт. Приварка патрубка непосредственно к трубе с последующей установкой и приваркой остальных частей муфты исключает возникновение опасной

схемы нагружения. Это решение исключает попадание перекачиваемой жидкости под муфту даже после потери герметичности трубы. Такой «патрубковый» тройник успешно прошел натурные испытания. Разрезка после испытаний показала полное отсутствие трещин в корне кольцевого шва (Рис. 12).

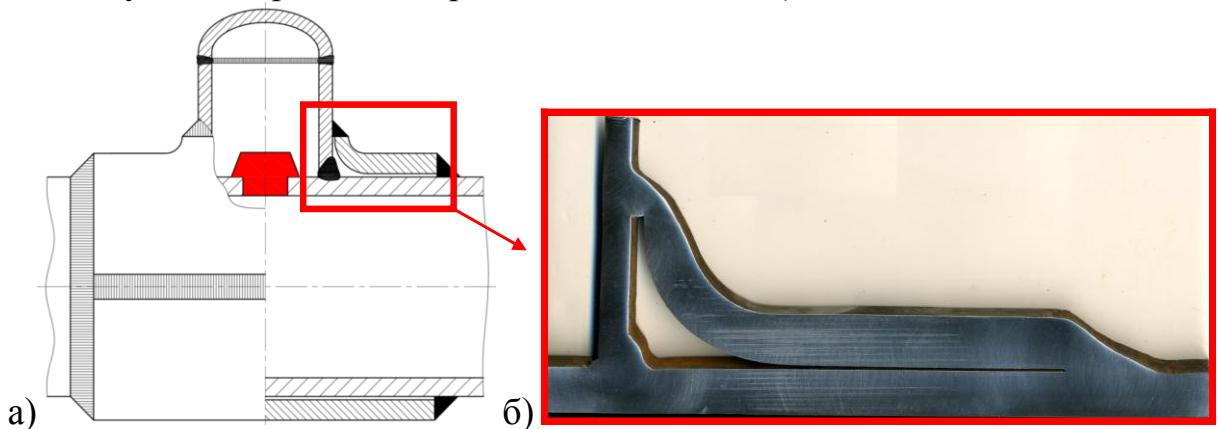


Рис. 12. Испытания патрубкового тройника: а) конструкция тройника; б) макрошлиф сварного соединения

Патрубковый тройник имеет ограничение. СНиП запрещает приварку патрубка вблизи продольного шва трубы. Поэтому применение такого тройника при выявлении дефектов в этой зоне требует дополнительного обоснования. Тем не менее, разработанная конструкция и технология ее монтажа вошли в нормативный документ ПАО «Транснефть» РД-75.180.00-КТН-274-10 для нефтепровода Восточная Сибирь – Тихий океан.

Разработка долговечных ремонтных конструкций без ограничений по применению требует изменения конструктивного оформления сварного соединения. Первым шагом на этом пути является известная конструкция торо-цилиндрической муфты с подкладными кольцами (Рис. 13,а). Существенное снижение концентрации напряжений достигается за счет замены нахлесточного соединения на тавровое соединение торовой части (поз.3) с подкладным кольцом (поз.4). В корне шва (поз.5), соединяющего кольцо с трубой, под действием внутреннего давления возникают сжимающие напряжения. Наиболее опасной точкой в тороцилиндрической муфте является корень шва (поз.6) таврового кольцевого соединения. Достоинства торо-цилиндрической муфты позволили выбрать её в качестве прототипа.

В результате проведения серии численных экспериментов в ПК «Сварка» предложена новая конструкция торо-цилиндрической муфты (Рис. 13,б). Новая конструкция муфты обладает преимуществом своего прототипа. Дополнительный эффект достигается за счет замены таврового сварного соединения на стыковое (поз.8) между торовой (поз.3) и цилиндрической (поз.2) частями муфты, которое, как известно, имеет меньшую концентрацию напряжений. Радиус торовой части ( $R_b$ ) увеличен с целью распределения изгиба переходной зоны муфты на большую длину и снижения напряжений. Уровень напряжений во всех сечениях и швах муфты находится на уровне целой трубы, а все концентраторы оказываются в зоне сжимающих напряжений. Необходимая толщина стенки муфты незначительно превышает толщину стенки трубы (пропорционально соотношению их внутренних диаметров), что обеспечивает минимизацию массы конструкции. Такая конструкция этой муфты полностью отвечает поставленной цели работы. Конический уча-

сток на кромках торовой части муфты обеспечивает установку муфты на участке трубы с большой овальностью. Путем сошлифовывания кромок конического участка можно добиться равномерного зазора по всему периметру стыка. При этом угол между стенками трубы и муфты по всему периметру кольцевого шва не изменяется, что исключает влияние овальности трубы на величину напряжений в шве.

