

На правах рукописи

ШНАЙДЕР АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ И СТРУКТУРЫ СТАЛИ
НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ**

Специальности: 05. 02. 01 - «Материаловедение»
(машиностроение в нефтегазовой отрасли)

05. 26. 03 - «Пожарная и промышленная безопасность»
(нефтегазовая отрасль)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

УФА – 2002

Работа выполнена в Уфимском государственном нефтяном техническом университете

Научные руководители:	доктор технических наук Гареев Алексей Габдулович
	доктор технических наук Тухбатуллин Фарит Гарифович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Загорский Валерий Куприянович
	кандидат физико-математических наук, доцент Сергеев Владимир Ильич
Ведущая организация	ОАО «Урало-Сибирские магистральные нефтепроводы им. Д.А. Черняева»

Защита состоится 11 декабря 2002 г. в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета 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 2002 года

Ученый секретарь
диссертационного совета

Ибрагимов И.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Сооружения нефтегазовой отрасли являются одними из наиболее металлоемких промышленных объектов. Основную их долю составляют оболочковые конструкции, к которым относятся, в частности, технологические и магистральные трубопроводы, являющиеся согласно Федеральному закону от 21.07.97 №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» опасными производственными объектами. Многочисленные отказы таких объектов наносят значительный материальный и экологический ущерб экономике страны.

Наиболее опасные виды отказов нефтегазопроводов связаны с образованием и развитием дефектов в очаговой зоне разрушения под воздействием факторов эксплуатационного происхождения (действие коррозионной среды, статических и динамических напряжений, температуры и т.д.). В последние годы актуальность проблемы повышения долговечности металлоконструкций возрастает в связи с увеличивающейся напряженностью их работы и повышающейся коррозионной активностью продукции нефтегазовых месторождений.

В диссертации на основании анализа результатов исследований отечественных и зарубежных ученых по проблеме разрушения металлоконструкций и работ автора в области изучения свойств металла очаговых зон разрушения, ряда факторов металлургического и эксплуатационного происхождения рассмотрены вопросы прогнозирования долговечности металлоконструкций, подверженных совместному воздействию статических, динамических нагрузок и коррозионных сред.

Несмотря на большой объем опубликованных исследований в области увеличения долговечности и безопасной эксплуатации металлоконструкций, подверженных коррозионно-механическому разрушению, некоторые вопросы все же остаются не изученными. Среди них можно выделить следующие:

1. Требуется дальнейшего исследования влияние факторов металлургического и эксплуатационного происхождения на стойкость трубных сталей в условиях статического и динамического нагружений, в том числе в присутствии корро-

зионно-активных сред.

2. Необходимо более детальное исследование влияния структуры металла на коррозионное растрескивание под напряжением (КРН).

3. Требуют дальнейшего совершенствования методы прогнозирования разрушений металлоконструкций, подверженных воздействию циклических нагрузок.

В связи с вышеизложенным **целью работы** является исследование влияния дефектов металла, статических и динамических нагрузок, активных сред на долговечность и безопасную эксплуатацию нефтегазопроводов.

Реализация этой цели в диссертационной работе осуществляется путем постановки и решения следующих **основных задач**:

- выявить и оценить степень влияния наиболее часто встречающихся дефектов труб на разрушение нефтегазопроводов;
- исследовать влияние длительной эксплуатации трубной стали 19Г на изменение ее структуры и физико-механических свойств;
- исследовать циклическую трещиностойкость стали 20 в условиях, моделирующих натурные, разработать и апробировать метод оценки остаточного ресурса металлоконструкций, изготавливаемых из этой стали;
- исследовать влияние микроструктуры трубных сталей на скорость коррозионного растрескивания под напряжением и их пассивацию в условиях, моделирующих натурные.

Научная новизна

- Выявлены причины образования локального повреждения стенки трубы нефтегазопровода в виде вздутия, обусловленного микроструктурной и физико-механической неоднородностью металла.
- Получена новая зависимость скорости роста коррозионно-усталостной трещины, объединяющая стадии ее замедленного и стабильного роста, позволяющая рассчитывать с большей точностью остаточный ресурс оборудования, эксплуатируемого в условиях малоциклового коррозионной усталости.
- На основании результатов исследования процессов пассивации трубных сталей, сопровождающихся смещением электродного потенциала в сторону поло-

жительных значений, разработан патентно чистый метод обнаружения очагов КРН.

Практическая значимость и реализация результатов работы

Мероприятия по диагностике, предотвращению отказов магистральных газопроводов, подверженных КРН, внедрены в практику их эксплуатации в ООО «Баштрансгаз», «Пермтрансгаз». Исследования хладноломкости металла труб на выходе из газохранилища позволили повысить безопасную эксплуатацию газопровода ООО «Баштрансгаз». По результатам работы опубликовано два учебно-методических пособия. Результаты работы используются при подготовке и переподготовке специалистов нефтегазового комплекса в институте повышения квалификации УГНТУ.

На защиту выносятся теоретическое обобщение известных и полученных автором результатов исследований коррозионно-механических разрушений, воздействия дефектов металла труб на работоспособность оборудования нефтегазовой отрасли.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на:

- 50-й научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа, 1999);
- 51-й научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа, 2000);
- Международной научно-технической конференции «Наука и технология углеводородных дисперсных систем» (Уфа, 2000);
- Межрегиональной научно-методической конференции «Проблемы нефтегазовой отрасли» (Уфа, 2000);
- 52-й научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа, 2001);
- Научно-производственной конференции «Проблемы нефти и газа» в рамках III конгресса нефтегазопромышленников России (Уфа, 2001);
- 53-й научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа, 2002);

- Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов (Уфа, 2002).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 печатных трудов, в числе которых 1 патент России, 2 учебно-методических пособия, 15 статей и тезисов докладов.

Диссертационные исследования проводились в соответствии с ГНТП АН РБ по теме «Структурно-энергетическое состояние металлов и долговечность напряженно-деформированных металлоконструкций в условиях механохимической коррозии» за 1999-2002 г.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 122 наименований и 4 приложений. Диссертация содержит 108 страниц машинописного текста (без приложений) и включает 45 рисунков, 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика работы, сформулирована цель и основные задачи исследования.

В первой главе проведен анализ опубликованных работ по проблеме отказов оборудования нефтегазовой отрасли, который позволил выделить основные факторы металлургического и эксплуатационного происхождения, определяющие его работоспособность и безопасную эксплуатацию.

К факторам металлургического происхождения следует отнести дефекты, заложенные в процессе производства стального листа, структурные свойства стали, ее состав и содержание легирующих элементов.

К наиболее опасным факторам, проявляющимся в процессе эксплуатации нефтегазового оборудования, в настоящее время относят некоторые виды коррозионно-механического разрушения, сопровождающиеся зарождением и развитием трещин в теле металлоконструкции. Причем рост трещин на начальной стадии разрушения в его очаге в большинстве случаев происходит по хрупкому механизму.

