

На правах рукописи

УДК 621.791

БАТОВ ГЕОРГИЙ ПАВЛОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА  
СВАРНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ  
ЛОКАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ РАЗРУШЕНИЯ**

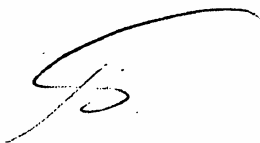
05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

01.02.06 - Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук



Москва — 2013

Работа выполнена на кафедре технологий сварки и диагностики  
в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**КУРКИН Алексей Сергеевич**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**КАЗАНЦЕВ Александр Георгиевич**  
заведующий отделом ГНЦ РФ ОАО НПО  
«ЦНИИТМАШ»

кандидат технических наук, доцент  
**АНТОНОВ Алексей Алексеевич**  
доцент РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина

**Ведущая организация:** Научно-исследовательский институт природных  
газов и газовых технологий – Газпром  
**ВНИИГАЗ** (г. Москва)

Защита состоится 26 декабря 2013г. в \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская д.5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим присылать по указанному адресу.

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

Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63.

Автореферат разослан «    » ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент



Коновалов А.В.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2039239

Батов Г.П. Разработка мет.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Существующая система обеспечения промышленной безопасности, отраженная в нормативных документах, опирается на плановую замену оборудования по окончании срока эксплуатации, регламентированного на этапе проектирования. Однако последние 20 лет на территории РФ система плановой замены оборудования функционировала не в полном объеме, и в настоящее время отсутствует возможность одновременно провести замену всех требующих этого опасных промышленных объектов. В сложившейся ситуации необходимо решать задачу возможности продления срока эксплуатации объектов, которые давно отработали назначенный ресурс.

Достоверность оценки срока безопасной эксплуатации (остаточного ресурса) объектов является важнейшим условием снижения риска техногенных катастроф. Максимально возможную достоверность обеспечивает комплексное обследование фактического состояния объекта при максимальном использовании современных средств неразрушающего контроля и методик расчета.

Это в полной мере относится к системе магистральных трубопроводов. Учитывая текущее состояние газопроводных систем - повышение давления и объемов перекачки, производственные дефекты (в основном, в монтажных сварных швах) и эксплуатационные дефекты (в основном - коррозионные повреждения) существующие методы определения их остаточного ресурса на основе расчета на статическую прочность нельзя считать достаточными. Поскольку многие из магистральных трубопроводных систем отработали свой назначенный ресурс, требуются либо провести их демонтаж, либо определить длительность и условия возможной безопасной эксплуатации.

Расположение дефектов в сварных швах и зоне термического влияния (обладающих неоднородной структурой и полями остаточных сварочных напряжений) усложняет задачу расчета ресурса магистральных трубопроводов.

Таким образом, достоверное определение остаточного ресурса производственных объектов на настоящий момент времени является актуальной задачей.

**Объектом исследования** являются сварные магистральные трубопроводы, подвергающиеся в процессе эксплуатации статическим и циклическим нагрузкам, изготовленные из высокопрочных сталей с незначительным упрочнением в пластической области путем прокатки и сварки, с производственными и эксплуатационными дефектами.

**Цель работы** - повышение достоверности оценки остаточного ресурса сварных трубопроводов с выявленными дефектами на основе использования локального критерия разрушения металла и результатов неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи.

1. Провести анализ современного состояния оценки остаточного ресурса сварных магистральных трубопроводов, включая методики расчета, а также мето-

ды и средства неразрушающего контроля качества и напряженно - деформированного состояния.

2. Разработать критерий разрушения, обеспечивающий адекватное моделирование статического и циклического разрушения сварных соединений с дефектами

3. Разработать программное обеспечение (ПО) для моделирования разрушения сварных конструкций на основе полученного критерия.

4. Проверить адекватность критерия разрушения на основе сопоставления результатов численных и натурных экспериментов.

5. Разработать методику оценки остаточного ресурса магистральных трубопроводов на основе полученного критерия и результатов неразрушающего контроля напряженного состояния (НК НДС).

6. Применить полученные результаты при разработке отраслевых нормативных документов, разработать специализированный аппаратно-программный комплекс «Ресурс газопроводов» для расчета остаточного ресурса сварных газопроводов на основе разработанной методики.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач применены: численное моделирование с использованием метода конечных элементов процессов образования остаточных сварочных напряжений (ОСН), деформирования и разрушения металла при взаимодействии ОСН и эксплуатационных нагрузок; моделирование роста трещины с использованием линейной механики разрушения (ЛМР); механические испытания лабораторных и натурных образцов; металлографический анализ макроструктуры шлифов.

