

На правах рукописи

МУФТАХОВ МИННАСЫР ХАЙДАРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ДЕФЕКТОМ
ТИПА ЛИКВАЦИОННОЙ ПОЛОСЫ**

Специальность 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность»
(нефтегазовая отрасль)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа 2006

Работа выполнена в ЗАО «ЯмалГазИнвест» и Уфимском государственном нефтяном техническом университете.

Научный руководитель доктор технических наук
Закирничная Марина Михайловна.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Халимов Андалис Гарифович;

доктор технических наук
Султанов Марат Хатмуллинвич.

Ведущая организация МОП «Центр безопасной эксплуатации
сложных технических систем», г. Уфа.

Защита состоится 8 декабря 2006 года в 14-00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.289.05 при Уфимском государственном нефтяном техническом университете по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Автореферат разослан « » ноября 2006 года

Ученый секретарь
совета

Закирничная М.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из наиболее важных задач трубопроводного транспорта углеводородов является обеспечение его надежной и безопасной работы путем сокращения риска возникновения аварийных ситуаций. Ее решение позволит снизить безвозвратные потери транспортируемых продуктов, улучшить экологическую обстановку, предотвратить разрушение инженерных сооружений и обеспечить, таким образом, оптимальное функционирование трубопроводных систем.

Актуальность данной проблемы связана с высокой частотой отказов магистральных трубопроводов, приводящих в ряде случаев к катастрофическим последствиям. Более 30 % отказов происходят на трубопроводах, проработавших более 20 лет, что связано с ухудшением их технического состояния. При этом кроме традиционных дефектов сварных соединений, рисок, вмятин, задиров имеют место и металлургические дефекты, например, в виде расслоения металла трубы. Как показывает анализ результатов внутритрубной диагностики, количество расслоений составляет примерно 20 % от общего числа выявленных опасных дефектов. В зонах расслоения наблюдаются раскатанные загрязнения, характерные для трубных кремнемарганцовистых сталей, являющиеся дефектом металлургического производства.

Эти участки имеют большую химическую неоднородность, загрязнены примесями (оксиды, нитриды, сульфиды, силициды), то есть являются ликвационными зонами, отличающимися по значениям характеристик механических свойств от основного металла трубы.

Известно, что металл труб магистральных трубопроводов работает в условиях циклического нагружения от изменения внутреннего давления перекачиваемого продукта. Поэтому оставленные без "внимания" неметаллические включения, обладающие повышенной твердостью и хрупкостью и, следовательно, являющиеся концентраторами напряжений, могут стать источниками зарождения усталостных трещин и привести к аварийным разрушениям трубопроводов.

Цель работы: изучить степень влияния ликвационной полосы на срок безопасной эксплуатации трубопроводов из стали 17Г1С.

Основные задачи исследований:

1 Получить распределение основных химических элементов по сечению стенки трубы из стали марки 17Г1С с ликвационной полосой.

2 Изучить закономерности изменения механических свойств металла в зоне ликвационной полосы при статическом и малоцикловом условиях нагружения.

3 Определить напряженно-деформированное состояние металла трубы в зоне ликвационной полосы.

4 Разработать методику определения срока безопасной эксплуатации трубопроводов с ликвационной полосой в стенке труб.

Методы исследований

Поставленные задачи решались путем проведения экспериментальных исследований статической прочности и малоцикловой усталостной долговечности металла труб, имеющего значительную химическую неоднородность в виде ликвационной полосы. При этом были использованы стандартные методы определения механических свойств на растяжение, микротвердости, макро- и микроструктуры металла, рентгеноспектральный и рентгенфазовый методы определения основных химических элементов по сечению стенки трубы, а также оригинальные методики определения механических свойств металла труб в зоне ликвационной полосы на срез и в условиях малоциклового нагружения.

В работе использовался метод конечных элементов (МКЭ) для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) металла труб с ликвационной полосой.

Научная новизна

1 Установлено, что под действием циклически изменяющихся нагрузок в стенке труб длительно эксплуатирующихся магистральных трубопроводов расслоение металла образуется в зоне ликвационной полосы.

2 Определено напряженно-деформированное состояние металла с ликви-

ционной полосой по толщине стенки трубы. При этом в зоне ликвационной полосы максимальные значения напряжений от действия внутреннего давления перекачиваемого продукта превышают номинальные в 1,7 раза.

3 Обоснованы время проведения внутритрубной диагностики для выявления возможного расслоения стенки трубы из стали 17Г1С, имеющей ликвационную полосу, и корректировка рабочего давления для обеспечения безопасной эксплуатации трубопровода.

Практическая значимость и реализация результатов работы

На основании результатов проведенных исследований разработана «Методика назначения срока внутритрубной диагностики трубопроводов для выявления расслоения металла по ликвационной полосе», которая используется в ОАО «Уренгойтрубопроводстрой» и ООО «Сибрегионгазстрой» при оценке технического состояния магистральных трубопроводов, а также алгоритм корректировки рабочего давления при достижении предельного числа циклов нагружения, соответствующего началу расслоения.

Апробация работы

Основные результаты и положения работы докладывались и обсуждались: на Международной научно-технической конференции, посвященной памяти Ильи Пригожина, «Прикладная синергетика – II» (Уфа, 2004 г.); II межотраслевой научно-практической конференции «Проблемы совершенствования дополнительного профессионального и социогуманитарного образования специалистов топливно-энергетического комплекса» (Уфа, 2005 г.); VI Конгрессе нефтегазопромышленников России (Уфа, 2005 г.); V Российском энергетическом форуме «Энергоэффективность. Проблемы и решения» (Уфа, 2005г.); Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2005».

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 7 печатных работ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и основных выводов, содержит 114 страниц машинописного текста, 8 таблиц, 38 рисунков, библиографический список из 118 наименований и приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования.

В первой главе рассмотрены и проанализированы проблемы, связанные с низким металлургическим качеством труб, являющимся причиной образования ликвационных полос в металле труб и приводящим к аварийному разрушению линейной части магистральных трубопроводов.