Охрупчивание стали может происходить как при статическом так и при динамическом нагружении. Большое количество оболочковых конструкций нефтегазовой отрасли в течение срока службы претерпевают порядка 10^5 циклов изменения нагрузки. Циклические нагрузки вызывают малоцикловую усталость и коррозионную усталость металла в концентраторах напряжений. Несмотря на известный факт о коррозионно-механической природе разрушения нефтегазового оборудования и стадийности усталостного разрушения, не рассмотрены некоторые вопросы развития усталостных трещин.

При рассмотрении процессов охрупчивания металла очаговых зон было выявлено, что причины, их вызывающие, для ряда конкретных разрушений нефтегазового оборудования изучены в недостаточно полной мере.

Во второй главе приведены стандартные и специально разработанные методики выполнения исследований. К их числу относятся методы макро- и микро-металло- и фрактографического анализа, испытания на растяжение и ударный изгиб в условиях отрицательных температур, электрохимические исследования и испытания на малоцикловую коррозионную усталость.

В третьей главе рассмотрены наиболее часто встречающиеся типы дефектов нефтегазового оборудования оболочкового типа, такие как потеря устойчивости, поверхностные риски и царапины, расслоения в металле.

На примере реальных аварий и инцидентов нефтегазового оборудования оболочкового типа, в частности, трубопроводов, рассмотрено воздействие различного вида дефектов металла на безотказность конструкции.

Многие дефекты, рассмотренные в диссертации, упоминались в работах, опубликованных ранее. Так, например, расслоение металла, вызванное наличием внутренних ликвационных полос, или же потеря устойчивости трубы из-за образования гофр являются известными типами дефектов, встречающихся при эксплуатации трубопроводных систем. Но в то же время в работе был обнаружен новый вид локального вспучивания участка трубы большого диаметра нефтегазового сортамента с потерей ее устойчивости не объясняемый ни с точ-

ки зрения механизма гофрообразования, ни с позиции блистерингообразования. Причем труба приобрела свою первоначальную форму через 14 суток после снятия давления перекачиваемого газа. Данный вид дефекта по имеющимся данным на линейной части магистральных газопроводов был обнаружен впервые. Изучение микроструктуры показало искажение строчечности металла в области дефекта (рис. 1). Микротвердость металла в области дефекта изменяется скачкообразно в пределах 1100...2200 Н/мм² (рис. 2).

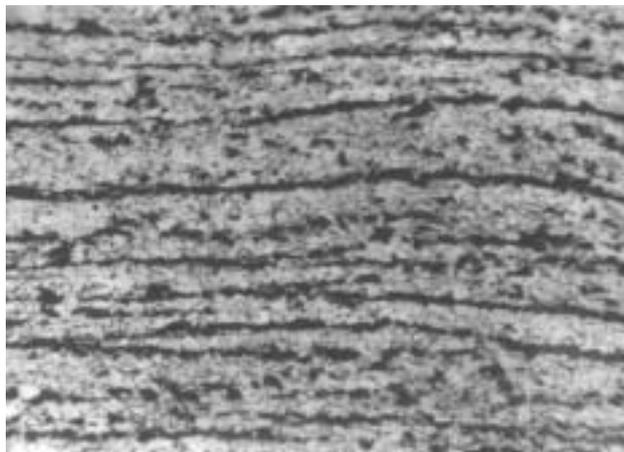


Рис. 1. Искажение строчечности структуры металла в области дефекта

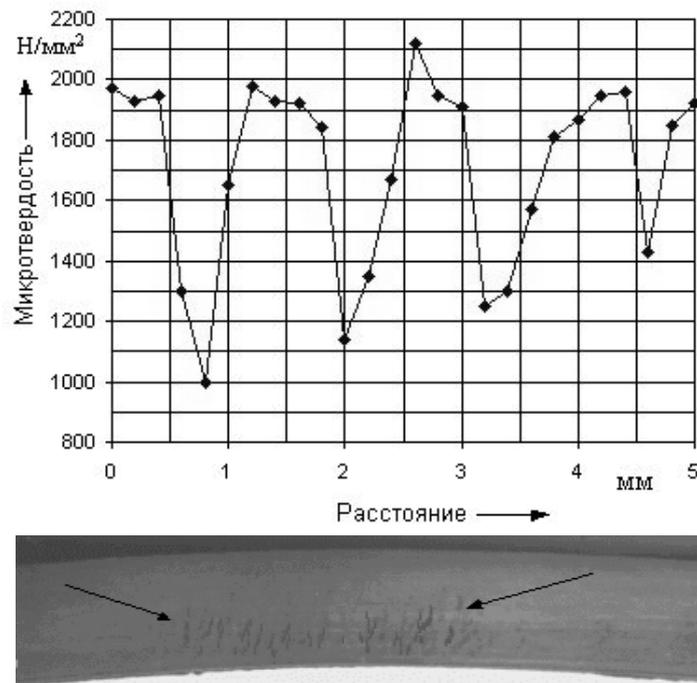


Рис. 2. Распределение микротвердости металла по сечению дефекта. Стрелками показаны выявленные ликвации

Обычно такого рода дефекты сопровождаются расслоением металла, за счет скопления водорода по ликвациям и внутренним микрополостям. Однако в исследованном случае металл в области дефекта плотный без расслоений. Его структура неоднородна (рис. 3), что выражается в неравномерной полосчатости по всей длине дефекта.

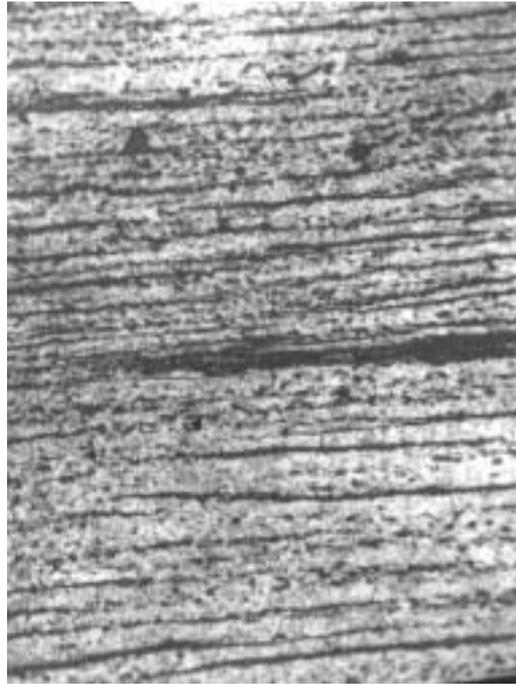


Рис. 3. Неоднородность микроструктуры по сечению дефекта

В результате проведенных исследований было установлено, что потеря устойчивости оболочки трубы была вызвана наличием участков пониженной прочности, что может объясняться низким металлургическим качеством стали в локальной области.

