

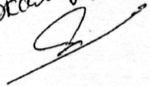
Джалъуд Фауаз

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА КОНСТРУКЦИИ И
ТЕХНОЛОГИИ ПРИВАРКИ ВСТАВОК (ЧОПОВ) ПРИ РЕМОНТЕ
НЕФТЕПРОВОДОВ**

05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Джалъуд Фауаз


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

Научный руководитель: **КУРКИН Алексей Сергеевич,**

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **СТЕКЛОВ Олег Иванович,**

доктор технических наук, профессор,

РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина

КОВЕХ Виктор Михайлович,

кандидат технических наук, в.н.с.

ОАО ГАЗПРОМ ВНИИГ аз

Ведущая организация: Научно-исследовательский и проектный
институт по строительству и эксплуатации
объектов топливно-энергетического комплекса
(НИПИСтройТЭК), г.Москва

Защита диссертации состоится « 22 » ноября 2012 г. в 14:30 часов
на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском
государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана

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

Телефон для справок (499) 267-09-63

Автореферат разослан « 14 » *сентября* 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.01,
доктор технических наук, доцент



НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



2011366

Джалъуд Ф. Разработка метод

А.В. Коновалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В России имеется и продолжает строиться огромная по протяженности сеть магистральных, промысловых и технологических нефтепроводов. По мере повышения рабочего давления и объемов перекачки нефти возрастает ущерб, причиняемый их повреждениями и разрушениями. Для минимизации этого ущерба необходима разработка технологий ремонта, уменьшающих утечки нефти и простои нефтепроводов. Ремонт нефтепроводов связан с особой опасностью, поскольку попадание воздуха через повреждение приводит к образованию внутри трубы взрывоопасной смеси паров нефти с воздухом.

Значительная часть повреждений носит локальный характер. Известная в России с давних лет ремонтная конструкция «чоп» (пробка) позволяет быстро прекратить течь, минимизировать объем, стоимость и сроки ремонта и обеспечить взрывобезопасность сварочных работ. Однако такой ремонт обычно рассматривают как временную меру, требующую срочного повторного ремонта другими средствами. Поэтому обоснование границ применимости чопов для ремонта ответственных нефтепроводов, а также оценка долговечности нефтепровода после ремонта и разработка нормативной документации по использованию чопов как средства капитального ремонта актуально для нефтехимической отрасли России.

Цель работы: обеспечение надежности магистральных нефтепроводов после ремонта локальных повреждений на основе выбора рациональных параметров ремонтных конструкций и технологии ремонта.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи:**

1. Провести анализ работоспособности различных типов чопов и выбрать наиболее перспективные варианты их конструкции для дальнейшего исследования.
2. Разработать компьютерные модели и методику моделирования процессов, протекающих при ремонте нефтепроводов методом установки чопов и при эксплуатации отремонтированных нефтепроводов.
3. Исследовать физические закономерности, определяющие качество и ресурс нефтепроводов после ремонта.
4. Провести численные эксперименты с целью определения рациональной области применения чопов, выбора их конструкции, размеров и технологии ремонта.
5. Проверить работоспособность разработанных на основе расчетов конструкций чопов путем натурных испытаний.
6. Применить полученные результаты при разработке отраслевых нормативных документов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применялись экспериментальные и теоретические методы исследований: механические испытания лабораторных и натурных образцов, металлографический анализ макроструктуры шлифов, фрактографический анализ, компьютерное моделирование совокупности физических процессов.

И. Г. Т. У.
И. И. Ф. Б. Ш. И. А.
Б. Ш. И. И. И. А.

ремонте трубопровода и последующей эксплуатации отремонтированного участка с использованием программного комплекса «СВАРКА».

Научная новизна. На основе физико-математического моделирования установлены закономерности, определяющие прочность и ресурс труб, отремонтированных чопами:

1. При увеличении диаметра ремонтируемого отверстия коэффициент интенсивности напряжения в корне сварного шва обварки чопа растет по линейному закону, что приводит к резкому ускорению роста трещин и снижению долговечности после ремонта. Причиной этого является податливость сечения шва, ослабленного непроваром. В результате радиальное перемещение краев отверстия от внутреннего давления концентрируется между краями шва. Это ограничивает максимальный диаметр отверстий, ремонтируемых чопами без головки.

2. Податливость краев головки чопы снижает концентрацию перемещений и уменьшает нагрузку на шов. Это является главной причиной повышенной прочности и долговечности чопов с головкой. Второй причиной является благоприятная ориентация непровара в корне шва (вдоль силового потока, по схеме сдвига, а не отрыва). Такие чопы могут быть применены для ремонта отверстий диаметром до 40 мм.

3. Толщина стенки трубы не оказывает существенного влияния на долговечность после ремонта чопами, это позволяет применять чопы для ремонта труб высокого давления с большой толщиной стенки.

Практическая значимость работы

1. Разработана методика выбора конструкции и технологии приварки чопов на основе физико-математического моделирования комплекса процессов, протекающих в металле при ремонте и последующей эксплуатации участка нефтепровода.