Анализ причин аварийных отказов нефтепроводов показал, что разрушение происходит по основному металлу труб в местах поверхностных дефектов, заводским продольным и монтажным кольцевым сварным швам. Их протяженность может достигать четырех метров.

Разрушения газопроводов носят, как правило, лавинный характер и сопровождаются взрывами и пожарами. Общим для всех случаев является отсутствие заметного уменьшения толщины стенки труб в очагах разрушения трубопроводов, а также отсутствие остаточной деформации по периметру трубы.

На рисунке 1 приведен вид прямошовной трубы после разрушения на 11-м км газопровода СРТО - Торжок диаметром 1420 мм с толщиной стенки 18,7 мм. Один из фрагментов трубы длиной 7,3 метра был выброшен на расстояние 250 метров по ходу газа. Как показало проведенное расследование причины аварии, разрушение произошло из-за расслоения стенки трубы (рисунки 2, 3), которое является характерным видом дефектов, встречающихся на нефти - и газопроводах.

Как показал анализ литературных данных, в металле труб, особенно из кремнемарганцовистых сталей, могут присутствовать раскатанные загрязнения,

являющиеся дефектом металлургического производства. Эти участки имеют большую химическую неоднородность, загрязнены примесями (оксиды, нитриды, сульфиды, силициды), то есть представляют собой ликвационные зоны, отличающиеся по значениям характеристик механических свойств от основного металла трубы.



Рисунок 1 - Вид разрушения на 11 км газопровода СРТО - Торжок



а



б

а – с 11 км; б - с 50 км

Рисунок 2 – Фрагменты трубы газопровода СРТО – Торжок с расслоением

Такие ликвационные зоны, находящиеся практически в середине стенки трубы по толщине, образуются из-за специфических условий кристаллизации при непрерывной разливке стали. Образование слитка начинается от стенок кристаллизатора, и последние порции жидкого металла переходят в твердое состояние в его центральной части. Неметаллические включения, которыми загрязнен расплав, по мере его кристаллизации оттесняются в центр слитка и об-

разуют ликвационную зону. Сильное замедление кристаллизации слитка, отсутствие перемешивания расплава способствуют чрезвычайному развитию ликвационного процесса и созданию его неоднородного строения. После прокатки слитка ликвационная зона будет присутствовать в листе или полосе, из которых изготавливают трубы для магистральных трубопроводов, прямошовные или спиральношовные соответственно.

Общий вид образца с расслоением и ликвационной полосой, вырезанного нами из дефектного участка нефтепровода Сургут-Полоцк (труба из стали 17Г1С Ду 1020 мм толщиной 9 мм, спиральношовная, термоупрочнённая), показан на рисунке 3.

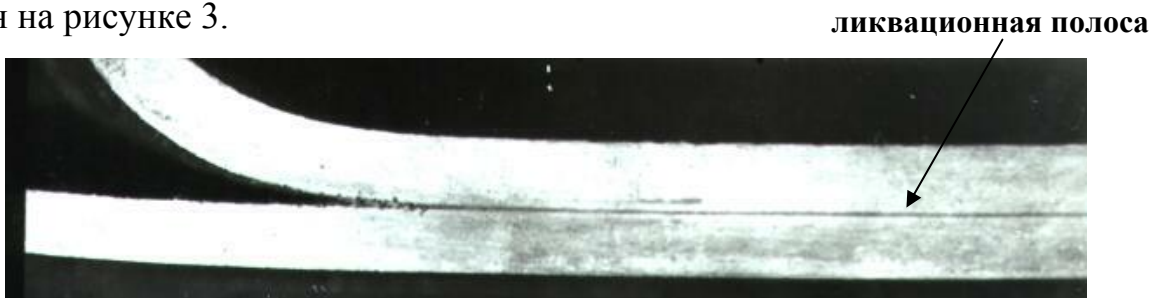


Рисунок 3 - Расслоение металла трубы по ликвационной полосе

Таким образом, расслоение, возникшее при изготовлении труб, может стать одной из причин разрушения трубопровода в процессе эксплуатации.

Наиболее опасным является случай, когда расслоение выходит на поверхность трубы, уменьшая рабочую толщину ее стенки. В то же время, опыт эксплуатации показывает, что трубопроводы, имеющие внутренние расслоения, параллельные поверхности трубы, эксплуатируются длительное время без разрушения.

На рисунке 4 приведена макроструктура сварного соединения (нефтепровод ТОН-II) с расслоением основного металла.

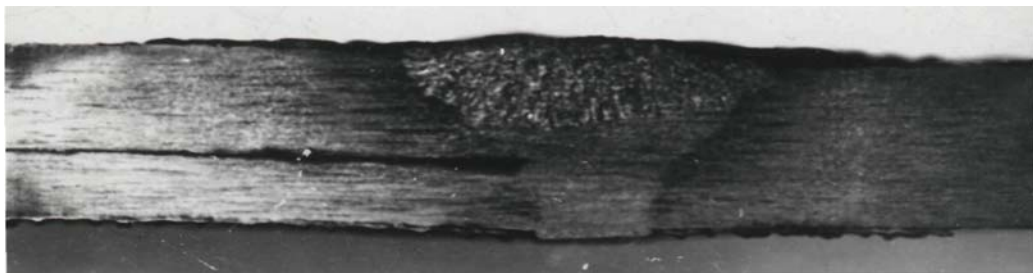


Рисунок 4 – Расслоение стенки трубы у кольцевого сварного шва

Так как выход расслоения на кромки труб по нормативно-техническим документам не допускается, то можно предположить, что оно под действием рабочих напряжений распространялось вдоль ликвационной полосы и было остановлено сварным швом.

Для повышения металлургического качества слитков в настоящее время существуют специальные методы воздействия на расплав в процессе выплавки стали и непосредственно при ее разливке. Основными из них являются: вакуумно–дуговой и электрошлаковый переплавы, вибрационный метод литья, перемешивание расплава при литье слитков магнитным полем, воздействие на расплав ультразвуком, обработка жидкого металла синтетическими шлаками. Однако при производстве металла для изготовления труб магистральных нефте- и газопроводов они практически не применяются.

