

На правах рукописи



МУСАЕВ САЛИХ ДЖАБРАИЛОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ МЕТОДОВ
ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛА МАГИСТРАЛЬНЫХ
ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ СТАЛИ МАРКИ X70**

Специальность

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва, 2018 г.

Работа выполнена на кафедре «Материаловедение и технология обработки материалов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор
Бецефен Сергей Яковлевич

Официальные оппоненты: – **Терентьев Владимир Федорович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук»

– **Перлович Юрий Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Ведущее предприятие: – ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Защита диссертации состоится 28 июня 2018 года в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.125.15 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, ул. Оршанская, 3. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета, Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте: skvorcovasv@mati.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте: https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=90812

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета

Скворцова С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При производстве труб большого диаметра широко используются низкоуглеродистые малолегированные стали, механические свойства которых в значительной степени зависят от режимов контролируемой прокатки трубной заготовки. Структурные дефекты, формирующиеся на различных стадиях технологического процесса получения такой заготовки, оказывают существенное воздействие на процесс зарождения и роста усталостной трещины, а также на комплекс их механических свойств, включая и их анизотропию. Поэтому для обеспечения надежной эксплуатации материала магистральных труб необходима разработка новых способов оценки их работоспособности на основе количественных характеристик структурных исследований и механических испытаний материала труб. Исследования текстуры магистральных труб ограничиваются вопросами, связанными с анизотропией характеристик разрушения, а также с ориентационной зависимостью водородного охрупчивания. Существует до сих пор недостаточно развитое направление текстурных исследованиях магистральных труб, в котором используют текстуру в качестве инструмента контроля технологии прокатки трубной заготовки. Это направление примыкает к исследованиям текстуры сталей, полученных контролируемой прокаткой. В этом случае основная проблема заключается в поиске корреляции текстуры с температурой конечной прокатки, которая в значительной степени определяет комплекс механических свойств трубной заготовки и при этом оказывает влияние на ее текстуру. Наиболее опасным видом коррозионно-механических разрушений для линейной части газопроводных систем является коррозионное растрескивание под напряжением металла, зарождающееся на внешней поверхности трубы. В этой связи важным аспектом обеспечения надежной эксплуатации магистральных труб является развитие методов количественной оценки влияния коррозионной среды на кинетику роста усталостной трещины в материале магистральных труб, а также совершенствование методик получения количественной текстурной информации и разработки текстурных критериев, чувствительных к технологии получения трубной заготовки и анизотропии ее свойств.

Целью работы являлось повышение надежности эксплуатации магистральных трубопроводов за счет совершенствования количественных методов оценки влияния структурных факторов и коррозионной среды на закономерности роста усталостной трещины в материале сталей марки X70.

Для достижения указанной цели в работе решались следующие основные задачи:

- 1) Разработать методические подходы и исследовать влияние технологии получения трубной заготовки на текстуру и количественные параметры анизотропии механических свойств трубных сталей.
- 2) Изучить структурные неоднородности материала труб в виде расслоений в центральных сечениях, обусловленных неоднородностью пластического течения при прокатке исходных листов, а также влияние сероводородного расслоения металла магистральных трубопроводов на изменение его механических свойств и структуры под действием циклических нагрузок;
- 3) Установить количественные корреляции между параметрами коррозионного воздействия и скоростью роста усталостной трещины;
- 4) На основе результатов статических и циклических испытаний и исследований микроструктуры выявить особенности формирования механических свойств материала магистральных трубопроводов под действием агрессивных сред.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- Применительно к материалу магистральных труб усовершенствована методика построения количественных обратных полюсных фигур, позволившая увеличить количество экспериментальных рефлексов на стандартном стереографическом треугольнике за счет использования парных рефлексов, что существенно повысило информативность метода.
- Развита новый подход к оценке работоспособности магистральных труб с использованием анизотропного критерия Хилла совместно с количественными текстурными данными, что позволило оценить разницу между результатами одноосных испытаний и прочностью при двухосном напряженном состоянии, соответствующим условиям работы труб под внутренним давлением, что может быть использовано для корректировки допустимых давлений в трубах с учетом эффекта текстурного упрочнения или разупрочнения.
- На основе анализа корреляций анизотропии характеристик трещиностойкости и усредненных по ориентировкам с учетом текстуры модулей Юнга, и величин коэффициентов текстурного охрупчивания, характеризующих степень совпадения номинальной плоскости разрушения с плоскостью скола $\{001\}$, показано, что на анизотропию ударной вязкости материала магистральных труб основной эффект оказывает не кристаллографическая, а механическая текстура или волокнистость.
- Показано, что наличие сдвиговой компоненты текстуры и ее протяженность по глубине стенки трубных заготовок в текстуре