**Научная новизна** результатов работы заключается в следующем:

1. Разработан локальный критерий разрушения, позволяющий моделировать разрушение материала вблизи концентраторов произвольной формы в сварных соединениях под воздействием статических и циклических нагрузок.

2. Установлено влияние объемности напряженного состояния на процесс разрушения материала под воздействием циклического нагружения.

3. На основе локального критерия разрушения разработана методика расчета прочности и остаточного ресурса сварного трубопровода с дефектами произвольной формы при воздействии статических и циклических нагрузок.

**Практическая ценность** результатов работы заключается в следующем:

1. Разработка методического и программного обеспечения для моделирования процессов деформирования и разрушения при знакопеременном нагружении расширило функциональные возможности ПК «Сварка» и позволило решить ряд важных практических задач нефтегазовой отрасли.

2. Разработанный по заказу ОАО «Газпром» инженерный ПК «Ресурс газопроводов» обеспечивает оценку прочности и ресурса участков газопровода, учитывая особенности эксплуатации такие как: условия нагружения, ОСН, коррозионная среда, дефекты в основном металле и сварных швах, свойства основного металла, металла сварного шва и зоны термического влияния, и их изменения за срок эксплуатации.

**Методы исследования** – численное моделирование с использованием методов конечных элементов процессов деформирования и разрушения металла, остаточных сварочных напряжений (ОСН) и влияния ОСН на разрушение материала; моделирование роста трещины с использованием линейной механики разрушения; механические испытания лабораторных и натурных образцов, металлографический анализ макроструктуры шлифов.

**Достоверность** и точность результатов моделирования подтверждены в ходе верификации комплекса путем сопоставления результатов расчетов с литературными данными и результатами экспериментальных исследований.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: «Определение напряженно-деформированного состояния и оценка остаточного ресурса технических устройств и сооружений».(2008 г., г. Сочи. ООО «НУЦ «Качество»), 16-ой международной конференции и выставке «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» (2008 г., г. Ялта, Украина, Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики.), «5-th International Conference on Certification and Standardization in NDT» ( 2007 г. Germany Berlin DGZFP), IV Российской научно - технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций » (2008, г.Екатеринбург),«17-th World Conference on Non-Destructive Testing»(2008, Shanghai, China, IFNDT), «Annual International conference IIW» (2008, Graz, Austria, IIW), «10-th European Conference on Non-Destructive Testing», (2010, Москва, EFNDT совместно с РОНКТД), «18-th World Conference on Non-Destructive Testing», (2012, Durban, South Africa, IFNDT), и др.

**Публикации.** Материалы диссертации отражены в 10 печатных работах в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, а также в зарубежных журналах и тезисах докладов конференций.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов по работе и приложений. Выполнена на 125 машинописных листах, содержит 46 рисунков, и 80 наименований используемых источников.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

В первой главе рассмотрены особенности магистральных трубопроводов, влияющие на их работоспособность, а также существующие методы, технические средства и критерии, применяемые для оценки технического состояния трубопроводных систем и расчетного определения их прочности и ресурса.

Вопросами надежности и ресурса сварных трубопроводов занимались видные отечественные и зарубежные ученые: Г.А.Николаев, В.А.Винокуров, Г.М. Хажинский, Г.П. Карзов, А.Г.Казанцев, В. В. Харионовский, О. М. Иванцов, Б. И. Завойчинский, В. В. Болотин, Б. Е. Патон Ю.А. Краус и др. Они разработали подходы и методики обследования и диагностики трубопроводов, оценки их прочности и

остаточного ресурса. Многие из этих работ стали основой для отраслевых нормативных документов.

Основными данными для расчета остаточного ресурса являются геометрические параметры дефектов, свойства материала и нагрузки. Анализ работ основоположников НК Н.П.Алешина, В. В. Ключева, и др. показывает, что данные результатов неразрушающего контроля (НК) можно считать достоверными, несмотря на погрешности при определении размеров и расположения дефектов, связанные с возможностями неразрушающего контроля. Данные о свойствах основного металла трубопровода определяются с высокой точностью, свойства материала сварного шва и зоны термического влияния могут отличаться от проектных из-за нарушений технологии монтажа и сварки но в целом данные о механических свойствах материала можно считать достоверными. Нагрузки определяются, как правило, по проектным режимам работы трубопровода и часто не учитывают реального напряженно – деформированного состояния объекта. Для определения нагрузок целесообразно использование физических методов контроля напряженно-деформированного состояния (НДС), описанных в работах А.А.Антонова, В.Л.Венгриновича, Н.Е.Никитиной и О.И.Стеклова. К сожалению, в настоящее время применение этих методов ограничено. Недостаточно нормативных документов, регламентирующих НК НДС, отсутствует система сертификации персонала.