Результаты анализа, проведенного в первой главе, позволили сформулировать цель работы, задачи исследований и основные положения, выносимые на защиту.

Во второй главе приведены исследования микроструктуры и химической неоднородности металла труб в зоне ликвационной полосы.

Исследования проводились на образцах, вырезанных из трубы диаметром 820 мм с толщиной стенки 11 мм производства Челябинского трубопрокатного завода; марка стали 17Г1С. Труба для исследований была предоставлена Управлением Урало-Сибирскими магистральными нефтепроводами им. Д.А. Черняева из аварийного запаса.

Для изучения микроструктуры использовался микроскоп МИМ-8М. Поверхность подготовленного шлифа травилась концентрированным раствором пикриновой кислоты в этиловом спирте. Структура исследуемого металла (рисунок 5) типична для горячедеформированной стали.

В центральной части образца имеется ликвационная полоса толщиной порядка 0,5 мм. Структура стали ферритно-перлитная. Для изучения влияния термообработки на толщину ликвационной полосы был проведен отжиг при температуре 850 °С, время выдержки 30 минут. Было определено, что ширина

ликвационной полосы увеличилась до 0,7 мм. Это указывает на дополнительное выделение карбидов и оксидов при высоких температурах. Поэтому устранить ликвационную полосу указанной термообработкой не представляется возможным.

ликвационная полоса

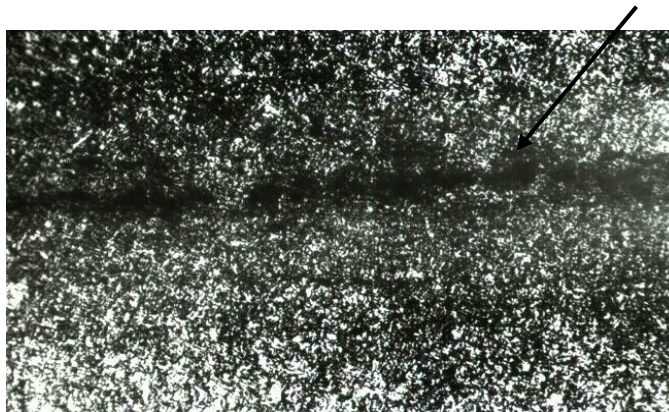


Рисунок 5 – Микроструктура металла в зоне ликвационной полосы

Химический состав металла определялся на сканирующем электронном микроскопе JEOL в микрорентгеноспектральном анализаторе модели JXA–6400 при напряжении 20 кВ и увеличении 1000^{\times} . Определялось содержание основных химических элементов, присутствующих в кремниймарганцовистых сталях: железа, хрома, марганца, кремния и алюминия. Точки выбирались на поверхности исследуемого образца в зонах основного металла и ликвационной полосы поперек толщины стенки трубы: точка №1 – внутренняя поверхность, №11 – наружная поверхность, №6 - середина ликвационной полосы. Распределение марганца, кремния и алюминия в локальных участках стенки трубы приведено на рисунке 6.

Повышенное содержание рассматриваемых химических элементов в зоне ликвационной полосы указывает на возможность присутствия в ней оксидов марганца, кремния и алюминия.

Для проверки данного предположения был проведен качественный рентгенофазовый анализ зоны ликвационной полосы на рентгеновском дифрактометре ДРОН 2.0 в отфильтрованном излучении трубки $CoK\alpha$. При анализе полученных рентгеновских рефлексов установлено, что в пробе содержатся кристаллические фазы – оксиды MnO , SiO_2 , Al_2O_3 , что подтверждает результаты

выше приведенных исследований.

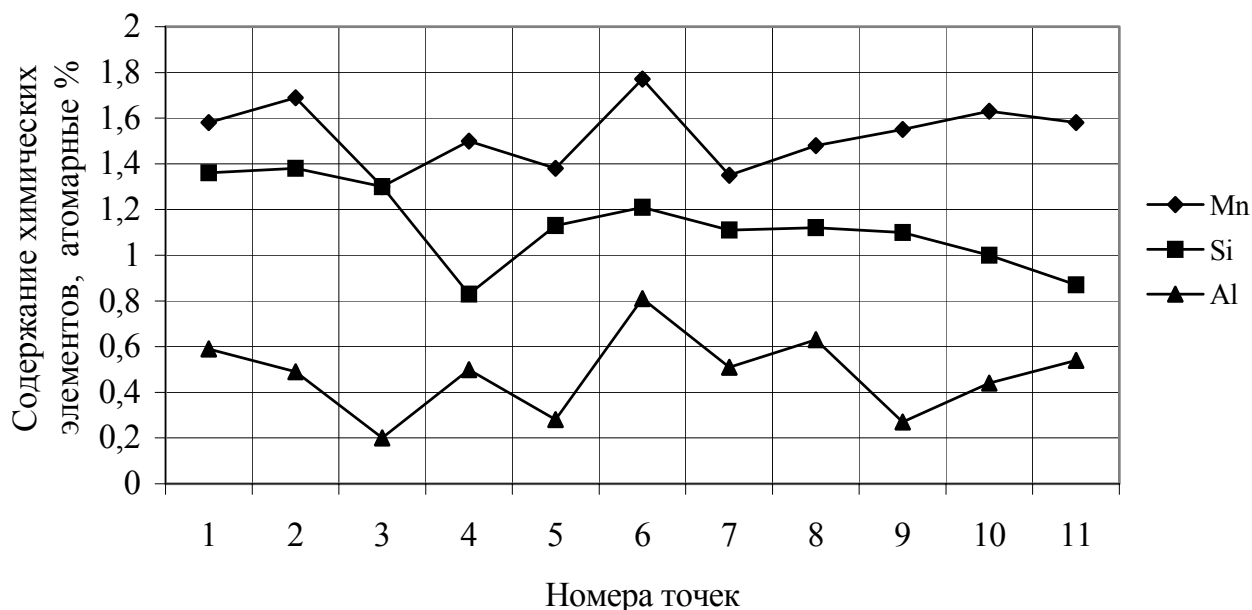


Рисунок 6 – Характер распределения химических элементов

В третьей главе приведены методики и результаты измерения микротвердости, определения основных механических свойств металла трубы с ликвационной полосой на растяжение, срез, малоцикловую усталость.