2. Определены и включены в нормативный документ ОАО «АК Транснефть» соотношения размеров двух конструкций чопов, обеспечивающие необходимую долговечность.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждены на IV Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2011), а так же на научном семинаре кафедры технологий сварки и диагностики МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 4 печатных работы, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы. Диссертация написана на 144 стр., и содержит 94 рисунка, 6 таблиц и список литературы из 79 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ современного состояния магистральных трубопроводов, выделены причины, влияющие на надежность их эксплуатации, определены возможные пути продления срока их службы. магистральных трубопроводов, приведен анализ оценки надежности и ресурса сварных магистральных трубопроводов. Рассмотрены основные виды дефектов, возникающих в трубопроводе в процессе изготовления труб, монтажа и эксплуатации и возможности различных средств контроля по их выявлению и определению их размеров и расположения. Большинство разрушений и повреждений современных магистральных трубопроводов носит локальный характер. Тем не менее, они приводят к большим материальным потерям, ущербу для экологии и создают опасность для жизни и здоровья людей. Эта опасность возрастает по мере повышения рабочего давления и прокладки новых трубопроводов в сложных условиях и труднодоступной местности.

Одним из перспективных направлений снижения потерь от локальных повреждений трубопроводов является разработка оперативных средств ремонта, минимизирующих утечки, сроки и стоимость ремонтных работ. В диссертации проанализированы существующие ремонтные конструкции, технологии их установки при ремонте и методы их выбора в зависимости от характера и геометрических параметров дефектов. В затратах на ремонт стоимость самих сборочно-сварочных работ и материалов составляет обычно небольшую часть. Основные расходы связаны с прекращением работы трубопровода, а также с подготовительными работами обеспечению доступа к трубе и удалению из ремонтируемого участка перекачиваемого продукта. При локальном сквозном повреждении вырезка и замена поврежденного участка является чрезмерно дорогим и длительным способом ремонта.

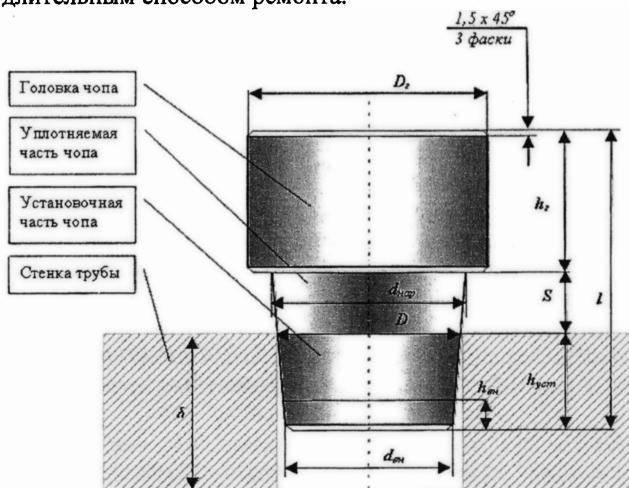


Рис.1. Эскиз ремонтной конструкции «чоп»

Разработанная в России ремонтная конструкция «чоп» (рис.1) обеспечивает максимальную среди известных аналогичных конструкций оперативность остановки обнаруженной течи и взрывобезопасность ремонтных работ. Она наиболее актуальна для нефтепроводов, внутри которых при сквозном повреждении попадающий в трубу воздух образует с парами нефти взрывоопасную смесь. Проанализированы типы применяемых чопов и диапазон ремонтируемых ими повреждений. Чопы не используются за рубежом, их применение рассмотрено только в трудах российских ученых (Хромченко Ф.А., Зандберга А.С., Теревкова Н.В.). Объем проведенных исследований условий работы чопов в трубе остается недостаточным для их широкого применения при капитальном ремонте нефтепроводов, вследствие этого их обычно применяют только для срочной остановки течи с последующей заменой другими ремонтными конструкциями. Для выбора наиболее рациональных формы и размеров ремонтной конструкции, разработки технологии ремонта, обоснования прочности и долговечности отремонтированного участка трубопровода необходимо проведение комплексного расчетно-экспериментального исследования с учетом всех факторов, влияющих на его качество и условия эксплуатации.

Далее рассмотрены методы оценки прочности и ресурса магистральных трубопроводов, применяемые в России и за рубежом и возможности их использования для выбора и обоснования надежности методов ремонта трубопроводов. В этой области имеется большое количество публикаций российских и зарубежных ученых (Махутова Н.А., Хажинского Г.М., Стеклова О.И., Махненко В.И., Barsoum Z., Sabapathy P.N., Jiang Wei., Dong P., Bang I.-W.). Показано, что сложность формы сварных соединений чопов, наличие конструктивного непровара в корне шва, сложный характер взаимодействия сварочных и эксплуатационных напряжений не позволяют ограничиться использовать для них простые инженерные методы расчета, а также аппарат линейной механики разрушения. Для решения таких задач необходимо компьютерное моделирование протекающих физических процессов численными методами.

Моделирование условий эксплуатации участка трубопровода после ремонта позволяет выбрать наилучшие значения варьируемых параметров ремонтных конструкций в зависимости от вида повреждения трубопровода. Моделирование технологического процесса ремонта, в особенности сборочно-сварочных операций, позволяет выбрать параметры режимов сварки, обеспечивающих свариваемость, т. е. отсутствие дефектов в сварном соединении и получение необходимых свойств металла шва и околошовной зоны.