К известным типам дефектов металла труб относятся закаты окалины, расслоения, язвы. С целью исследования их влияния на работоспособность нефтегазового оборудования в условиях циклических нагрузок были проведены испытания образцов (сталь В4сп), отобранных с эксплуатируемого нефтепровода с имеющимися внутренними дефектами и покрытых отдельными язвами глубиной до 3 мм с внутренней стороны трубы. Было выявлено, что обширные язвы с внутренней стороны нефтепровода и скрытые полости (рис. 4) оказывают зна-

чительно большее влияние, чем поверхностные риски, задиры и царапины.

Испытания на малоцикловую усталость ($\epsilon=0,23$) в условиях чистого изгиба показали, что разрушения металла образцов толщиной 7 мм происходили в стороне от нанесенного концентратора напряжений (краевой поперечный надрез глубиной 1 мм с углом при вершине 45°). Число циклов до разрушения образцов доходило до 7000...8000. В тех же условиях испытаний для образцов, вырезанных из металла нефтепровода, не имеющего скрытых дефектов, число циклов до разрушения достигало не менее 14000.

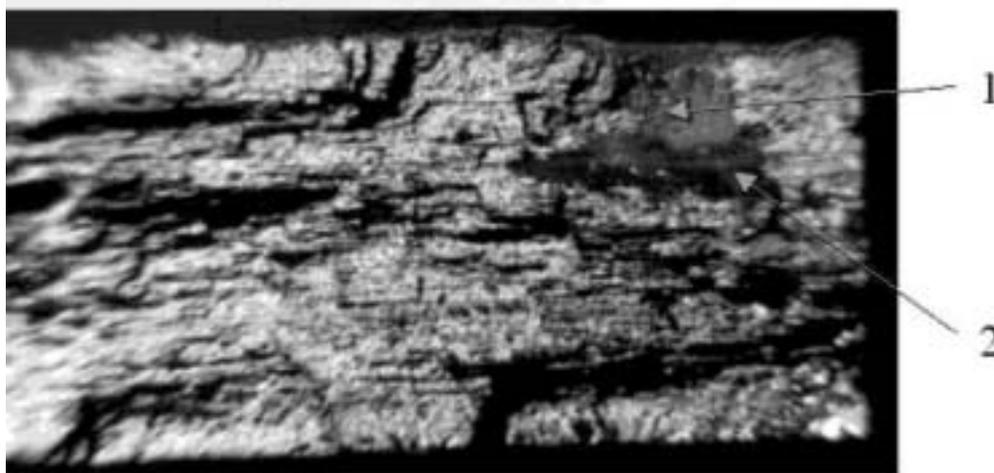


Рис. 4. Усталостный излом образца: 1 – ржавчина, 2 – магнетит

Известно, что для изготовления ответственных конструкций нефтегазовой отрасли часто используются низколегированные стали. Причем присутствие легирующих элементов сложным образом оказывает влияние на температуру хладноломкости металла. Кроме того, длительная эксплуатация трубопровода может привести к снижению пластических свойств стали в связи с возможным деформационным старением и соответственно к повышению порога хладноломкости. Поэтому в работе были проведены исследования влияния отрицательных температур на физико-механические свойства трубной стали 19Г, темплеты которой были отобраны с действующего газопровода. Были испытаны образцы, вырезанные из труб аварийного запаса и труб после 20 лет эксплуатации на выходе из газохранилища и в пяти километрах от него.

Проведенные испытания на растяжение и ударный изгиб показали, что действительно с понижением температуры прочность и твердость стали повышаются, но снижается вязкость и возрастает возможность хрупкого разрушения. Порог хладноломкости для стали 19Г определяли по зависимости ударной вязкости от температуры. Его значение находилось в пределах от минус 10 до минус 12°C (рис. 5).

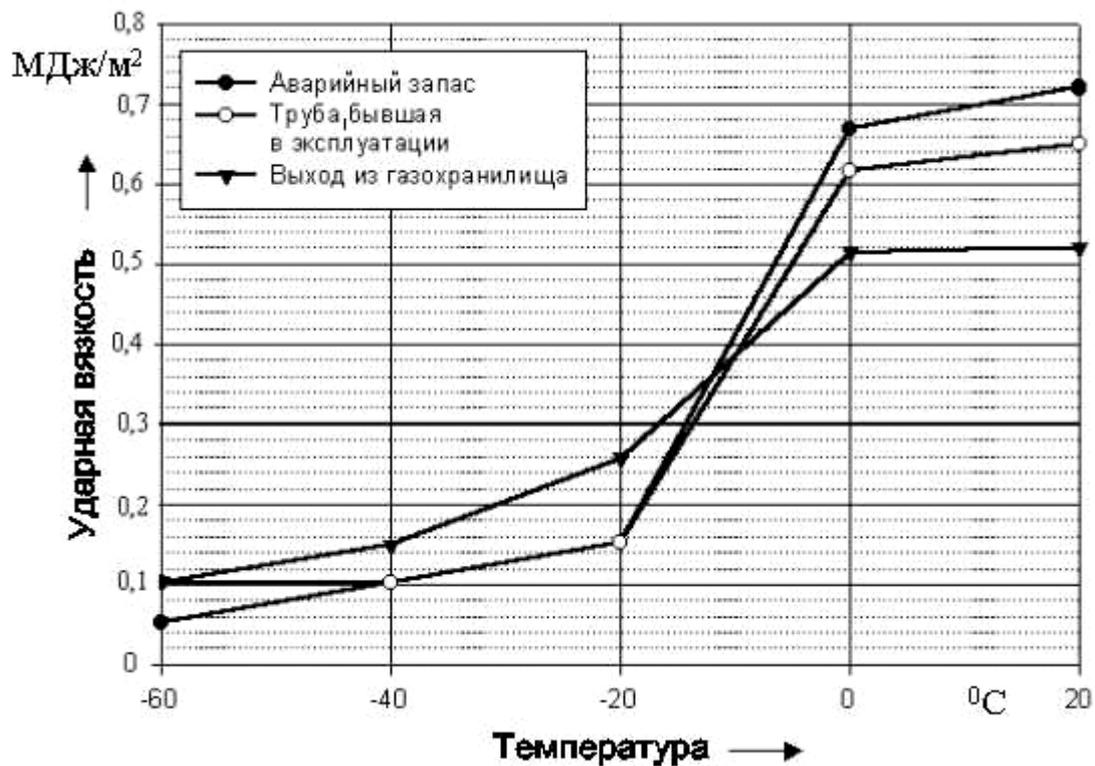
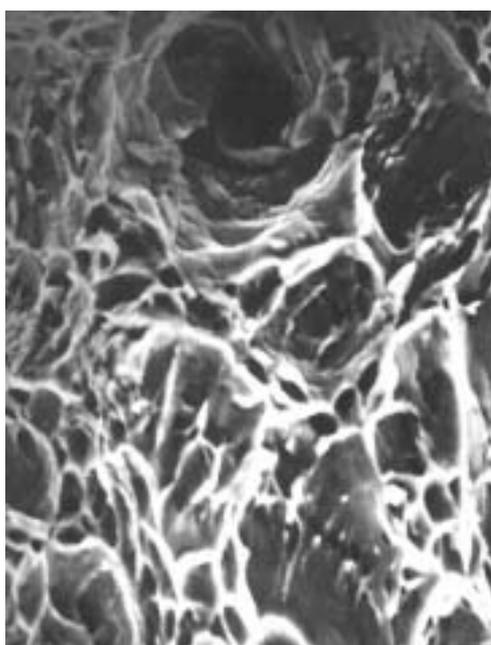