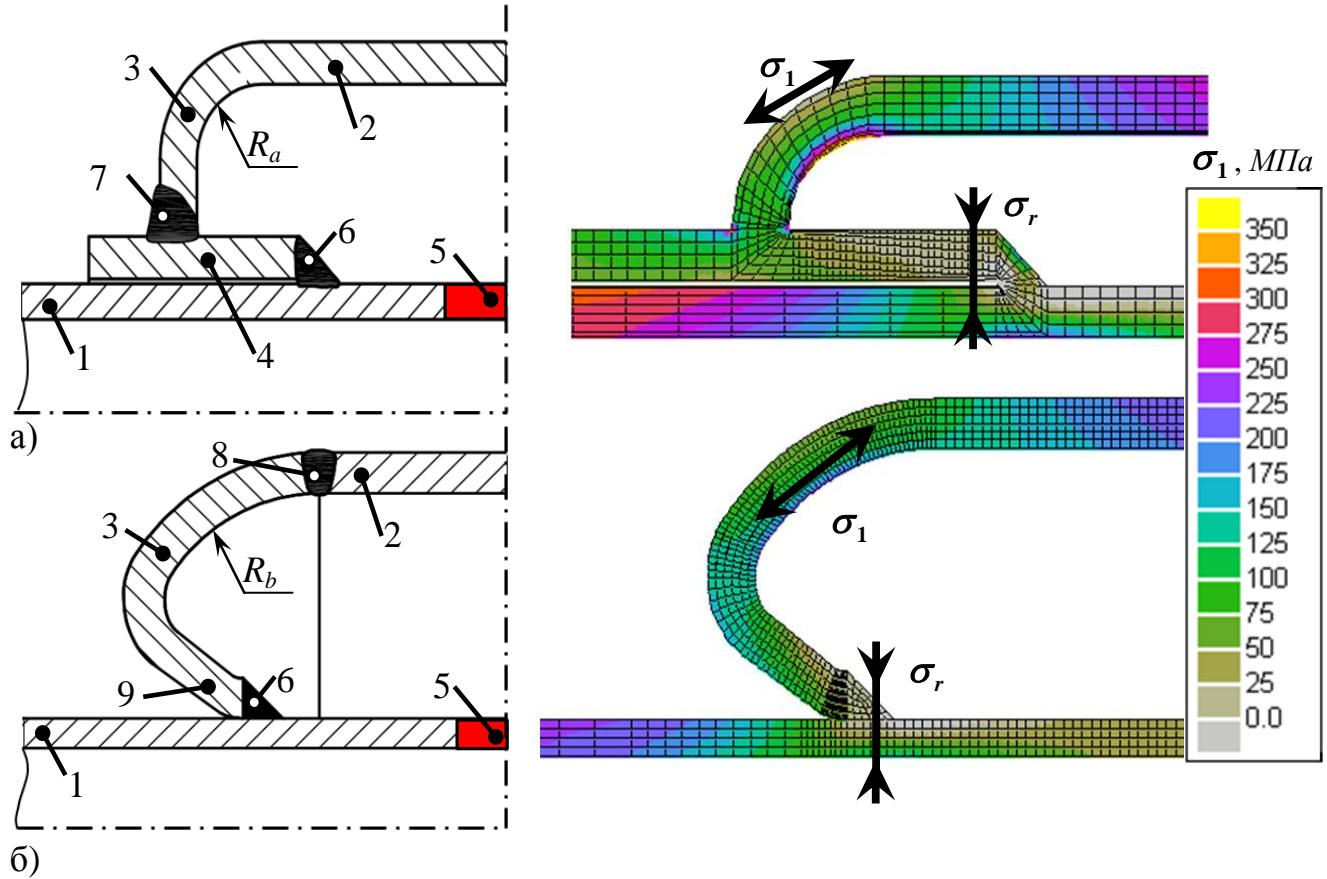


Рис. 13. Оформление сварного соединения муфты с трубой и распределение компоненты максимального растягивающего напряжения в прототипе (а) и новой конструкции муфты (б). 1 – труба; 2,3 – цилиндрическая и торовая часть муфты; 4 – подкладное кольцо; 5 – сквозной дефект; 6 - угловой шов; 7 - тавровое соединение; 8 –стыковой шов; 9 – конический участок