Для оценки неоднородности механических свойств по сечению стенки трубы определялась микротвердость основного металла и ликвационной полосы в соответствии с ГОСТ 9450-76 на приборе ПМТ-3 при нагрузке 1,96 Н.

Обработка полученных результатов исследований и их визуализация в виде графического изображения с интервальной оценкой ошибки эксперимента проводилась на ЭВМ с использованием пакетов прикладных программ для математической и статистической обработки данных.

Проведенные исследования показали, что в зоне ликвационной полосы микротвердость составляет 2800 Н/мм^2 , а в основном металле – от 1700 до 1850 Н/мм^2 (рисунок 7), что также подтверждает результаты распределения химических элементов по сечению металла трубы.

Испытание на растяжение проводилось по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 1497-84 на плоских образцах с галтелью типа I (№ 15). Значе-

ния механических характеристик основного металла трубы определялись на разрывной машине Р-50. Скорость перемещения подвижного захвата составляла 0,1 мм/мин.

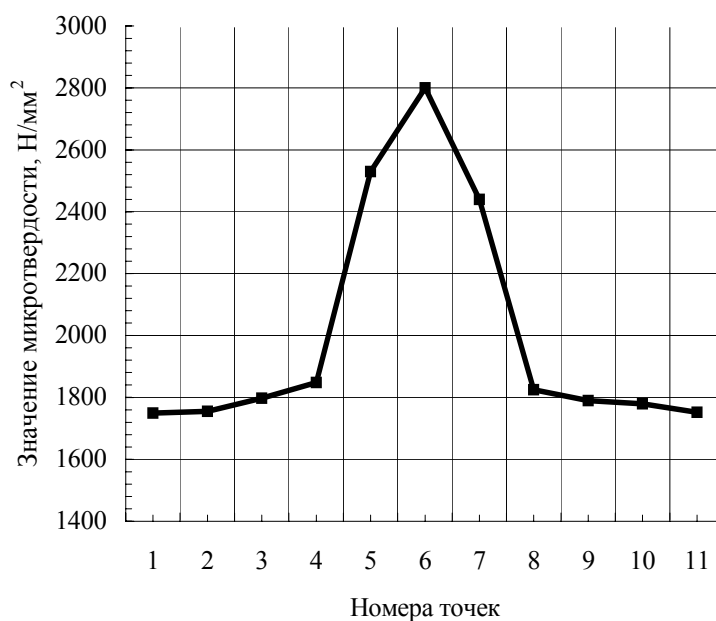


Рисунок 7 – Распределение микротвердости по сечению образца

Как показали результаты испытания на растяжение, значения механических характеристик стали марки 17Г1С соответствуют требованиям нормативных документов. В изломе протяжённость раскрытия образца по ликвационной полосе составляет более 3 мм и расслоение не выходит на боковую поверхность (рисунок 8). Это соответствует баллу 2 шкалы балльности осевой химической неоднородности.



Рисунок 8 - Расслоение металла после испытания образцов на растяжение

Таким образом, показано, что ликвационная полоса не оказывает влияния на значения механических характеристик трубной стали при растяжении.

Испытания на малоцикловую усталость проводились на плоских образцах

размером 480x38x11 мм жестким нагружением по схеме чистого изгиба.

В работе применялся отнулевой цикл нагружения с частотой 50 циклов в минуту. Величина деформации составляла 0,24 %. Исследования проводились на воздухе при комнатной температуре.

Измерение длины растущей трещины производилось в момент максимального раскрытия ее кромок с использованием микроскопа МБС-9 при десятикратном увеличении.

Одновременно для определения времени до начала расслоения металла по ликвационной полосе с той же периодичностью проводился ультразвуковой контроль с использованием ультразвукового дефектоскопа марки УД2-70 и толщиномера марки УТ-93 П.

Как показали результаты исследований, максимальное число циклов до разрушения стали марки 17Г1С при данных условиях испытаний составило 24600 циклов.

Зависимость длины трещины от числа циклов до разрушения приведена на рисунке 9.

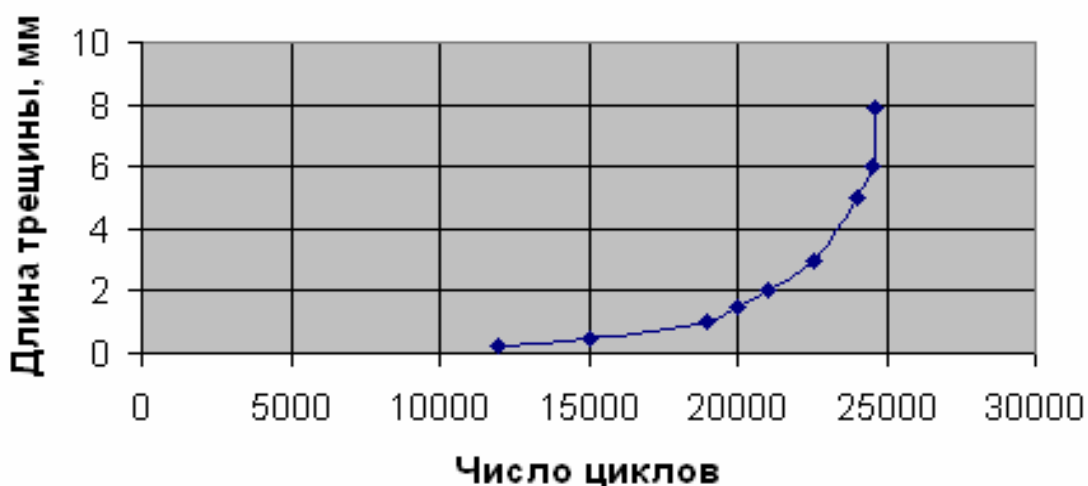


Рисунок 9 – Зависимость длины растущей трещины от числа циклов нагружения образцов

При испытаниях на воздухе образуется узкая неветвящаяся трещина, однако при приближении к ликвационной полосе она отклоняется и некоторое время растет вдоль стенки трубы, а затем вновь возвращается к основному направлению своего роста. На рисунке 10 показан вид такой трещины.