В действующих отраслевых методиках оценки остаточного ресурса (ВБН В.2.3.00018201.04-2000, ВРД 31-1.10-004-99, ОСТ 153-39.4м-010-2002 и др.) используется ряд упрощений, снижающих достоверность получаемых результатов:

- при расчете продольных напряжений учитывается только давление в трубе;
- значения параметров НДС рассчитываются по формулам сопротивления материалов;
- не используются методы НК НДС,
- не учитывается циклическая составляющая нагрузки;
- не учитываются ОСН.

**Вторая глава** посвящена выводу и обоснованию единого локального критерия разрушения и формулы накопления повреждений для моделирования процессов разрушения при монотонном и циклическом нагружении.

В качестве основы для моделирования НДС трубопроводов выбран программный комплекс (ПК) «Сварка» разработанный на кафедре «Технологии сварки и диагностики» под руководством А.С.Куркина с участием автора работы. Недостатком ПК «Сварка», препятствовавшим его применению для моделирования усталостного разрушения, являлось использование модели изотропного упрочнения.

Такая модель не отражает накопление повреждений при малоцикловой усталости: согласно ей, упрочнение в процессе первого цикла нагружения предотвра-

щает пластическую деформацию на последующих циклах с такой же или меньшей амплитудой, в результате расход энергии на деформацию и разрушение прекращается.

Для моделирования усталостного разрушения потребовался переход к модели трансляционного упрочнения с учетом эффекта Баушингера. Для создания расчетной модели был выбран вариант, предложенный З.Мрузом, как наиболее удобный для численного моделирования.

В исходном недеформированном состоянии поверхность текучести и поверхности упрочнения представляют собой семейство концентрических гиперсфер (Рис. 1,а). Радиус каждой поверхности упрочнения равен соответствующему уровню интенсивности напряжения на диаграмме упрочнения, радиус поверхности текучести равен пределу текучести. Во всех точках в пределах области между парой смежных колец действует одинаковый модуль упрочнения  $H^*$ .

При первом нагружении упрочнение сопровождается нарушением изотропии. После достижения предела текучести поверхность текучести смещается вслед за концом вектора напряженного состояния  $S$ . Вслед за ней, по мере достижения соответствующих уровней упрочнения, смещаются, не пересекаясь, все другие поверхности упрочнения. Те из них, уровень упрочнения которых не достигнут, остаются неподвижными. В результате нагружения до состояния 1 (Рис. 1,б) формируется анизотропное упрочненное состояние со смещенными поверхностями упрочнения, которое определяет характер упрочнения после реверса нагрузки. В каждой полосе упрочнения значение модуля  $H^*$  сохраняется неизменным, но форма полосы изменяется.

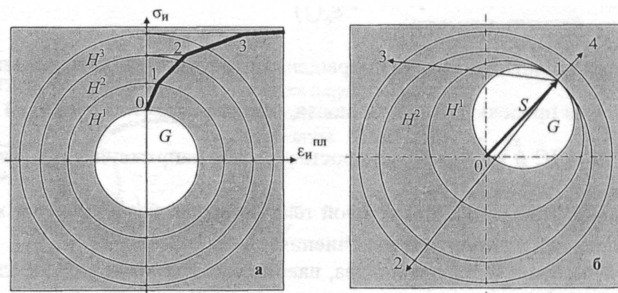


Рис. 1. Схема модели материала с анизотропным упрочнением:  $G$  – упругая область,  $H^1$ ,  $H^2$ ,  $H^3$ , – области с различными модулями упрочнения; ломаной линией представлена диаграмма упрочнения (а – исходное состояние, б – после пластической деформации)

На рис. 1,б показано состояние поверхностей течения после деформации, стрелками показаны траектории нагружения. При реверсе нагрузки от точки 1 вначале происходит разгрузка, а затем упруго-пластическое нагружение с эффектом Баушингера. Упрочнение при этом зависит от угла излома траектории нагружения в момент реверса. При пропорциональном нагружении по траектории 1-2 (при смене направления на противоположное) процесс аналогичен первому нагружению, если за начало отсчета взять точку 1. Траектория нагружения пересекает те же поверхности упрочнения. Полосы между ними имеют те же модули упрочнения, но ширина этих полос удваивается, что равносильно удвоению масштаба диаграммы упрочнения по обеим осям в соответствии с принципом Мазинга.