Анализ средств моделирования показал, что наиболее универсальным является метод конечных элементов. Необходимо использование специализированного программного обеспечения для сварочных задач, поскольку универсальные программы не обеспечивают моделирования всего необходимого комплекса факторов.

Проведенный обзор литературы позволил сформулировать цель и определить основные задачи исследований.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям работоспособности различных конструкций чопов. На основе анализа нормативной документации были отобраны 6 основных типов применяемых на практике чопов, различающихся по размеру, способу установки в трубу (забивка или ввинчивание по резьбе) и по конфигурации сварного соединения (стыкового с разделкой кромок или нахлесточного с угловым швом). На их основе были спроектированы и изготовлены лабораторные образцы-имитаторы для получения экспериментальных данных по прочности и долговечности чопов (рис. 2).

Для изготовления образцов была использована труба диаметром 1220 мм с толщиной стенки 27 мм из стали класса прочности К60. Ручную дуговую сварку проводили электродами марок LB-52U и ОК 53.70 диаметром 3,2 мм с покрытием основного типа, сварочным током 90 – 120 А.

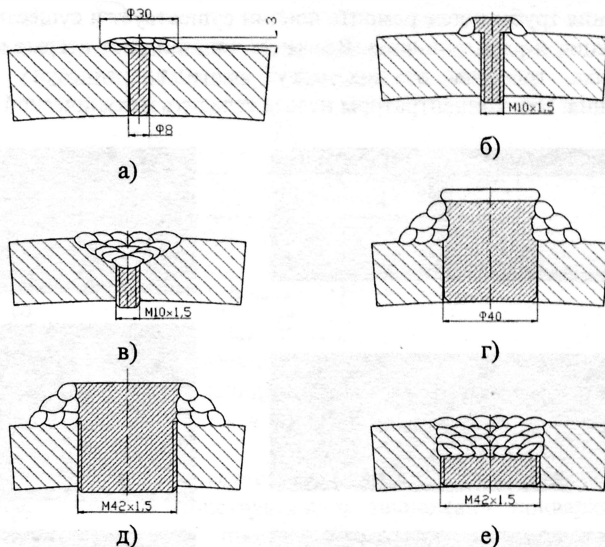


Рис. 2. Поперечные сечения лабораторных образцов с чопами 6 типов:

а, г – гладких для забивки, б, в, д, е – резьбовых; а, б, в – для диаметра отверстия 8 мм, г, д, е – для диаметра 40 мм; а, в, е – без головки, б, г, д – с головкой, в, е – с глубокой разделкой под сварку

Циклические испытания образцов на одноосное растяжение проводили на разрывной машине фирмы Schenck (Германия) с нагрузкой до 1000 кН. Согласно отраслевым нормативным документам, среднее число пульсирующих циклов нагружения (с полным сбросом давления) за 30 лет службы

нефтепровода составляет 10000. Результаты экспериментов подтвердили возможность использования чопов для капитального ремонта локальных дефектов в нефтепроводах, поскольку все образцы прошли испытания под нагрузкой, соответствующей условиям нагружения отремонтированной трубы рабочим внутренним давлением с числом циклов 30000, при этом случаев полного разрушения образца не было.

Оценка прочности выполнена по наличию и длине усталостных трещин. Макрошлифы испытанных образцов и размеры трещин приведены на рис. 3. Наибольшего размера достигли трещины в образце на рис. 3,е: одна из двух трещин проросла насквозь. При сопоставлении размеров трещин в чопках разных типов установлено, что их рост слабо зависит от способа установки чопка (забивки или ввинчивания) при одинаковых размерах. В то же время выявлена зависимость скорости роста трещин от диаметра ремонтируемого отверстия (ускорение роста трещин при увеличении диаметра) и расположения вершины исходного непровара (рост трещины наибольший, когда концентратор расположен в середине толщины стенки трубы). Таким образом, опасность разрушения трубы после ремонта чопками существует и существенно зависит от конструкции и размеров чопка. Все типы чопов имеют острые концентраторы в корне шва, трещины от них могут расти практически первых циклов нагружения. Эти концентраторы нельзя сгладить механической обработкой.

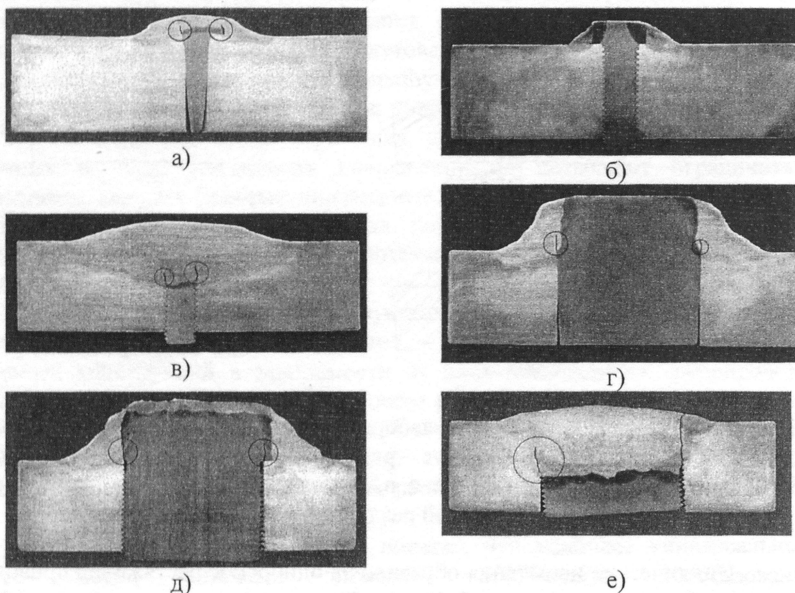


Рис. 3. Макрошлифы лабораторных образцов с чопками после испытаний: а) трещины длиной 0,5 и 0,8 мм; б) трещин нет; в) трещины длиной 0,8 и 1,2 мм; г) трещины длиной 4,1 и 2,2 мм; д) трещины длиной 4,2 и 4,4 мм; е) трещины длиной 8,1 и 15 мм (сквозная)