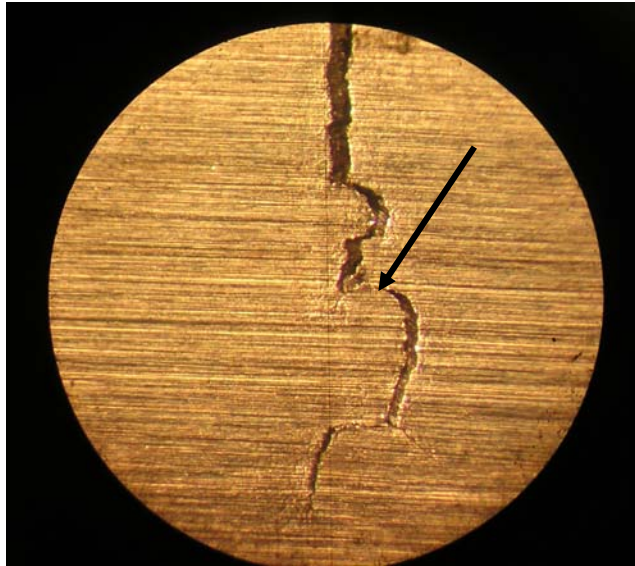


Рисунок 10 - Вид растущей трещины при малоцикловых усталостных испытаниях (стрелкой показано отклонение растущей трещины в зоне ликвационной полосы от магистрального направления)

В процессе усталостных испытаний по линии перехода от ликвационной полосы к металлу происходит рост образующихся трещин и расслоение.

Вид излома образца с ликвационной полосой после проведения малоцикловых усталостных испытаний приведен на рисунке 11.



Рисунок 11 – Вид излома образца после проведения малоцикловых усталостных испытаний (стрелкой показано отклонение растущей трещины в зоне ликвационной полосы от магистрального направления)

С использованием полученной зависимости длины растущей трещины от числа циклов нагружения проводился отбор образцов для дальнейших испытаний на срез.

В процессе исследований изучалось изменение прочности металла трубы на срез в зоне ликвационной полосы после различного числа циклов нагружения в условиях малоциклового усталости.

Испытания проводились на разрывной машине Р-50 с применением специально разработанных захватов.

Вид образца для испытаний на срез приведен на рисунке 12, при этом ликвационная полоса находилась в середине сечения стенки трубы.



Рисунок 12 - Внешний вид образца для испытаний на срез

Как показали результаты исследования, напряжения среза у образцов в исходном состоянии (до усталостных испытаний) составляют 375 МПа, а после 23500 циклов – 190 МПа. Изменение напряжений среза произошло на 49 % и началось примерно с 10000 циклов нагружения. Зависимость изменения напряжений среза от числа циклов нагружения приведена на рисунке 13.

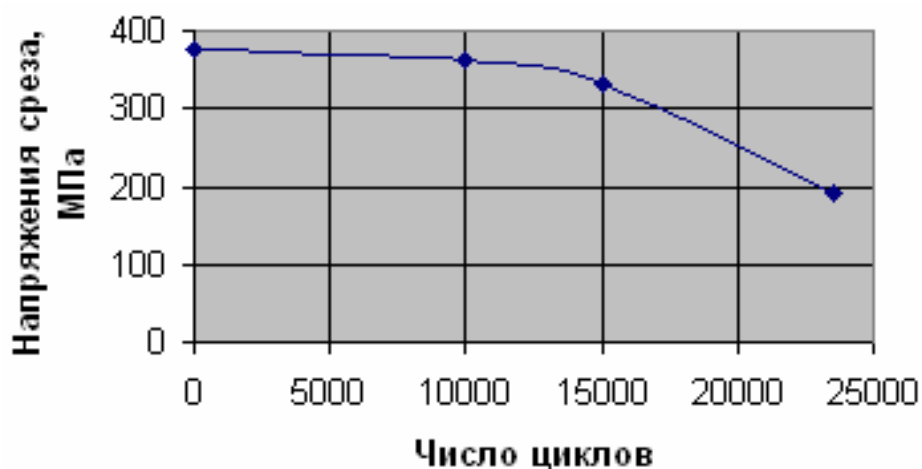


Рисунок 13 – Зависимость напряжений среза от числа циклов нагружения образцов

Анализ полученных результатов показывает, что образование макротрещин вдоль ликвационной полосы в данном случае начинается в области 10000 циклов. Это можно считать началом расслоения стенки трубы.

Таким образом, срок внутритрубной диагностики трубопроводов из стали 17Г1С для выявления возможного расслоения стенки трубы из-за наличия в ней ликвационной полосы может назначаться исходя из

$$\tau = \frac{N_p}{v \cdot 365}, \quad (\text{лет}), \quad (1)$$

где v - цикличность изменения давления в трубопроводе, цикл/сут;

N_p - количество циклов до начала расслоения.