Критерий разрушения, используемый для оценки состояния трубопровода, также должен обеспечивать оценку опасности дефектов при взаимодействии статических и циклических нагрузок. Применительно к сварным конструкциям принципиальным является использование локального критерия, поскольку сочетание в небольшом объеме сварного шва сложной формы поверхности, возможных дефектов, неоднородности свойств материала и остаточных напряжений не позволяет использовать интегральные критерии линейной механики разрушения.

В ПК «Сварка» используется критерий предельной пластичности, разработанный В.Л.Колмогоровым, который позволяет проводить оценку поврежденности металла при статическом нагружении. Критерий является общепризнанным в теории обработки давлением для условий сложного напряженного состояния.

Близость к разрушению при переменной объемности выражается скалярной мерой поврежденности

$$w = \int dw = \int \frac{d\lambda}{\varepsilon_c(j)}, \quad (1)$$

где  $d\lambda = \sqrt{\frac{2}{3}} de_{ijp} de_{ijp}$  - интенсивность приращения пластической деформации,  $\varepsilon_c(j)$

- текущее значение предельной пластичности, которая является функцией показателя

объемности НДС  $j = \frac{\sigma_m}{\sigma_n}$ ,  $\sigma_m$  - гидростатическое напряжение,  $\sigma_n$  - интенсивность

напряжения. Диаграмма предельной пластичности  $\varepsilon_c(j)$  является характеристикой металла, как и диаграмма упрочнения.

Согласно гипотезе В.В.Новожилова, накопление повреждений дополнительно ускоряется по мере деформационного упрочнения материала. В связи с этим в

формулу расчета поврежденности был добавлен сомножитель  $\varepsilon_{np} = \sqrt{\frac{2}{3}} e_{ijp} e_{ijp}$  отражающий влияние деформированного состояния:

$$dw = 2 \frac{\varepsilon_{np} d\lambda}{\varepsilon_c^2}. \quad (2)$$

Из условия разрушения  $w=1$  получаем уравнение малоциклового усталости для определения числа циклов  $N_f$  до разрушения, близкое к известной формуле малоциклового усталости Мэнсона – Коффина:

$$N_f^{n_p} \Delta \varepsilon_{np} = \varepsilon_c, \quad (3)$$

где  $n_p = 0,5$ . При других значениях  $n_p$  формула (2) имеет вид:

$$dw = m_p \frac{\varepsilon_{np}^{m_p-1} d\lambda}{\varepsilon_c^{m_p}}, \quad (4)$$

где  $m_p = \frac{1}{n_p}$ . Таким образом, поврежденность в процессе пластической деформации непрерывно возрастает, причем скорость ее возрастания увеличивается с ростом упрочнения и объемности НДС. При реверсе нагрузки  $\varepsilon_{np}$  убывает, что позволяет описать замедление повреждения при знакопеременном нагружении по сравнению с монотонным.

К настоящему времени данные о существенном влиянии объемности напряженного состояния на разрушение при циклическом нагружении в литературе отсутствуют, и сам факт такого влияния подвергается сомнению. В качестве объекта для проверки влияния этого фактора на разрушение металла при циклическом нагружении был выбран образец с растущей поверхностной усталостной трещиной.

Как известно, перед фронтом такой трещины образуется зона знакопеременных пластических деформаций. Число циклов нарастающей пластической деформации, которые испытывает материал в каждой точке на пути трещины, составляет от 20 до 10 000, что соответствует области малоциклового усталости (Рис. 2).

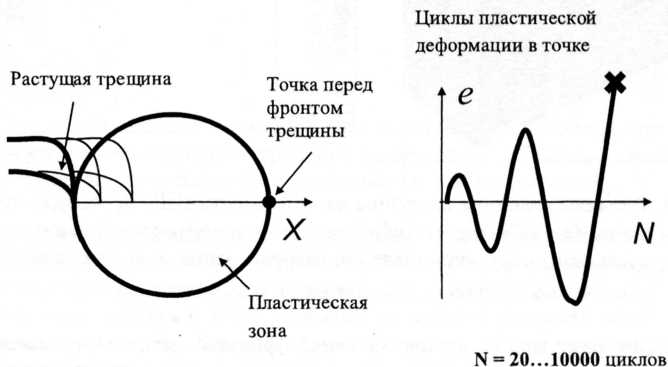


Рис. 2. Разрушение материала перед фронтом трещины

При циклических испытаниях различных образцов с исходными острыми надрезами или трещинами наблюдается хорошая повторяемость, как по скорости, так и по траектории роста трещин, позволяющая строить и использовать в расчетах кинетические диаграммы усталостного разрушения материалов. Это означает, что испытание одного образца с растущей поверхностной усталостной трещиной с регистрацией усилия, раскрытия и текущих размеров трещины заменяет испытание целой серии гладких образцов на малоцикловую усталость при различной объемности НДС с автоматической статистической обработкой результатов испытаний. Конечнотолщинная модель образца представлена на Рис. 3,а.