Монтаж муфты начинают с установки торовых частей и сварки каждой из них из двух половин стыковыми швами. Затем торовые части приваривают к трубе кольцевыми угловыми швами. Швы выполняют со стороны внутренней полости под муфтой. Доступ для выполнения швов обеспечивается благодаря большому размеру внутренней полости. Завершают монтаж сваркой продольных и кольцевых стыковых швов цилиндрических частей муфты. Размеры полости позволяют использовать её для ремонта сильно деформированной стенки трубы. На базе этой муфты возможна разработка конструкции долговечного разрезного тройника. В настоящее время завершается получение патента на новую ремонтную конструкцию.

Анализ технологии монтажа показал, что остаточные сварочные напряжения, вызванные поперечной усадкой замыкающего стыкового шва (соединяющего торовую и цилиндрическую части муфты) приводят к раскрытию угла  $\alpha$  (Рис. 14) и растяжению в корне углового кольцевого шва. Решение термомеханической задачи в ПК «Сварка» показало, что доминирующим фактором при выбранной форме

муфты является продольная усадка стыкового шва, снижающая величину угла  $\alpha$ . В результате корень шва после сварки находится в поле сжимающих напряжений.

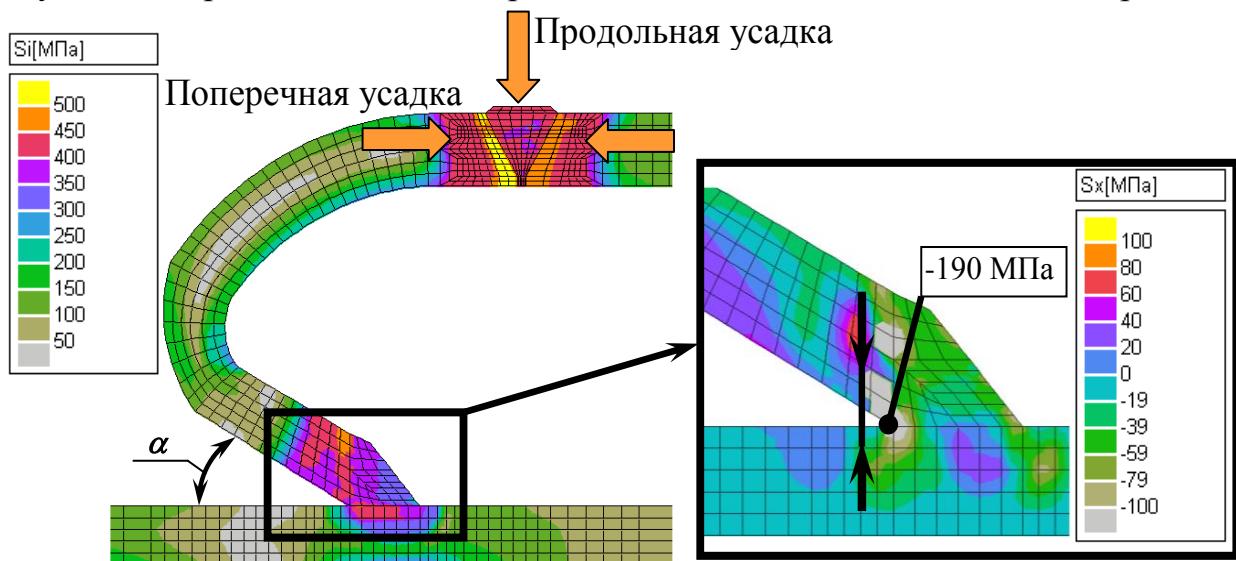


Рис. 14. Распределение эквивалентных напряжений в сварном соединении новой муфты с трубой под действием внутреннего давления и остаточных сварочных напряжений. Справа – увеличенный фрагмент сварного соединения и распределение в нем напряжений, действующих в радиальном направлении

Методика восстановления поврежденного участка предусматривает использование новой торо-цилиндрической конструкции муфты взамен гладкой цилиндрической. Для этого необходимо иметь набор таких муфт для различных типо-размеров труб. Параметры муфт подбираются на основе серии численных экспериментов.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ:

1. Анализ существующих ремонтных муфт показывает, что срок их службы состоит из двух этапов с существенным различием условий работы и требований к конструкции муфт:

- до потери герметичности поврежденной трубы муфта обеспечивает разгрузку поврежденной трубы, поэтому важен плотный контакт без зазора между трубой и муфтой;
- после образования сквозного дефекта в трубе лимитирующим фактором является долговечность сварного соединения муфты с трубой.