Оценку работоспособности труб с ликвационной полосой можно проводить используя критерий циклической прочности. Относительный показатель повреждаемости металла трубы в концентраторе напряжений для магистральных трубопроводов определяется по зависимости, предложенной М.Х. Султановым:

$$P = P_0 \left(\frac{n \cdot n_\varepsilon \cdot D_{\text{вн}} \cdot \alpha_\sigma^{2/(1+c)} \cdot p_{\text{раб}}}{2 \cdot \chi \cdot E \cdot \delta \cdot (n_\sigma \cdot \psi^{-1})^{(1-c)/(1+c)}} \right)^{\frac{1}{m_c}} \cdot N_p, \quad (2)$$

где P_0 – относительный показатель структурной повреждаемости металла;

n – коэффициент надежности по нагрузке;

ψ - относительное сужение;

$p_{\text{раб}}$ – рабочее давление, МПа;

n_ε - коэффициент запаса по деформации;

δ - толщина стенки трубы, мм;

n_σ - коэффициент запаса по напряжениям;

$D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубы, мм;

m_c – коэффициент условий работы металла;

E – модуль упругости, МПа;

χ - коэффициент, характеризующий пластические свойства металла;

c – коэффициент деформационного упрочнения;

α_σ - теоретический коэффициент концентрации напряжений.

С учетом относительного показателя повреждаемости металла трубы в концентраторе напряжений определяется коэффициент изменения рабочего давления в трубопроводе:

$$m_y = (1 - \Pi)^{m_c \cdot (1+c)/2} . \quad (3)$$

Допускаемое рабочее давление в трубе с ликвационной полосой в этом случае определяется:

$$P = P_{\text{раб}} \cdot m_y . \quad (4)$$

При этом все входящие в (2), (3), (4) параметры являются характеристиками трубы и определяются условиями эксплуатации по нормативным документам, кроме коэффициента концентрации напряжений α_σ . Для его определения требуется проведение дополнительных исследований напряженно-деформированного состояния металла труб в зоне ликвационной полосы.

В четвертой главе приведены модель и метод расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) металла труб в зоне ликвационной полосы методом конечных элементов (МКЭ).

Так как металл трубы с ликвационной полосой, как было показано выше, характеризуется неоднородностью механических свойств, то в процессе эксплуатации трубопроводов под действием внутреннего давления перекачиваемого продукта в стенке труб должно создаваться неоднородное напряженно-деформированное состояние. Анализ различных типов дефектов и всего многообразия соответствующих им расчётных схем показал, что выполнить оценку напряжённо-деформированного состояния в различных зонах дефектных участков трубопровода при общей постановке задачи можно только с использованием численного метода расчёта, в качестве которого был выбран конечно-

элементный анализ, как один из наиболее эффективных методов решения инженерных задач.

Конечно-элементный анализ участка трубопровода был выполнен в среде программного комплекса ANSYS10.0. Для определения напряженно-деформированного состояния в области перехода основного материала и ликвационной зоны была построена модель фрагмента трубопровода с ликвационной полосой в центральной части его поперечного сечения. С учетом значительной величины отношения диаметра трубы к толщине ее стенки фрагмент трубопровода был выполнен в виде пластины размером 100x50x10 мм. Пластина находится под действием результирующих растягивающих нагрузок от действия внутреннего давления анализируемого участка трубы.

Задача решалась в трехмерной (3D) постановке. Расчет выполняли в упругой области. Свойства основного материала трубы и ликвационной полосы приняты изотропными.

Исходные данные для расчета НДС трубы с ликвационной полосой следующие:

- металл трубы – сталь марки 17Г1С;
- рабочее давление 5,5 МПа;
- условный диаметр трубы – 820 мм, с толщиной стенки 10 мм;
- модуль упругости стали $2 \cdot 10^5$ МПа;
- коэффициент Пуассона 0,3;
- ликвационная полоса располагается в центре сечения стенки трубы, её толщина в расчётах принята 0,5 мм;
- коэффициент Пуассона 0,17;
- модуль упругости неметаллических включений $1,6 \cdot 10^5$ МПа.

Фрагмент трубопровода определен 3D октаэдрическим элементом первого порядка «Solid 185». Общее число элементов в модели равно 17600.

Первоначально определялись интенсивность напряжений и деформаций для бездефектной трубы от внутреннего давления перекачиваемого продукта в ее $\frac{1}{2}$ части и полученные результаты использовались в последующих расчетах.

Участок ликвационной полосы занимает $\frac{1}{4}$ часть рассматриваемого фрагмента модели. Такая конструкция позволяет оценить НДС на границе раздела основного материала и ликвационной полосы вдоль и поперек образующей трубы. Модель фрагмента трубы с ликвационной полосой представлена на рисунке 14.

Необходимо отметить, что фрагмент трубы имеет две характерные поверхности: А - располагается поперек оси трубы, Б - вдоль оси трубы.

Граничные условия в модели были следующими. К поверхности А фрагмента трубы были равномерно приложены растягивающие напряжения, равные 207,52 МПа, вдоль направления оси OZ, которые создаются в стенке трубы от действия внутреннего давления. Противоположная поверхность закреплена от перемещения вдоль направлений OZ.