Рис. 5. Зависимость ударной вязкости стали 19Г от температуры

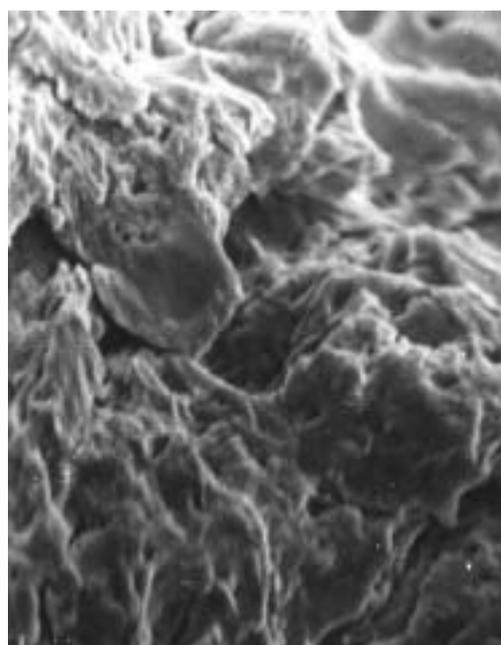
Дополнительно были проведены микрофрактографические исследования поверхностей изломов при различных температурах испытаний (рис. 6) и определен порог хладноломкости стали по количеству хрупкой и вязкой составляющих. Найденное при этом значение порога хладноломкости совпало с величиной, приведенной выше.

Проведенными испытаниями на растяжение в указанном интервале температур было выяснено, что значения временного сопротивления, предела текучести, относительного удлинения и сужения для образцов трубной стали 19Г по-

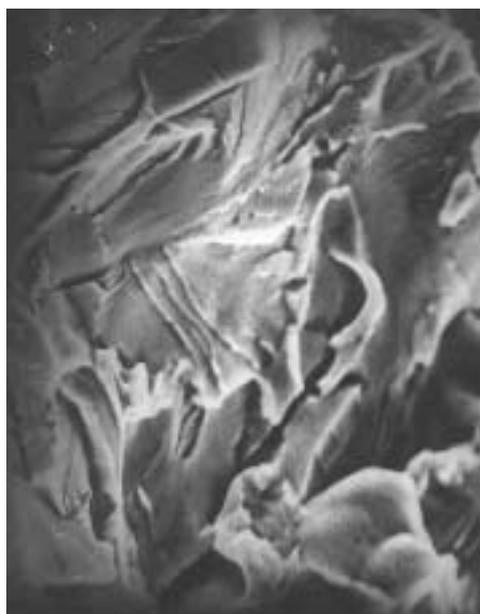
сле 20 лет эксплуатации газопровода в исследованном интервале температур и труб аварийного запаса различаются в пределах ошибки эксперимента. Таким образом, процессы, протекающие в металле, связанные с длительной эксплуатацией трубопровода, практически не повлияли на изменение физико-механических свойств стали 19Г.



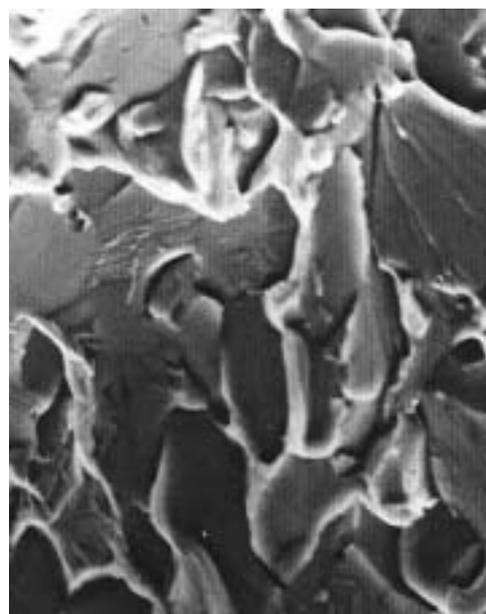
а



б



в



г

Рис. 6. Микрофрактограммы стали 19Г (x1500): а – 20⁰С; б – минус 15⁰С; в – минус 40⁰С; г – минус 60⁰С

На основании полученных данных были даны рекомендации по повышению безопасной эксплуатации участка газопровода-отвода на выходе из подземного хранилища газа.

Четвертая глава посвящена изучению ряда факторов эксплуатационного происхождения, определяющих долговечность металлоконструкций нефтегазовой отрасли.

Анализ условий эксплуатации и характера разрушений нефтепроводов показывает, что наряду со статической последние испытывают циклически изменяющуюся нагрузку, способную вызвать малоцикловую усталость. Очагами зарождения усталостных трещин являются дефекты металла, величина напряжений в которых, в ряде случаев, может превышать предел текучести стали. Вклад коррозионной среды в процесс зарождения и развития усталостной трещины в настоящее время определен в не достаточно полной мере.

Для подземных объектов нефтегазовой отрасли приэлектродная среда на внешней поверхности трубопровода формируется под воздействием катодной поляризации на грунтовый электролит. При этом происходит образование солей угольной кислоты и соответственно подщелачивание грунтового электролита в приэлектродном слое. Присутствующие в грунте и составе транспортируемого продукта соли, содержащие ионы хлора, влияют на скорость коррозионно-механических процессов. Поэтому в качестве модельной среды использовался водный раствор $1\text{н Na}_2\text{CO}_3 + 0,5\text{н NaHCO}_3 + 3\% \text{NaCl}$. Были исследованы три случая эксплуатации подземных сооружений: «недозащита» – потенциал поляризации равен минус 0,65 В по насыщенному каломельному электроду (НКЭ); регламентированное ГОСТ значение потенциала - минус 0,9 В (НКЭ) и «перезащита» сооружения - минус 1,3 В (НКЭ). Кроме того, были проведены испытания стали 20 на воздухе и в указанных средах без поляризации. Вид усталостных трещин представлен на рис. 7.