2. Разработанная методика восстановления ресурса участка нефтепровода сварными муфтами обеспечивает выявление причин ограниченной долговечности ремонтных конструкций и их целенаправленную доработку для обеспечения требуемого ресурса.

3. Установлено, что главной причиной разрушения кольцевого сварного шва ремонтной муфты является взаимный поворот стенок трубы и муфты, приводящий к дополнительному растяжению в корне шва.

4. На основе компьютерного моделирования разработана новая конструкция муфты, обеспечивающая долговечность сварных соединений на уровне неповрежденной трубы. Эффект достигается за счет замены нахлесточных замыкающих

сварных соединений на стыковые. На конструкцию муфты подана заявка на патент.

5. Установлено, что причиной пониженной долговечности сварного разрезного тройника является поперечная утяжка металла магистрали тройника в зоне высоких растягивающих кольцевых напряжений. Вследствие этого на участок кольцевого шва рядом с патрубком действует дополнительная поперечная растягивающая нагрузка. Определена рациональная конфигурация усиливающих накладок, снижающих эту нагрузку.

6. В результате моделирования технологического процесса монтажа разработанной муфты на поврежденный участок трубы установлено, что продольная усадка кольцевого шва, соединяющего торовую часть муфты с трубой, способствует образованию сжимающих напряжений в корне кольцевого углового шва и устраняет неблагоприятное воздействие поперечной усадки того же шва, что в результате повышает долговечность муфты.

7. Установлено, что приварка патрубка к трубе повышает долговечность разрезного тройника по сравнению с аналогичной гладкой муфтой за счет предотвращения попадания продукта в промежуток между трубой и муфтой. Ресурс разработанной конструкции тройника подтвержден натурными испытаниями.

8. По результатам проведенных исследований измененная конструкция разрезного тройника и технология ее монтажа внесены в действующий нормативный документ ПАО «Транснефть» РД-75.180.00-КТН-274-10 для нефтепровода Восточная Сибирь – Тихий океан.

### **Основное содержание диссертации отражено в публикациях:**

1. Королев С.А., Пономарев П.А. Существующие ремонтные конструкции для магистральных нефтепроводов высокого давления // Инженерный вестник. 2013. № 11. С.67-74. (0,50 п.л. / 0,30 п.л.)

2. Куркин А.С., Королев С.А., Пономарев П.А. Анализ причин ограниченного ресурса конструкций для ремонта нефтепровода // Сварка и диагностика. 2014. № 5. С.58–61. (0,75 п.л. / 0,30 п.л.)

3. Куркин А.С., Бровко В.В., Пономарев П.А. Особенности ремонтных конструкций и технологий их сварки при ремонте магистральных трубопроводов без замены трубы // Журнал нефтегазового строительства. 2015. №1. С.40-43. (0,5п.л. / 0,15 п.л.)

4. Влияние зазора между трубой и сварной муфтой на циклическую прочность кольцевого шва / П.А. Пономарев [и др.] // Сварка и диагностика. 2015. № 5. С.56–60. (0,94 п.л. / 0,35 п.л.)

5. Куркин А.С., Королев С.А., Пономарев П.А. Повышение ресурса сварных муфт на основе компьютерного моделирования // Наука и образование. Рег. № ФС 77-48211. 2015. №12. С.26-39. DOI: 10.7463/1215.0828471 (0,81п.л. / 0,35 п.л.)

6. Анализ работоспособности магистральных трубопроводов, отремонтированных с помощью разрезных муфт / П.А. Пономарев [и др.] // Территория нефтегаз. 2015. №8. С.32-36. (0,56 п.л. / 0,10 п.л.)

7. Куркин А.С., Пономарев П.А. Методы повышения ресурса ремонтных конструкций трубопроводов // Сварка и диагностика. 2016. №4. С.60-63. (0,56 п.л. / 0,35п.л.)