Тем не менее, применение чопов для капитального ремонта с длительной последующей эксплуатацией, а также расширение области применения чопов на нефтепроводы с большими диаметрами и толщиной стенки, и увеличение диаметра ремонтируемых отверстий представляются возможными, поскольку размеры выявленных трещин позволяют предположить, что их рост начался в большинстве образцов уже после 10000 циклов нагружения.

По результатам экспериментальных исследований выделены 2 наиболее перспективные конструкции чопов, которые должны обеспечить требуемый ресурс, с разделкой (рис. 4) и с головкой (рис. 5).

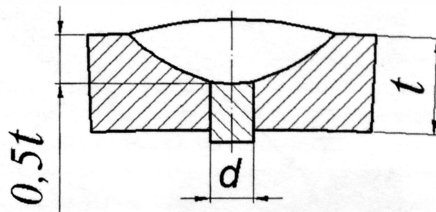


Рис. 4. Геометрические параметры чопов с разделкой:
 d - диаметр отверстия; t - толщина стенки трубы

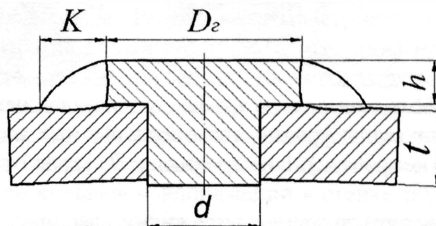


Рис. 5. Геометрические параметры чопов с головкой:
 d - диаметр отверстия; t - толщина стенки трубы; D_2 - диаметр головки;
 h - высота головки; K - катет шва

Обоснование прочности и ресурса выбранных конструкций, определение их рациональных размеров конструкции и технологии приварки требует компьютерного моделирования процесса приварки и экспериментальной проверки разработанных конструкций на натурных образцах труб с установленными чопами.

В третьей главе была разработана методика компьютерного моделирования участка нефтепровода с установленным чопом для оценки вероятности образования и роста трещин от концентратора. Моделирование было проведено методом конечных элементов с помощью программного комплекса «Сварка», разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Трехмерная модель включает чоп и часть отремонтированной трубы. При построении модели были учтены условия симметрии. В зонах ожидаемой концентрации напряжений было создано дополнительное сгущение сетки. Нагрузка задавалась на

внутренней поверхности трубы (давление) и на торце трубы (растяжение или сжатие) (Рис. 6).

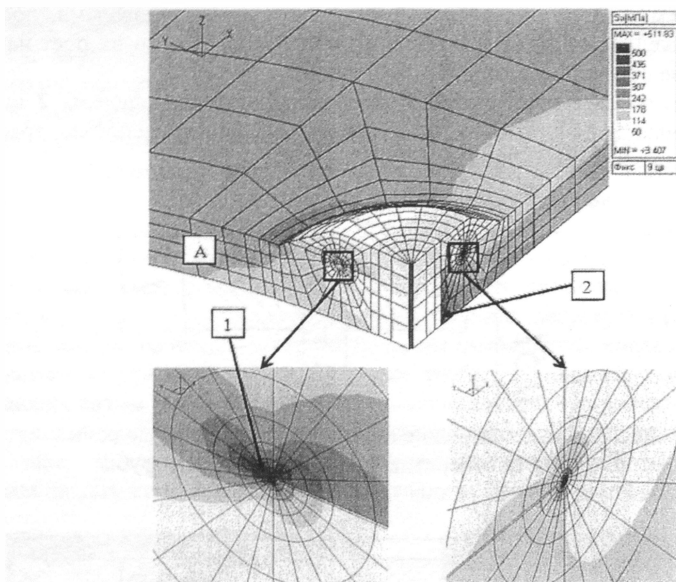


Рис. 6. Трехмерная модель трубы с установленным чопом (в увеличенном масштабе показаны фрагменты сетки конечных элементов у вершины непровара): 1 – корень шва. 2 – край отверстия

Моделирование выявило, от каких именно зон возможно начало усталостного разрушения. Напряжение в них превышает предел текучести. Первая зона – корень шва. Вторая зона – край отверстия у внутренней поверхности трубы.

Для консервативной оценки циклической долговечности может быть использована более простая двумерная (2D) осесимметричная модель (рис. 7), все сечения которой имеют распределения напряжений, аналогичные сечению по точке А трехмерной (3D) модели (см. рис. 6).