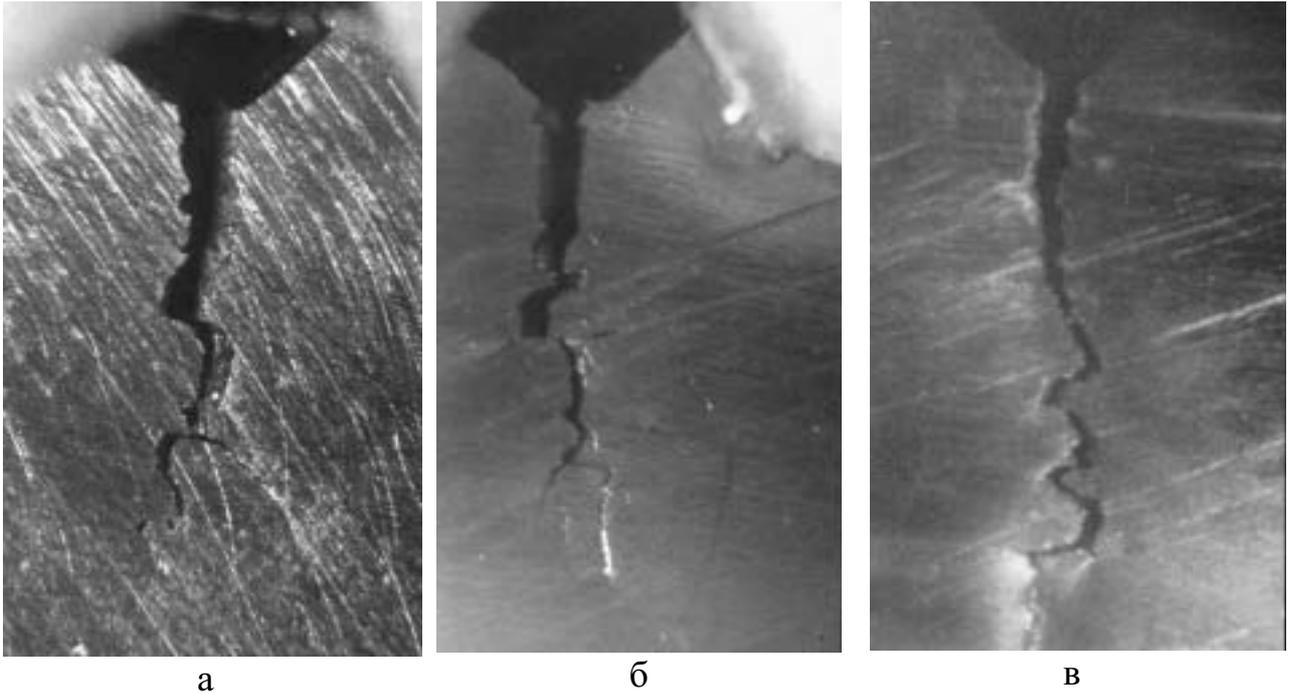


Рис. 7. Коррозионно-усталостные трещины $\times 20$: а- в среде без поляризации; б- в среде с поляризацией $-0,9\text{В}$ (НКЭ); в- в среде с поляризацией $-1,3\text{ В}$ (НКЭ)

На рис. 8 приведена кинетика развития трещин.

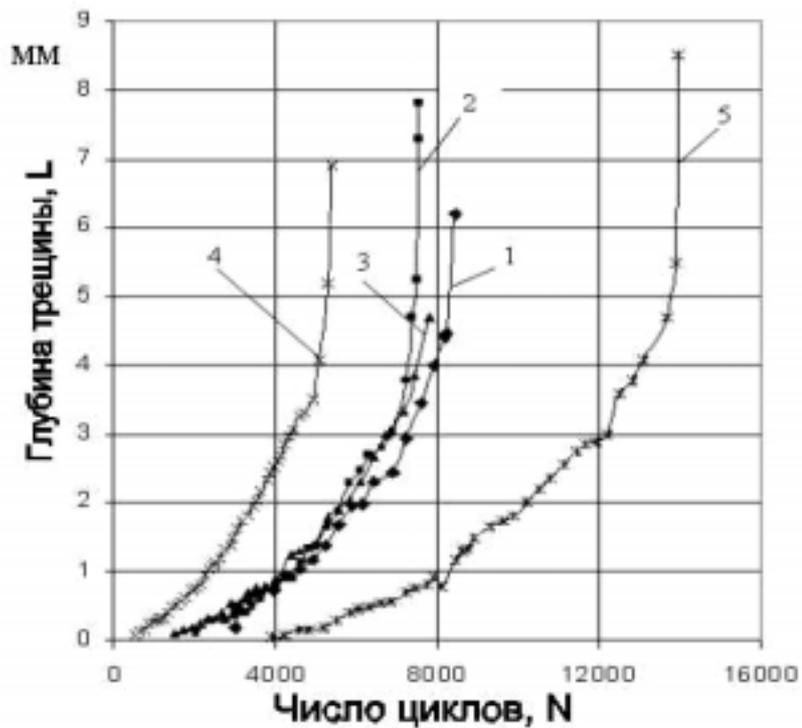


Рис. 8. Зависимость глубины трещины от количества циклов нагружения (водный раствор $1\text{н Na}_2\text{CO}_3 + 0,5\text{н NaHCO}_3 + 3\% \text{NaCl}$): 1 – в среде без поляризации; 2, 3, 4 – в среде с поляризацией ($\varphi = -0,6, -0,9, -1,3\text{ В НКЭ}$ соответственно); 5 – на воздухе

Для расчета остаточного ресурса металлоконструкций, эксплуатирующихся в условиях малоциклового усталости, в настоящее время используют методики, основанные на интегрировании зависимости скорости роста трещины $\frac{dl}{dN}$ от изменения коэффициента интенсивности напряжения ΔK (рис. 9):

$$\frac{dl}{dN} = F(\Delta K), \quad (1)$$

где l – глубина трещины, мм;

N – число циклов;

ΔK – изменение коэффициента интенсивности напряжения за один цикл, МПа·м^{1/2}.

В общем случае вид зависимости найден Г.П. Черепановым:

$$\frac{dl}{dN} = -\beta \left(\frac{K_{\max}^2 - K_{\min}^2}{K_c^2} + \ln \frac{K_c^2 - K_{\max}^2}{K_c^2 - K_{\min}^2} \right), \quad (2)$$

где β – эмпирический коэффициент, мм/цикл;

K_{\max} – максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений, МПа·м^{1/2};

K_{\min} – минимальное значение коэффициента интенсивности напряжений, МПа·м^{1/2};

K_c – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, МПа·м^{1/2}.