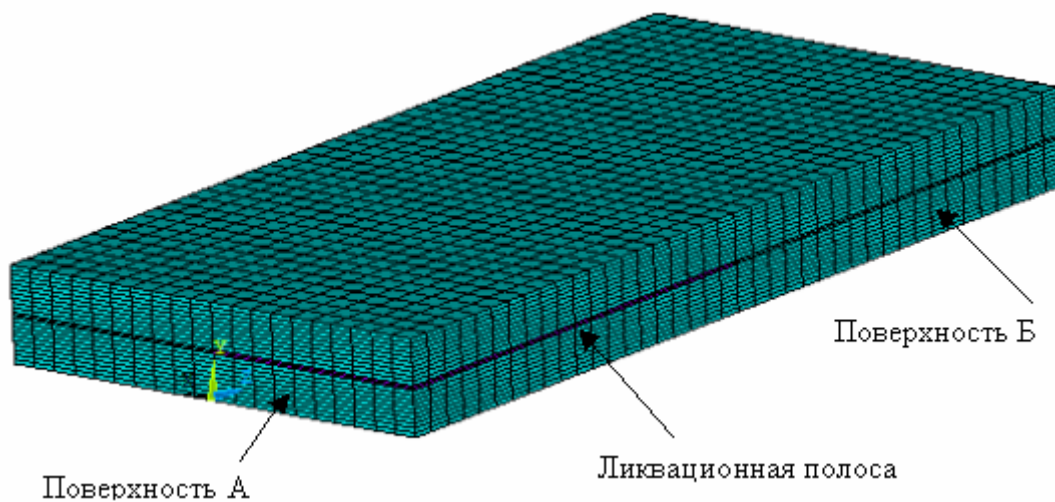


Рисунок 14 - Конечно-элементная модель фрагмента трубы с ликвационной полосой

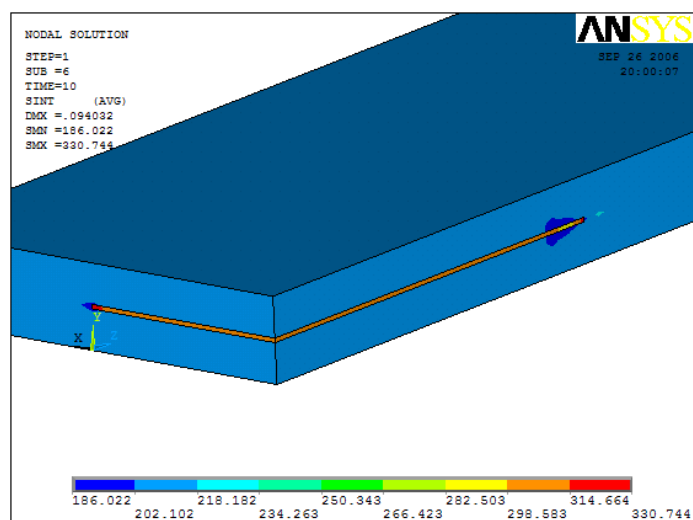
Поверхность Б и противоположная ей поверхность закреплены от перемещения вдоль направления оси OX.

На рисунке 15 представлены эпюры распределения интенсивностей напряжений и деформаций на поверхностях фрагмента трубы А и Б.

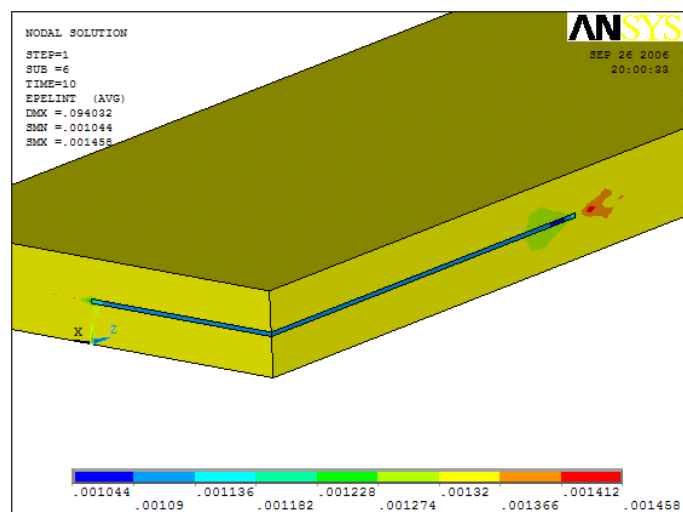
Результаты расчета показали, что значения напряжений в ликвационной полосе выше, чем в основном материале трубы, - 298,6 МПа и 202,0 МПа соответственно.

На границе перехода ликвационной полосы в основной материал наблю-

дается скачкообразное изменение величины интенсивности напряжений с 202,0 до 330,7 МПа.



а



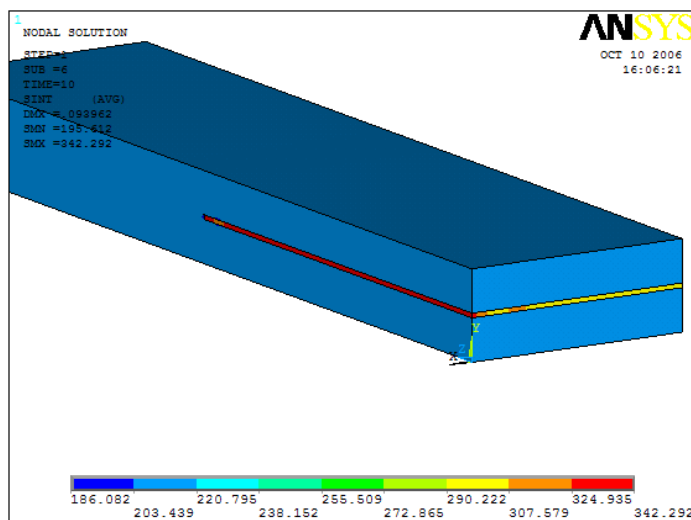
б

Рисунок 15 - Эпюры распределения интенсивности напряжений (а) и интенсивности деформаций (б) в поперечном сечении фрагмента трубы

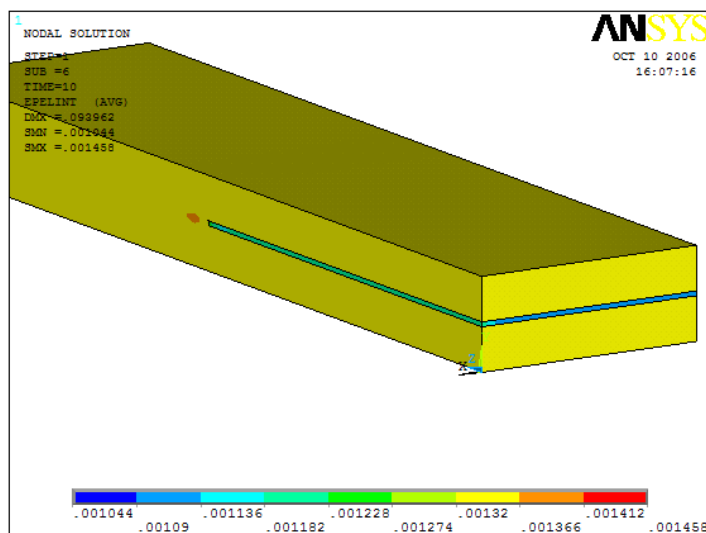
Величина упругой деформации в аналогичных участках фрагмента трубы составляет соответственно 0,1 и 0,13%. Необходимо отметить, что в зоне перехода от ликвационной полосы к основному материалу значение упругой деформации локально увеличивается до 0,15%.