Замедление роста трещины наблюдается в областях ее контура, где она приближается к лицевой или обратной свободной поверхности образца. Именно в этих областях происходит снижение показателя объемности НДС (см. Рис. 3,б), и только оно может быть причиной замедления скорости роста трещины в глубину при приближении к обратной поверхности пластины, поскольку корреляции этого явления с другими параметрами НДС не наблюдается.

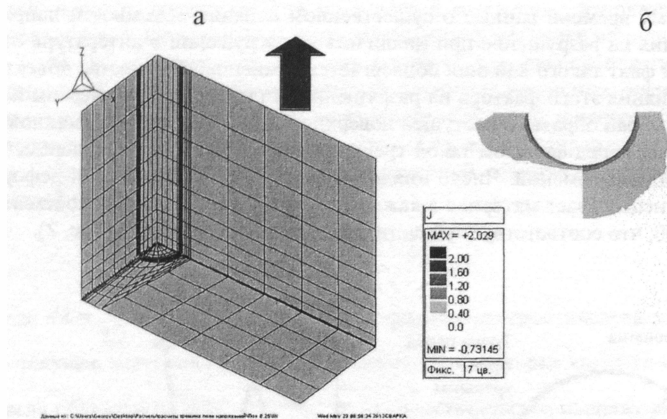


Рис. 3. Влияние толщины пластины на объемность НДС перед фронтом трещины (а – КЭ модель образца с полуэллиптической поверхностной трещиной, б – сопоставление распределения  $j$  перед фронтом двух одинаковых трещин в образцах различной толщины)

Поскольку разрушение материала перед фронтом трещины происходит по механизму малоциклового усталости, можно считать установленным, что скорость накопления повреждений при циклическом нагружении увеличивается при росте показателя объемности НДС.

В третьей главе проведено сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

Для проверки адекватности применяемой модели пластического деформирования материала было проведено сопоставление результатов моделирования и экспериментальных данных для случая жесткого знакопеременного кручения трубчатого образца при постоянном продольном растягивающем напряжении. В процессе кручения происходит накопление односторонних линейных деформаций (на каждом цикле увеличивается длина образца). Стабилизация амплитуды наступает после первого цикла. Как видно на рис. 4, результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

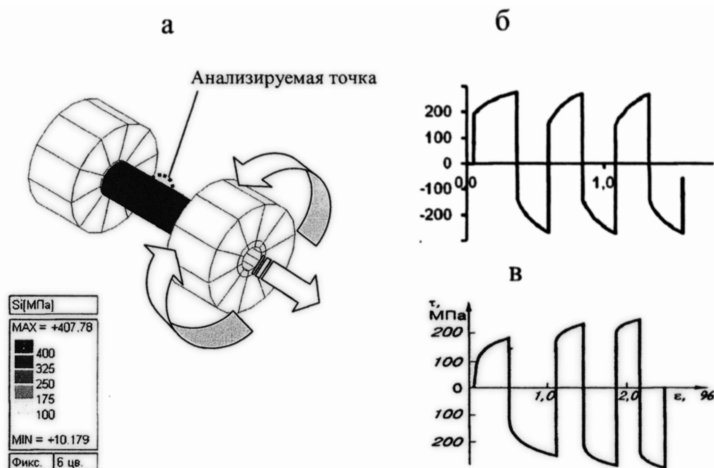


Рис. 4. Накопление односторонних деформаций удлинения при знакопеременном кручении растянутого трубчатого образца (а - КЭ модель и схема приложения нагрузки, б – результат моделирования, в – эксперимент)

Для проверки адекватности разработанного критерия разрушения было проведено моделирование разрушения материала перед фронтом трещины на образцах с простой геометрией образца и трещины.

Для таких образцов ЛМР позволяет рассчитать скорость роста трещины с достаточной точностью. Поэтому сопоставление результатов моделирования с результатами расчетов по эмпирическим формулам ЛМР можно считать сопоставлением с обобщенными результатами большого количества ранее проведенных экспериментов.