Значения β , K_{\max} , K_{\min} и K_c определяются экспериментально.

В настоящее время расчет остаточного ресурса производят, как правило, только для стадии стабильного роста усталостной трещины (рис. 9), на которой скорость роста трещины подчиняется степенной зависимости Пэриса - Эрдогана:

$$\frac{dl}{dN} = C (\Delta K)^m. \quad (3)$$

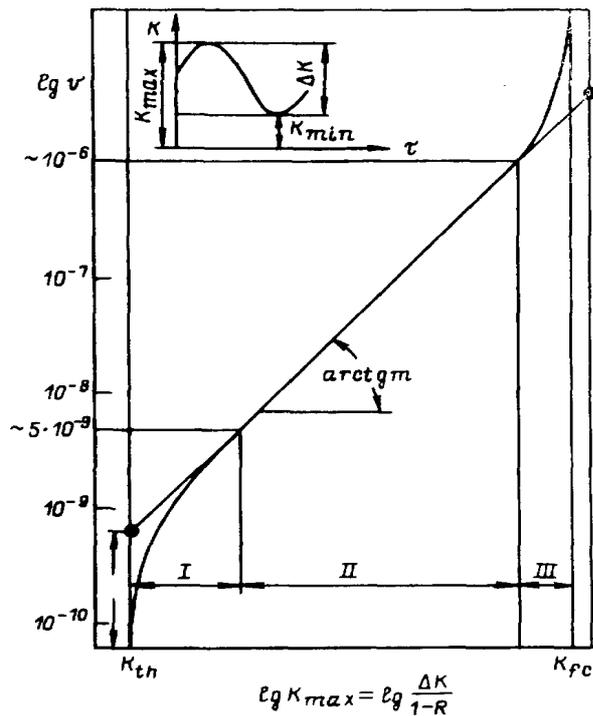


Рис. 9. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения

При этом эмпирические коэффициенты C [мм/(цикл·МПа·м^{1/2})] и m определяются графически, используя среднюю часть кинетической диаграммы усталостного разрушения.

Используемое ограничение приводит к погрешности определения остаточного ресурса металлоконструкций, имеющих трещины небольшой глубины. Поэтому, с целью увеличения точности расчета остаточного ресурса, в работе определялся вид зависимости $\frac{dl}{dN} = F(\Delta K)$ на первой и второй стадиях роста усталостной трещины (см. рис. 9) и находились ее параметры. Проведенные исследования показали, что прямой подбор вида функциональной зависимости и ее параметров, даже используя различные процедуры сглаживания экспериментальных данных, приводит к значительной ошибке, обусловленной ступенчатым характером роста трещины. В связи с вышеизложенным предварительно определялся вид и параметры зависимости глубины трещины от числа циклов нагружения. Результаты обработки экспериментальных данных приведены в табл. 1.

Зависимость глубины усталостной трещины от числа циклов
нагружения

Условия испытания	F, м/цикл	g	Коэффициент корреляции
Модель $L=F*N^g$			
Воздух	$6,5 \cdot 10^4$	0,30	0,99
Без поляризации	$6,9 \cdot 10^4$	0,39	0,98
$\varphi=-0,6$ В НКЭ	$5,4 \cdot 10^4$	0,36	0,99
$\varphi=-0,9$ В НКЭ	$9,4 \cdot 10^4$	0,45	0,99
$\varphi=-1,3$ В НКЭ	$1,4 \cdot 10^4$	0,60	0,99

Анализ данных, полученных в результате ряда ранее проведенных исследований, показал, что рост усталостной трещины в координатах «глубина трещины - число циклов нагружения» также подчиняется степенной или экспоненциальной зависимости.

Полученные графики были перестроены в координатах $\frac{dl}{dN}$ от $F(\Delta K)$ (рис. 10).

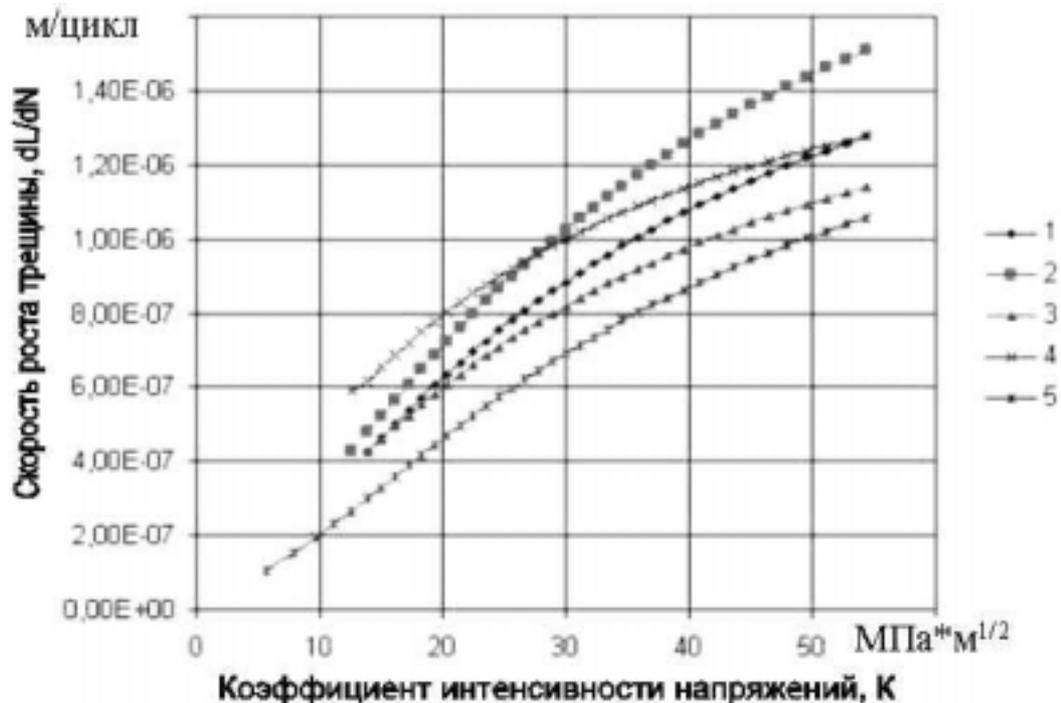


Рис. 10. Зависимость скорости роста трещины от коэффициента интенсивности напряжений: 1 – в среде без поляризации; 2, 3, 4 – в среде с поляризацией ($\varphi=-0,6, -0,9, -1,3$ В НКЭ соответственно); 5 – на воздухе

Эмпирические модели и их параметры приведены в табл. 2. В результате проведенного анализа было установлено, что в зависимости от условий проведения эксперимента наиболее адекватно рост трещин описывается логарифмической и степенной (показатель степени меньше единицы) функциями.