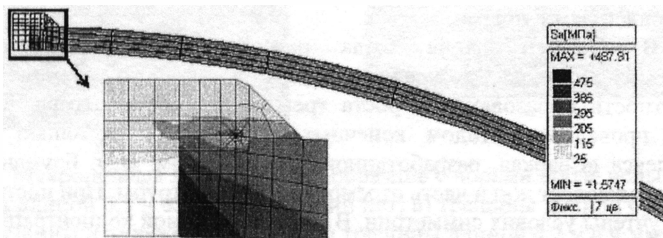


Рис. 7. Осесимметричная конечно-элементная модель

Это обеспечивает повышение оперативности расчетов и возможность анализа большого количества вариантов за счет сокращения вычислительных затрат и трудоемкости построения модели.

Сопоставление значений коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в вершине непровара в двух моделях показало, что двумерная модель обеспечивает консервативную оценку циклической долговечности, если диаметр оболочки в модели в несколько раз превышает диаметр реальной трубы. Все остальные размеры и давление задаются натуральной величины.

Эта работа была проведена для двух различных конструкций чопов. Было установлено, что для чопов с заваренной разделкой необходимо увеличивать диаметр оболочки в 2,75 раза, а для чопов с головкой в 2,5 раза.

Первой задачей, решенной с помощью разработанной модели, был выбор параметров технологии установки чопов. Испытания показали, что способ установки не оказывает существенного влияния на долговечность чопа. Из двух способов более технологичной оказалась забивка чопа.

Если чоп забит с натягом, то течь между чопом и стенкой отверстия возникнет тогда, когда радиальное перемещение края отверстия от подачи давления превысит упругую составляющую перемещения, возникшего при забивке чопа. Для рассмотренной модели отсутствие течи в процессе ремонта будет обеспечено, если натяг (разность диаметров чопа и отверстия, в которое его забивают) превысит 20 мкм. Расчет показывает, что при таком натяге напряжение на краю отверстия от забивки существенно ниже предела текучести трубной стали, поэтому весь натяг при забивке является упругим.

Проведенные численные эксперименты для стали К60 показали, что пластическая деформация краев отверстия начинается при натяге менее 100 мкм, а при натяге свыше 1,3 мм рост напряжения прекращается. В этом случае течь возможна только при кольцевом напряжении в стенке трубы 600 МПа, то есть при давлении, превышающем рабочее давление в нефтепроводе.

Таким образом, забитый и не приваренный чоп в принципе способен выдержать рабочее давление без нарушения герметичности. Однако при этом на края отверстия ложится двойная нагрузка (от внутреннего давления и забивки чопа). Металл трубы у края отверстия работает в условиях малоциклового усталости, и при сравнительно небольшом числе циклов возможно возникновение трещины в основном металле трубы, ориентированной вдоль ее продольной оси. Поэтому прочность и ресурс нефтепровода могут быть обеспечены только за счет рациональной конструкции сварного соединения чопа с трубой. Для разработки таких конструкций были проведены численные эксперименты на разработанных компьютерных моделях. Результаты представлены в виде ожидаемого роста усталостных трещин от вершины непровара за 1000 циклов нагружения, рассчитанного для стали К60 по уравнению Пэриса.

Рассмотрим вначале чопы без головки или с диаметром головки, близким к диаметру ремонтируемого отверстия (см. рис. 4). Непровар в них ориентирован в направлении толщины стенки и концентратор напряжения работает по схеме нормального отрыва. Расчеты показали, что такое расположение концентратора

вызывает быстрый рост трещин. Выявлено также нарастание скорости роста трещин при увеличении диаметра чопа. Рост дополнительно ускоряется при приближении трещины к наружной поверхности. Именно на таких образцах трещины проросли насквозь. Такие чопы опасно применять для диаметра более 20 мм. При меньшем диаметре их можно применять, но нужно обеспечивать глубокое проплавление или наплавку для компенсации роста трещин. Зависимость роста трещин от толщины стенки трубы незначительная, главный фактор – диаметр чопа. Следовательно, возможно распространение действия имеющихся нормативных документов по ремонту с применением чопов на трубы с большей толщиной стенки.

Недостатком чопа второго типа (см. рис. 5) является то, что его головка выступает над поверхностью трубы и затрудняет ее гидроизоляцию. Размер непровара у этого чопа больше толщины трубы, поэтому его долговечность вызвала большие сомнения. Однако моделирование показало, что благоприятное расположение концентратора – вдоль поверхности трубы – компенсирует все эти недостатки и делает эту конструкцию чопа наиболее перспективной.

Скорость роста трещины в этой конструкции зависит от диаметра и высоты головки, причем возможен подбор такого соотношения размеров, при котором рост трещины практически отсутствует. Чоп с головкой обеспечивает существенно более высокую циклическую долговечность, чем с разделкой (рис. 8). Сопоставление зависимости КИН в концентраторе напряжения от диаметра отверстия для двух типов чопов показывает, что при равных диаметрах значение КИН для чопов с головкой существенно ниже, что позволяет ремонтировать такими чопами отверстия в 4 раза большего диаметра.