На рисунке 16 а, б представлены эпюры распределения интенсивности напряжений и деформации на краях ликвационной полосы в теле фрагмента трубы, расположенные параллельно плоскостям А и Б. Максимальные значения интенсивности напряжений отмечены в ликвационной полосе и составляют ве-

личину 342,3 МПа, а величина интенсивности деформации в ней составляет 0,12%.



а



б

Рисунок 16 - Эпюра распределения интенсивности напряжений (а) и интенсивности деформаций (б) в поперечном сечении фрагмента трубы на границе раздела ликвационной полосы и основного металла

Наибольшие значения интенсивности напряжений располагаются в продольном направлении фрагмента трубы, а наименьшие - в поперечном направлении.

В вершине ликвационной полосы значения интенсивности напряжений максимальны и составляют величину 342,3 МПа, а в стенке трубы – 203,4 МПа.

Таким образом, расчетное значение теоретического коэффициента концентрации напряжений в указанной области составляет порядка 1,7.

Подставляя численные значения для рассматриваемых условий в (2), получаем

$$P = 0.772 \left(\frac{1.1 \cdot 1.34 \cdot 820 \cdot 1.7^{2/(1+0.42)} \cdot 5.5}{2 \cdot 0.5 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 10 \cdot (1.34 \cdot 0.55^{-1})^{(1-0.42)/(1+0.42)}} \right)^{0.5} \cdot 10000 = 0.19 ,$$

$$m_y = (1 - 0.19)^{0.5 \cdot (1+0.42)/2} = 0.93 ,$$

$$p = 5.5 \cdot 0.93 = 5.1 \text{ МПа.}$$

Таким образом, проведенный расчет показал, что для обеспечения безопасной эксплуатации трубопровода с учетом ликвационной полосы в рассмотренном случае допускаемое рабочее давление необходимо снизить до 5,1 МПа.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1 Установлено, что для обеспечения безопасной эксплуатации трубопровода срок внутритрубной диагностики должен назначаться с учетом возможности нахождения ликвационной полосы в стенке трубы и необходима корректировка рабочего давления при достижении предельного числа циклов нагружения, соответствующего началу расслоения.

2 Показано, что ликвационная полоса не оказывает влияния на значение механических характеристик стали при испытании на растяжение, но снижает прочность на срез после предварительных испытаний на малоцикловую усталость. Для стали 17Г1С образование микротрещин по границе ликвационная полоса – металл начинается с 10000 циклов нагружения.

3 В зоне ликвационной полосы образцов из стали 17Г1С микротвердость выше, чем в основном металле (2800 Н/мм² и 1700 – 1850 Н/мм² соответственно), что связано с наличием кристаллических фаз – MnO, SiO₂, Al₂O₃, которые при скоплении образуют протяженный, твердый и хрупкий металлургический дефект в стенке трубы.

4 Установлено, что для труб с ликвационной полосой характерно неравномерное напряженно-деформированное состояние. При этом максимальные значения напряжений создаются на границе металл - ликвационная полоса. Для исследуемой модели трубы из стали 17Г1С с ликвационной полосой толщиной 0,5 мм они составляют 342,3 МПа. При этом теоретический коэффициент концентрации напряжений в указанной области равен 1,7.

5 Разработана методика для определения срока безопасной эксплуатации трубопроводов с ликвационной полосой, которая используется в ОАО «Уренгойтрубопроводстрой» и ООО «Сибрегионгазстрой» при оценке технического состояния магистральных трубопроводов.

Содержание работы опубликовано в 7 научных трудах, из которых №1 включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых Российской Федерации, в соответствии с требованиями ВАК Минобразования и науки РФ:

1 Муфтахов М.Х., Бердин В.К., Худяков М.А., Закирничная М.М. Влияние ликвационной полосы на распределение напряжений в стенке трубы// Нефтегазовое дело.- http://www.ogbus.ru/authors/Hudyakov/Hudyakov_1.pdf.

2 Худяков М.А., Закирничная М.М., Муфтахов М.Х. Роль неметаллических включений в расслоении трубных сталей// Прикладная синергетика – II: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф.– Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004.– Т. 2.– С. 156 – 158.

3 Худяков М.А., Муфтахов М.Х. К вопросу о расслоении металла труб. Мировое сообщество и пути решения: Сб. науч. статей.– Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004.- № 16.- С. 36-39.

4 Худяков М.А., Муфтахов М.Х. Неметаллические включения в трубных сталях// Проблемы совершенствования дополнительного профессионального и социогуманитарного образования специалистов топливно-энергетического комплекса: материалы II межотраслевой науч.- практ. конф.- Уфа: Монография, 2005.– С. 300 – 301.

5 Худяков М.А., Муфтахов М.Х. Особенности расслоения трубных сталей при циклических нагрузках// Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: материалы науч.-практ. конф., проводимой в рамках VI Конгресса нефтегазопромышленников России.– Уфа: ТРАНСТЭК, 2005.- С. 29-30.

6 Муфтахов М.Х., Худяков М.А., Закирничная М.М. Влияние неметаллических включений на механические свойства трубных сталей// Энергоэффективность. Проблемы и решения: тез. докл. науч.-практ. конф., проводимой в рамках V Российского энергетического форума.– Уфа: ТРАНСТЭК, 2005.– С. 139 – 145.

7 Муфтахов М.Х., Худяков М.А., Закирничная М.М. Определение напряженно-деформированного состояния металла трубы в зоне ликвационной полосы методом конечных элементов// Трубопроводный транспорт – 2005: тез. докл. Междунар. учеб.-науч.-практ. конф.- Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2005.– С. 220 - 221.