Таблица 2

Эмпирические модели, описывающие процесс роста усталостной трещины

Условия эксперимента	Коэффициенты a, b, м/цикл	
$\frac{dl}{dN} = a + b \cdot \ln(p \cdot \Delta K) *$		
	a	b
В среде без поляризации	-3,2E-06	1,3E-06
В среде с поляризацией $\phi = -0,6$ В	-4,3E-06	1,7E-06
В среде с поляризацией $\phi = -0,9$ В	-1,8E-06	8,1E-07
В среде с поляризацией $\phi = -1,3$ В	-4,2E-06	1,7E-06
$\frac{dl}{dN} = a + b \cdot \sqrt{p \cdot \Delta K} *$		
	a	b
На воздухе	-4,5E-07	2,1E-07

* p – единичный нормирующий множитель, $1/(\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2})$.

Расчет остаточного ресурса металлоконструкции, имеющей усталостные трещины, производится численным интегрированием выражения (1) с использованием Y-тарировки для соответствующей используемой схемы нагружения:

$$N = \int_{l_{нач}}^{l_{кр}} \frac{l}{F(\Delta K)} dl, \quad (4)$$

где $l_{кр}$ – критическая глубина трещины;

$l_{нач}$ – начальная глубина трещины.

Критическая глубина трещины зависит от многих параметров. Для случая разрушения нефтегазопроводов $l_{кр}$ может быть определена через толщину стенки трубы (δ) как $l_{кр} = 0,7 \cdot \delta$. Коэффициент интенсивности напряжения определялся по известной зависимости для полосы с краевой поперечной трещиной.

Выполненные в работе вычисления показали, что аналитическое интегрирование (1) для вышеперечисленных условий приводит к громоздким аналити-

ческим выражениям, поэтому расчет остаточного ресурса проводили с использованием ЭВМ. На рис. 11 в качестве примера приведены результаты расчета остаточного ресурса в зависимости от изменения глубины трещины и внутренних напряжений в стенке оболочковой конструкции, работающей в условиях воздействия среды $1н Na_2CO_3 + 0,5н NaHCO_3 + 3\% NaCl$ и поляризации минус 0,9 В (НКЭ).

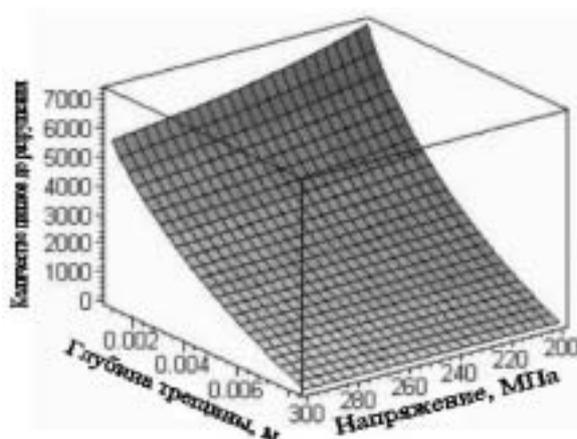


Рис. 11. Остаточный ресурс нефтепровода при малоцикловой усталости в условиях, моделирующих эксплуатационные

Проведенный сравнительный анализ результатов расчета остаточного ресурса, выполненного по предлагаемой и традиционной методике, использующей модель Пэриса – Эрдогана, показал, что точность его определения возросла на 20-25% за счет учета начальной стадии развития трещины.

Как было показано в главе 1, одним из характерных видов коррозионно-механического разрушения нефтегазового оборудования является КРН.

Скорость роста трещин при КРН зависит от ряда факторов, таких как температура стенки трубы, состав грунтовой среды, марка стали и др. Однако в настоящее время остается малоизученным вопрос о влиянии микроструктуры стали на скорость роста трещин при КРН.

В диссертационной работе проведен анализ структуры трубных сталей, наиболее часто используемых для изготовления линейной части газопроводов (стали марок 17Г1С, 17Г2СФ и групп прочности X65 (Маннесманн), X70 (Валлурек)). Образцы этих сталей были отобраны из очаговых зон аварийных раз-

рушений магистральных газопроводов по причине КРН на территории России и СНГ. Это низколегированные стали феррито-перлитного класса, включая стали контролируемой прокатки.

Коррозионное растрескивание на внешней поверхности трубы проявляется в виде одиночных трещин или их систем, ориентированных в основном вдоль образующей трубы. Известно, что в очагах растрескивания отсутствуют следы интенсивной общей и язвенной коррозии. Однако в высокоминерализованных грунтах скорость КРН замедляется в 2-3 раза, и в ряде случаев глубина коррозионных язв одного порядка с глубиной трещин. Поэтому в работе проводились исследования коррозионной стойкости трубных сталей в растворе 3%-ного NaCl и склонности к КРН в растворе 1н Na₂CO₃+0,5н NaHCO₃. Причем эффективная скорость роста стресс-коррозионной трещины рассчитывалась по известной зависимости с использованием данных реальных отказов магистральных газопроводов.

Микроструктурным анализом было выяснено, что с уменьшением балла зерна и увеличением балла строчечности скорость общей коррозии металла уменьшается. В то же время эффективная скорость роста трещины при КРН увеличивается (табл. 3).

Таблица 3

Влияние структуры трубных сталей на их коррозионные свойства

Показатели	17Г1С	17Г2СФ	X65 (Маннесманн)	X70 (Валлурек)
Величина зерна, балл	10	12	11	12
Строчечность, балл	2	5	4	3
Максимальная плотность тока анодного растворения, А/м ²	3,86	6,61	5,48	9,23
Скорость общей коррозии К, мм/год	1,05	0,84	0,89	0,7
Эффективная скорость роста трещины при КРН Vэфф, мм/год	0,46	0,83	0,76	1,2

Это, по-видимому, связано с тем, что коррозионное растрескивание газопроводов возникает под действием пассивирующей среды в местах локального разрушения пассивной пленки. Об этом также свидетельствуют результаты измерений максимальных плотностей анодного тока, которые коррелируют со скоростями развития растрескивания. Проведенное в работе изучение свойств «металл – приэлектродная среда» в условиях протекания КРН позволило разработать методику определения очагов стресс-коррозионного поражения (Патент №2175440 «Способ определения мест коррозионного растрескивания»).

На основании проведенных исследований могут быть сделаны следующие **основные выводы:**

1. Установлено, что в ряде случаев отклонение физико-механических свойств и структуры стали в ограниченной области приводит к местной потере устойчивости оболочки трубы в виде локального вздутия. На основании экспериментальных исследований выявлено, что внутренние дефекты труб в виде закатов окалины и расслоений в условиях циклического воздействия являются в 1,75...2 раза более опасными концентраторами напряжений по сравнению с поверхностными концентраторами в виде рисок, задиров и царапин.