В качестве материала для моделирования была выбрана корпусная сталь 15Х2МФА, так как ее свойства достаточно полно представлены в литературе. Для численного эксперимента использовали модели стержней диаметром 200 мм с осесимметричными внутренними кольцевыми трещинами 2 разных диаметров: 20 и 40 мм.

Для уточнения формы острия усталостной трещины была построена модель с мелкой сеткой для прямого моделирования процесса роста усталостной трещины (рис. 5,а). В результате моделирования с аннигиляцией разрушенных КЭ была получена ветвящаяся траектория трещины с постоянной шириной ветвей вблизи вершины трещины и радиусом остроты около 4 мкм. Фотография шлифа, вырезанного из образца с усталостной трещиной, дает картину, весьма близкую к полученной на модели (рис. 5,б).

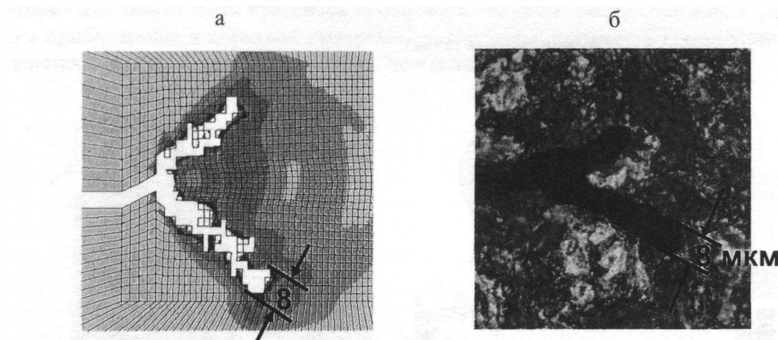


Рис. 5. Развитие усталостной трещины: а – результат компьютерного моделирования, б - отретушированная фотография при 1000-кратном увеличении

Результаты моделирования позволили расчетным путем построить диаграмму Пэриса (рис. 6). Полученная диаграмма показывает, что на основании критерия предельной пластичности хорошо воспроизводится поведение образцов с трещинами разной длины. Точки перегиба и угол наклона кривой скорости роста трещины в зависимости от размаха коэффициента интенсивности напряжения совпадают с экспериментальными данными. Данную закономерность можно использовать для получения свойств материалов без проведения испытаний на выносливость (как известно, такие испытания дороги, длительны и дают большой разброс результатов).

Если при суммировании поврежденности материала не учитывать влияние объемности НДС, то полученная при моделировании скорость трещины оказывается на порядок меньше, чем рассчитанная по формулам ЛМР. Это подтверждает зависимость скорости накопления повреждений при циклическом деформировании от объемности НДС.

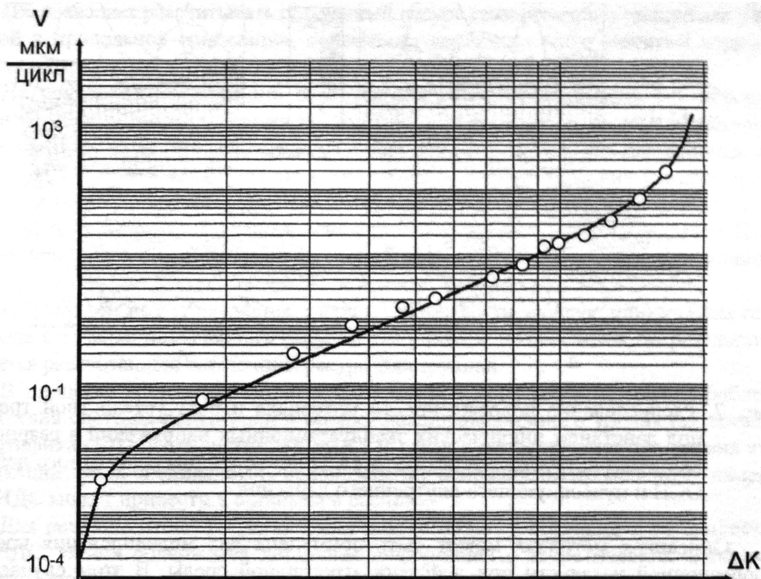


Рис. 6. Диаграмма Париса, построенная по параметрам циклической трещиностойкости материала; точки – результат моделирования с использованием локального критерия разрушения.