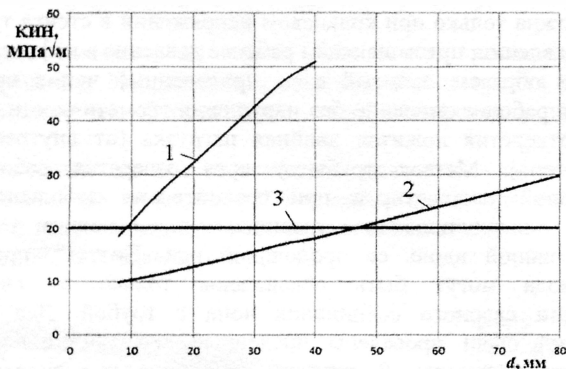


Рис. 8. Сопоставление КИН в чопках с разделкой (1) и с головкой (2).
При $K_I < 20 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ рост трещины не превышает 1 мм (3)

Наиболее существенным фактором, влияющим на долговечность чопов, является диаметр отверстия. При его увеличении коэффициент интенсивности напряжения в корне сварного шва обварки чопа растет по линейному закону,

что приводит к резкому ускорению роста трещин и снижению долговечности. Причиной этого является податливость сечения шва, ослабленного непроваром. В результате радиальное перемещение краев отверстия от внутреннего давления концентрируется между краями шва. Это ограничивает максимальный диаметр отверстий, ремонтируемых чопами без головки.

Податливость краев головки чопы снижает концентрацию перемещений и уменьшает нагрузку на шов. Это является главной причиной повышенной прочности и долговечности чопов с головкой. Второй причиной является благоприятная ориентация непровара в корне шва (вдоль силового потока, по схеме сдвига, а не отрыва).

Моделирование напряженного состояния с учетом роста трещины от исходного концентратора показало, что в чопы с разделкой КИН по мере роста трещины практически не изменяется, то есть трещина растет с постоянной скоростью. В чопы с головкой по мере роста трещины КИН увеличивается, поэтому возможно ускорение роста. В связи с этим необходимо выбирать такие размеры чопов этой конструкции, при которых трещина не вырастет более чем на 1 мм. На рис. 8 видно, что условие роста трещины менее 1 мм для чопы с головкой выполняется при диаметре отверстия до 48 мм, а для чопы с разделкой – только при диаметре менее 10 мм.

Четвертая глава. В процессе приварки чопов возникают существенные технологические (сварочные) напряжения. Хотя эти напряжения не создают циклической нагрузки, они могут изменить асимметрию циклов от внутреннего давления в трубе и повлиять на долговечность. Для анализа этого фактора было проведено компьютерное моделирование процесса приварки чопы.

На рис. 9 показаны изотермы максимальных температур, достигнутых в процессе сварки. Результаты расчета согласуются с границами шва, выявленными при травлении маркошлифа.

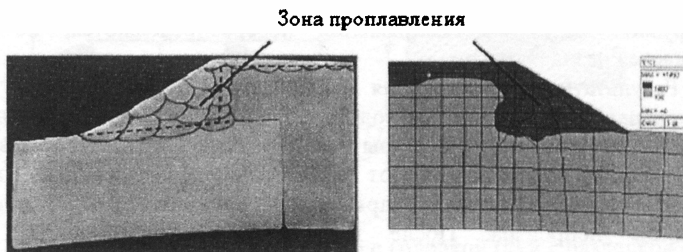


Рис. 9. Сопоставление расчетной (справа) и экспериментальной (слева) форма проплавления при обварке головки чопы

Для моделирования деформационных процессов необходимы зависимости от температуры механических характеристик материала (предела текучести, модуля упругости при сдвиге, объемного модуля упругости), а также свободной температурно-структурной деформации. Принята модель идеального упруго-пластического материала (без учета упрочнения и ползучести). Наибольший

интерес представляют зоны с высокими растягивающими напряжениями, так как именно они могут стать причиной роста усталостной трещины.

Напряжения нарастают по мере укладки валиков шва и в точке у корня шва существенно превышают предел текучести. Такие высокие остаточные сварочные напряжения могут существенно повлиять на ресурс отремонтированного трубопровода.

При работе конструкции остаточные напряжения взаимодействуют с напряжениями от рабочих нагрузок. На рисунке 10 X – расстояние от корня шва.

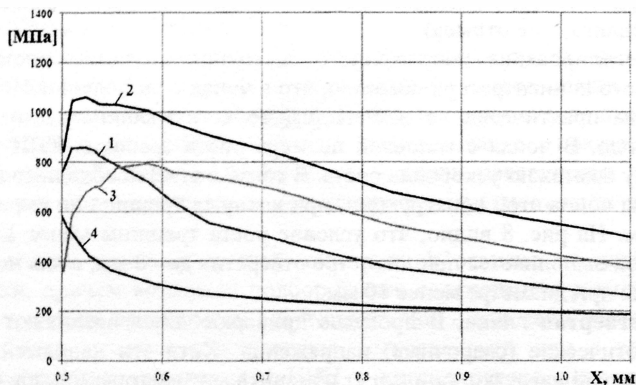


Рис. 10. Эпюры напряжений в минимальном сечении шва (см. рис. 9):

- 1 - после приварки чопа, 2 – после приложения рабочего давления, 3 - после разгрузки; 4 - от рабочего давления без учета остаточных напряжений

Остаточные напряжения резко повышают суммарные напряжения у вершины непровара (с 600 до 1050 МПа). После первого нагружения и разгрузки остаточные напряжения перераспределяются, но их уровень снижается незначительно.

Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния у концентратора для чопы без головки, с разделкой представлены на рис. 11. Наибольшие отличия заметны в характере взаимодействия сварочных напряжений с напряжениями от рабочего давления. Сравнение кривых 2 и 4 показывает, что остаточные напряжения не изменяют суммарных напряжений у вершины непровара. После первого нагружения уровень остаточных напряжений существенно снижается. Можно предположить, что для остаточные сварочные напряжения не оказывают существенного влияния на прочность и ресурс сварного соединения чопы с разделкой.

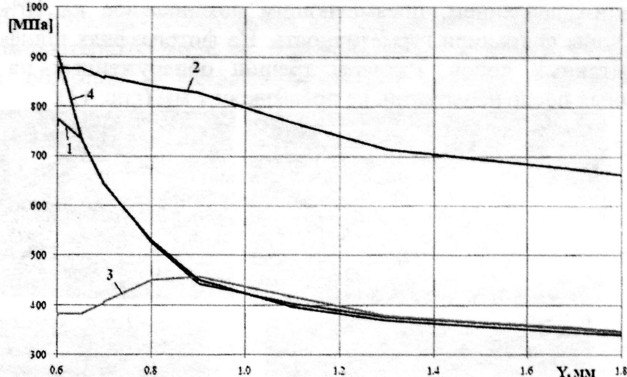


Рис. 11. Эпюры напряжений в сечении шва чопы с разделкой:
1 - после приварки чопы, 2 – после приложения рабочего давления, 3 - после разгрузки; 4 - от рабочего давления без учета остаточных напряжений

Сопоставление уровней максимальных напряжений для разных типов чопов показывает, то у чопы с головкой напряжения выше, но распределены более благоприятно (у самого корня шва напряжения несколько ниже). Размах напряжений от приложения нагрузки у чопы с головкой существенно ниже, что подтверждает сделанный вывод о перспективности этой конструкции и возможности ее распространения на ремонт отверстий большого диаметра.

Таким образом, на основе математического моделирования предложены конструкции чопов «с головкой» и «с разделкой», которые должны обеспечить требуемый ресурс (рис. 12).

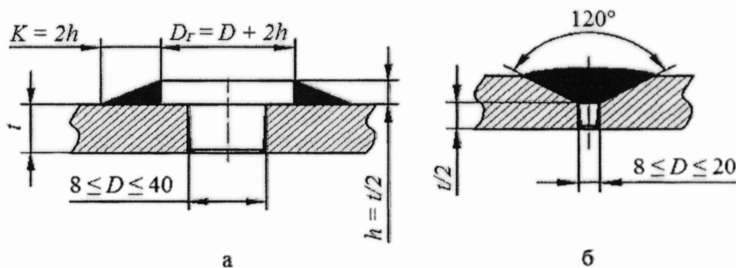


Рис. 12. Соотношения размеров для чопов с головкой (а) и с разделкой (б):
 D - диаметр ремонтируемого отверстия, t – толщина стенки трубы

Для испытания рекомендуемых конструкций чопов были изготовлены 2 натуральных образца с диаметром трубы 1220 мм и толщиной стенки 27 мм. Длина образцов составляла около 3 метров. На одном из образцов 5 отверстий диаметром 40 мм были отремонтированы чопами с головкой. На втором образце 5 отверстий диаметром 12 мм были отремонтированы чопами с разделкой. Образцы были испытаны на стенде ОАО «ЦТД Диаскан»

внутренним давлением, превышающим номинальное на 10%. После 10000 циклов чопы сохранили герметичность. На фотографиях шлифов, вырезанных из испытанных чопов. Размеры трещин обнаруженных на макрошлифах, вырезанных после испытаний, не превышали 1 мм (рис. 13).

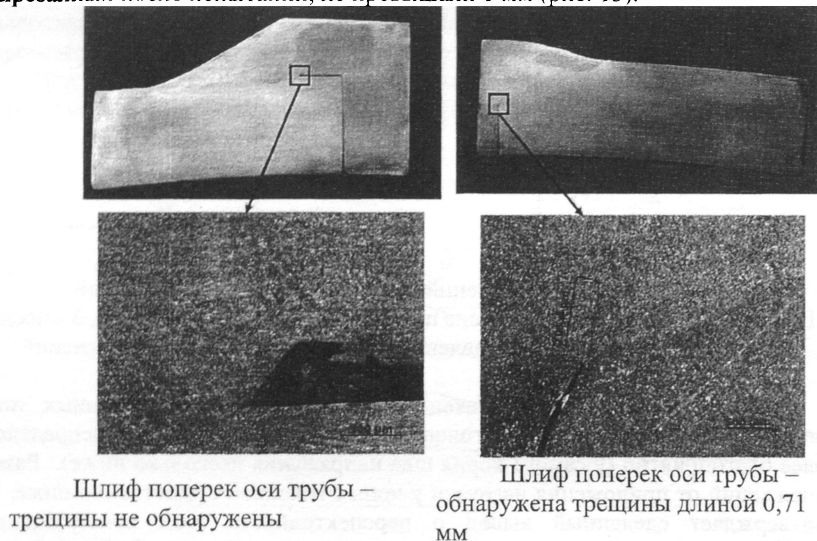


Рис. 13. Фотографии шлифов, вырезанных из испытанных чопов с головки и с разделкой

Следовательно, долговечность конструкции чопы с головкой выше запланированной, поэтому возможно дальнейшее расширение области применения таких чопов на большие диаметры и толщины.