2. Проведен комплекс физико-механических, микроструктурных и микрофрактографических исследований стали 19Г после 20 лет эксплуатации. При этом установлено, что длительная эксплуатация трубопровода в условиях возможного деформационного старения не привела к существенному снижению физико-механических свойств, что свидетельствует о возможности ее дальнейшей безопасной эксплуатации при температуре не ниже минус 10 °С.

3. Исследование процесса развития усталостной трещины с момента зарождения до стадии неконтролируемого разрушения позволило установить зависимость ее скорости от коэффициента интенсивности напряжений, которая во многих случаях подчиняется логарифмическому закону. Использование этой зависимости позволило на 20-25% повысить точность расчета остаточного ресурса металлоконструкций, имеющих усталостные трещины на стадии их за-

медленного роста.

4. Анализ структуры металла очаговых зон труб, вышедших из строя вследствие аварий и инцидентов на магистральных газопроводах по причине КРН, показал незначительное ее влияние на эффективную скорость роста стресс-коррозионной трещины. На основании результатов изучения процесса КРН трубных сталей в лабораторных условиях выявлено смещение электродного потенциала в положительном направлении на участках, предрасположенных к КРН, что легло в основу разработки метода обнаружения очагов стресс-коррозии.

**Основные результаты диссертации опубликованы
в научно-технических печатных работах:**

1. Абдуллин И.Г., Гареев А.Г., Мостовой А.В., Асадуллин М.З., Шнайдер А.А. Разработка неразрушающего метода диагностики и обнаружения очагов стресс-коррозии магистральных газопроводов.// Состояние и перспективы развития прогрессивных технологий, новых технических средств и оптимальных методов организации ремонта линейной части магистральных газопроводов: Сб.– М.: ИРЦ ОАО «Газпром», 2000. – С.157-159.
2. Абдуллин И.Г., Гареев А.Г., Шнайдер А.А. Влияние микроструктуры на скорость роста трещин при коррозионном растрескивании под напряжением.// Проблемы нефтегазовой отрасли: Материалы науч.-технич. конф.– Уфа: УГНТУ, 2000.– С.29-30.
3. Определение параметров трещиностойкости сталей в условиях малоцикло-вой коррозионной усталости: Учебно-методическое пособие к лабораторной работе./ Сост. А.Г. Гареев, М.А. Худяков, А.А. Шнайдер.– Уфа: УГНТУ, 2000.-12 с.
4. Шнайдер А.А. Проблема стресс-коррозии магистральных газопроводов на территории Республики Башкортостан.// Севергеозкотех-2000: Материалы

межрегиональной молодежной науч. конф.– Ч1. – Ухта, 2000.– С. 88-90.

5. Пат. 2175440 РФ Способ определения мест коррозионного карбонатного растрескивания / Абдуллин И.Г., Мостовой А.В., Гареев А.Г., Шнайдер А.А., Асадуллин М.З. Заявлено 13.03.00; Опубл. 27.10.01; Бюл.№30.
6. Гареев А.Г., Худяков М.А., Абдуллин И.Г., Шнайдер А.А. Испытание трубных сталей на ударный изгиб.// 52 науч.-техн. конф. : Тез. докл.– Уфа: УГНТУ, 2001. – С. 55.
7. Гареев А.Г., Худяков М.А., Шнайдер А.А. Определение остаточного ресурса металлоконструкций методом механики разрушения.// Нефтепереработка и нефтехимия – проблемы и перспективы: Науч. тр. III конгресса нефтегазопромышленников России.– Уфа: ООО «Стерх», 2001.– С.306-307.
8. Определение остаточного ресурса металлоконструкций методом механики разрушения: Учебно-методическое пособие к лабораторной работе./ Сост. А.Г. Гареев, М.А. Худяков, А.А. Шнайдер.– Уфа: УГНТУ, 2001.–18 с.
9. Зинатшин Э.Ф., Шнайдер А.А., Гареев А.Г. Влияние физико-механических свойств трубных сталей на их коррозионные свойства.// 52 науч.-техн. конф.: Тез. докл.– Уфа: УГНТУ, 2001.– С. 203 – 204.
- 10.Худяков М.А., Гареев А.Г., Шнайдер А.А. Испытание трубных сталей на ударный изгиб при низких температурах.// Проблемы нефти и газа: Науч. тр. III конгресса нефтегазопромышленников России.– Уфа: Реактив, 2001.– С.333-334.
- 11.Жильцов М.А., Шнайдер А.А., Гареев А.Г. Влияние катодной поляризации на малоцикловую коррозионную усталость.// 53 науч.-техн. конф.: Тез. докл. – Уфа: УГНТУ, 2002. – С. 64.
- 12.Жильцов М.А., Шнайдер А.А., Гареев А.Г., Худяков М.А. Оценка влияния дефектов металлургического происхождения на малоцикловую усталость нефтепроводов.// 53 науч.-техн. конф.: Тез. докл. – Уфа: УГНТУ, 2002. – С.65.
- 13.Тухбатуллин Ф.Г., Волгина И.И., Королев М.И., Теплинский Ю.А., Кузьбо-

- жев А.С., Агиней Р.В., Шнайдер А.А. Оценка внутренних напряжений длительно эксплуатируемых трубопроводов магнитошумовым методом.// Диагностика оборудования и трубопроводов: Науч.-техн. сб.– М.: ИРЦ Газпром, 2002.– С. 3-10.
- 14.Фатхетдинов А.М., Шнайдер А.А., Гареев А.Г. Изучение циклической трещиностойкости стали 20 в условиях моделирующих эксплуатационные.// 53 науч.-техн. конф.: Тез. докл.– Уфа: УГНТУ, 2002. – С. 201.
- 15.Худяков М.А., Гареев А.Г., Шнайдер А.А. Исследование хладноломкости стали 19Г.// Коррозия металлов: диагностика, предупреждение и ресурс: Сб. науч. статей. – Уфа: УГНТУ, 2002.– С. 29-35.
- 16.Шнайдер А.А. Исследование металлургических дефектов труб нефтегазопроводов.// Севергеоэкотех: Межрегиональная молодежная науч. конф.– Ухта, 2002.– С. 92-93.
- 17.Шнайдер А.А. Определение остаточного ресурса нефтепровода в условиях малоциклового коррозионной усталости.// Трубопроводный транспорт нефти и газа: Материалы Всероссийской науч.-техн. конф.– Уфа: УГНТУ, 2002.– С.153-155.
- 18.Шнайдер А.А., Жильцов М.А., Луань Цзян Фэн Исследование скорости роста трещин у образцов из стали 20 в условиях малоциклового коррозионной усталости.// Трубопроводный транспорт нефти и газа: Материалы Всероссийской науч.-техн. конф.– Уфа: УГНТУ, 2002.– С. 151-153.