Для проверки применимости разработанного критерия разрушения в условиях неоднородного поля остаточных напряжений (характерного для сварных конструкций) была проведена оценка ресурса сварной ремонтной конструкции трубопровода. Результаты моделирования 1500 циклов нагружения представлены на рис 7. Они показывают, что скорость и траектория роста усталостной трещины, а следовательно остаточный ресурс сварной конструкции и размер минимально допустимого размера дефекта существенно зависят от остаточных напряжений.

Таким образом, разработанный критерий позволяет проводить расчет разрушения металла с учетом влияния всех основных факторов, характерных для сварного соединения (неоднородности свойств, дефектов, ОСН).

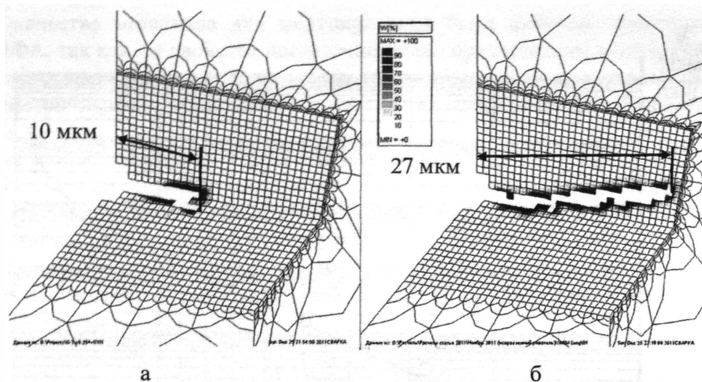


Рис. 7. Распределение поврежденности материала и рост усталостной трещины под действием циклических эксплуатационных напряжений в сварном соединении патрубка: а – без учета ОСН, б – с учетом совместного действия ОСН и пульсирующего внутреннего давления

Описанная методика может быть применена для моделирования процесса коррозионной усталости при действии агрессивной среды. В этом случае ОСН также существенно влияют на скорость роста трещин.

**В четвертой главе** сформулированы требования к методике расчета остаточного ресурса на основе локального критерия разрушения и основные положения разработанной методики. Отличительной особенностью разработанной методики является использование результатов неразрушающего контроля напряженного состояния (НК НДС) газопровода и использование локального критерия разрушения материала для расчета времени до образования трещин от объемных дефектов. Методика была принята в качестве нормативного документа ОАО «Газпром».

Все расчеты в рамках этой методики автоматизированы и осуществляются с помощью программного комплекса «Ресурс газопроводов». Программный комплекс (ПК) был разработан для ОАО «Газпром» на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э.Баумана под руководством А.С. Куркина с участием автора диссертации. ПК «Ресурс газопроводов» учитывает все основные особенности газопроводов: геометрию (размеры сечения трубы, форму, размеры и расположение дефектов с учетом коррозионного и эрозионного износа); свойства материала с учетом условий окружающей среды и деградации этих свойств за время эксплуатации; режимы нагружения (статическую и циклическую составляющую нагрузки от внутреннего давления, остаточных сварочных напряжений, изменения пространственного положения трубопровода и температурных деформаций).

ПК позволяет рассчитывать остаточный ресурс газопроводов с трещинами радиальной и продольной ориентации, объемными дефектами (типа язвенной коррозии вматин и царапин).

На основании информации о состоянии участка газопровода ПК «Ресурс» строит 3-мерную модель участка трубопровода, и передает ее вместе с граничными условиями в расчетный модуль. Набора данных о состоянии газопровода, полученных при типовой процедуре технического диагностирования участка достаточно для проведения расчета. Предусмотрена возможность ввода данных о напряженном состоянии участка на основании инструментального измерения НДС. Расчет напряженного состояния и условий разрушения в ПК «Ресурс газопроводов» проводится методом конечных элементов.

Результатом расчета является вывод о безопасности эксплуатации участка газопровода в течение назначенного ресурса. Если ресурс не обеспечен, то результатом является рассчитанный остаточный ресурс конструкции.

В процессе апробации ПК «Ресурс газопроводов» была выявлена проблема отсутствия системы подготовки и оценки квалификационного уровня (аттестации и сертификации) специалистов НК НДС. В связи с недостаточностью уровня квалификации таких специалистов, использование неправильно проведенных измерений НДС может привести к ошибкам в расчете.

Для решения этой проблемы были разработаны требования к специалистам НК НДС. В них содержится детальная информация о теоретических знаниях и практических навыках, которыми должен обладать специалист в зависимости от уровня его квалификации. Для подготовки специалистов были разработаны «Программа подготовки специалистов по определению напряженно-деформированного состояния технических устройств и сооружений», а также процедура приема квалификационных экзаменов по этой программе. Автор данной диссертации был инициатором и одним из ведущих разработчиков этих документов.