Успешное завершение испытаний явилось основанием для включения разработанных конструкций чопов в нормативный документ ОАО «АК Транснефть», расширяющий область применения чопов на диаметры отверстий до 40 мм при толщине стенки труб из стали К60 до 29 мм.

В диссертации разработана методика проектирования и обоснования рациональных конструкций чопов на основе компьютерного моделирования процессов, протекающих при сварке чопов и эксплуатации трубопроводов после ремонта. Она позволяет оценить влияние типа и размеров чопы на ресурс трубопровода и обосновать расширение области применения ремонта чопами. Однако разработанная методика может быть применена для решения и других аналогичных задач. Методика включает следующие этапы:

1. Предварительный компьютерный анализ изучаемого объекта с целью обоснования упрощения компьютерных моделей, а также разработки простых экспериментальных образцов (применительно к чопам - анализ условий применимости осесимметричных моделей взамен объемных и лабораторные образцы для испытаний на одноосное растяжение).

2. Экспериментальные исследования для определения свойств материала и коррекции компьютерных моделей (применительно к чопам - испытания лабораторных образцов и металлографические исследования испытанных образцов).

3. Численные эксперименты на компьютерных моделях для выбора и теоретического обоснования рациональных параметров ремонтных конструкций и технологии ремонта (применительно к чопам - выбор типов и размеров чопов, выбор способа и технологии сборки под сварку, оценка остаточных сварочных напряжений и условий их взаимодействия с рабочими нагрузками, определение границ применимости различных типов чопов по критериям долговечности).

4. Экспериментальная проверка рекомендуемых конструктивно - технологических решений (применительно к чопам - испытания натурных образцов и металлографические исследования испытанных образцов).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Перспективным направлением снижения потерь от локальных повреждений трубопроводов является разработка оперативных средств ремонта, минимизирующих утечки, сроки и стоимость ремонтных работ. Разработанная в России ремонтная конструкция «чоп» обеспечивает максимальную среди аналогичных конструкций оперативность остановки обнаруженной течи и безопасность ремонтных работ.

2. Наиболее рациональным способом установки чопа является забивка с минимально возможным натягом, но не менее 0,2% от диаметра отверстия. Увеличение натяга свыше 1% от диаметра отверстия затрудняет забивку чопа и может привести к снижению долговечности отремонтированного участка нефтепровода.

3. На основе математического моделирования установлены следующие закономерности, определяющие прочность и ресурс труб отремонтированных чопами:

3.1. При увеличении диаметра ремонтируемого отверстия коэффициент интенсивности напряжения в корне сварного шва обварки чопа растет по линейному закону, что приводит к резкому ускорению роста трещин и снижению долговечности после ремонта. Причиной этого является податливость сечения шва, ослабленного непроваром. В результате радиальное перемещение краев отверстия от внутреннего давления концентрируется между краями шва. Это ограничивает максимальный диаметр отверстий, ремонтируемых чопами без головки.

3.2. Податливость краев головки чопы снижает концентрацию перемещений и уменьшает нагрузку на шов. Это является главной причиной повышенной прочности и долговечности чопов с головкой. Второй причиной является благоприятная ориентация непровара в корне шва (вдоль силового потока, по схеме сдвига, а не отрыва). Такие чопы могут быть применены для ремонта отверстий диаметром до 40 мм.

3.3. Толщина стенки трубы не оказывает существенного влияния на долговечность после ремонта чопами, это позволяет применять чопы для ремонта труб высокого давления с большой толщиной стенки.

4. Конструкция чопа с головкой обеспечивает полное восстановление работоспособности поврежденного участка трубопровода для отверстий диаметром до 40 мм при условии правильного выбора ее размеров:

4.1. Толщина краев головки должна составлять половину от толщины стенки трубы.

4.2. Ширина краев головки должна быть равна толщине. При уменьшении ширины снижается податливость головки, а при увеличении растут радиальные перемещения трубы под швом.

4.3. Технология сварки должна обеспечивать плавный переход от шва к поверхности трубы, а также отсутствие технологических дефектов у корня шва.

5. По результатам моделирования и натурных испытаний были определены соотношения размеров двух конструкций чопов, обеспечивающие необходимую долговечность. Разработанные конструкции вошли в нормативный документ ОАО «АК Транснефть», расширяющий область применения чопов.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Разработка конструкций чопов для ремонта магистральных нефтепроводов на основе компьютерного моделирования / А.С.Куркин [и др.] // Сварка и диагностика.- 2011.- № 1.- С. 45 - 50.

2. Результаты экспериментального подтверждения расчетной циклической прочности и ресурса конструкций чопов для ремонта магистральных нефтепроводов / А.С.Куркин [и др.] // Сварка и диагностика.- 2011.- № 2.- С. 33 - 36.

3. Джальуд Фауаз. Влияние остаточных сварочных напряжений на прочность и ресурс конструкций чопов для ремонта магистральных нефтепроводов // Сварка и диагностика.- 2012.- № 2.- С. 30 - 33.

4. Джальуд Фауаз. Влияние остаточных сварочных напряжений на прочность и ресурс конструкций чопов для ремонта магистральных нефтепроводов // Будущее машиностроения России: Сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов.- М., 2011.- С. 128.