Разработанная программа согласована с ведущими специалистами и организациями, проводящими работы в данной области в т. ч. НТЦ «ДИАТЕКС», ЗАО «Дигаз», ООО «Интерюнис», НПП «Политест», ООО «Энергодиагностика», НПС «Риском» и утверждена Российским обществом по неразрушающему контролю и технической диагностике.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Анализ существующих методов оценки остаточного ресурса показал, что для получения достоверных результатов необходимо не только использовать существующие методы НК но и расширять применение методов НК НДС. Так же необходима разработка метода оценки остаточного ресурса на основе данных НК и НК НДС учитывающая все особенности условий эксплуатации магистральных трубопроводов.

3. Был разработан единый локальный критерий разрушения который может быть использован для моделирования разрушения материала под

воздействием циклических и статических нагрузок от дефекта с произвольной геометрией.

4. Была разработана и интегрирована расчетная модель для расчета упругопластического деформирования металла при знакопеременном нагружении и расчетная модель оценки поврежденности материала на основе единого локального критерия разрушения. Обе модели были интегрированы в ПК «Сварка»

5. По результатам компьютерного моделирования и сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными было выявлено влияние объемности напряженного состояния на процесс разрушения металла при циклическом нагружении.

6. Было подтверждено предположение о едином механизме разрушения металла при циклическом и статическом нагружении. Была разработана методика получения параметров уравнения Париса через такие свойства материала как диаграмма упрочнения и диаграмма зависимости пластичности материала от объемности напряженного состояния.

7. На основе единого локального критерия разрушения была разработана методика оценки остаточного ресурса магистральных трубопроводов с дефектами произвольной формы, учитывающая все особенности эксплуатации магистральных трубопроводов, использующая в качестве исходных данных результаты НК и НК НДС.

8. Разработана программа, методические и учебные документы для подготовки и оценки уровня квалификации персонала по контролю напряженного состояния, которые стали основой системы подготовки специалистов НК НДС. Организована сертификация персонала НК НДС

9. Результаты проведенных исследований использованы при разработке ПК «Сварка», ПАК «Ресурс газопроводов» для оценки прочности и ресурса сварных соединений с дефектами, использовались при разработке нормативных документов, утвержденных в ОАО «Газпром» и при расчетах в рамках совместных работ с ФГУП «ВИАМ» по научно-технический отчёту «Определение механических характеристик титанового сплава ВТ-23 в различных структурных состояниях». Программа подготовки и с сертификации персонала НК НДС легла в основу документа добровольной системы сертификации персонала СДОС – 05-2010 и используется в настоящее время во всех органах по сертификации персонала аккредитованных в соответствии с СДОС 05-2010. Около 1000 специалистов НК НДС прошли обучение и сертификацию с 2010 по 2013 год.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Определение параметров уравнения Париса методом обратного моделирования роста трещины / Г.П. Батов [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73, № 12. С. 41-43.

2. Куркин А.С., Батов Г.П. Методика моделирования знакопеременной упругопластической деформации изотропного материала // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74, № 8. С. 49-58.

3. Kurkin A., Makarov E., Batov G. Limit of plasticity – the unified local fracture criterion for lifetime prediction of welded structures // Safety and Reliability of Welded Components in Energy and Processing Industry: Proceedings of the IIW International Conference . Graz (Austria), 2008. P. 559-566.

4. Батов Г.П. Влияние объемности напряженно-деформированного состояния на скорость роста усталостных трещин // Технология машиностроения. 2008. № 12. С. 23-25.

5. Куркин А.С., Батов Г.П. Предельная пластичность – универсальная локальная критериальная характеристика разрушения для оценки ресурса сварных конструкций // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76, № 6. С. 45-54.

6. Kurkin A.S., Batov G.P. Ultimate Plasticity – the Universal Local Fracture Criterion for Lifetime Prediction of Welded Structures // Inorganic Materials. 2011. V. 47, №14. P. 1608-1617.

7. Батов Г.П. 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.

8. Куркин А.С., Батов Г.П., Пономарева И.Н. Расчетная оценка ресурса сварной конструкции с учетом технологических факторов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79, № 3. С. 52-59.

9. Батов Г.П. Подготовка и сертификация специалистов в области определения напряженно – деформированного состояния - важнейший фактор повышения технической безопасности опасных промышленных объектов // Контроль. Диагностика. 2010. № 11. С. 49-56.