поверхностных слоев может служить количественным критерием неоднородности процесса деформации исходного листа и дает возможности контролировать эту неоднородность с целью оптимизации ресурсных характеристик магистральных труб.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Разработаны новые методические подходы к исследованиям влияния кристаллографической текстуры на характеристики анизотропии материала магистральных труб, включающие повышение информативности ОПФ, использование усредненных с учетом текстуры значений модулей Юнга и величин коэффициентов текстурного охрупчивания, а также основанные на текстурных данных методы оценки характеристик технологической истории изделия на основе предложенного в работе текстурного коэффициента и прогнозирование деформационного поведения текстурированных труб на основе критерия Хилла.
2. Показано, что предложенный в работе текстурный коэффициент, равный отношению полюсных плотностей компонентов текстуры прокатки α -Fe к компонентам текстуры $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения, может быть включен в комплекс показателей магистральных труб наряду с механическими свойствами, что позволит накапливать информацию о влиянии технологии изготовления труб на их ресурсные характеристики.
3. Разработана процедура комплексного испытания материала труб для оценки влияния на их ресурсные характеристики воздействия статической и циклической нагрузок, и коррозионной среды, включающая испытания на натурной модели статическим нагружением в коррозионной среде с последующим измерением кинетики распространения усталостной трещины на воздухе, при этом после каждых $60 \cdot 10^3$ циклов усталостного нагружения образец возвращался на разработанный испытательный стенд под действие статической нагрузки в коррозионной среде.
4. Выявлены количественные параметры влияния коррозионной среды на скорость роста усталостной трещины материала магистральной трубы из стали марки X70, на основании которых можно вводить корректирующие коэффициенты в расчеты остаточного ресурса магистральных труб, исходя из параметров усталостных испытаний материала отработанных труб для конкретных условий эксплуатации (климатические условия, наличие коррозионной среды, наличие коррозионной защиты и т.д.).
5. На основании предложенного методологического подхода можно проводить сравнительные испытания различных материалов и способов их обработки для магистральных труб с обеспечением объективного критерия оценки работоспособности материалов в различных условиях коррозионного воздействия.

Апробация работы.

Материалы диссертационной работы доложены на 5 конференциях: Республиканская научно-техническая конференция «Пути совершенствования качества строительства промышленных и гражданских зданий и инженерных сооружений», г. Владикавказ, 2012; III Всероссийский фестиваль науки, г. Владикавказ, 2013; Международная научно-практическая конференция «Инновации в современной науке», г. Махачкала, 2014; II Международная научно-практическая конференция «Современный взгляд на проблемы технических наук», г. Уфа, 2015; Международная молодёжная научная конференция XLII Гагаринские чтения, г. Москва, 2016; VI Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные научные исследования», г. Пенза, 2017.

Публикации. Основное содержание работы изложено в 11 научных работах, 4 из которых – в списке отечественных рецензируемых журналов, рекомендуемых ВАК, зарегистрировано 3 патента. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка цитируемой литературы и приложения. Объем диссертации составляет 184 страницы, включая 95 рисунков, 33 таблицы и список литературы из 198 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации. Цель работы и задачи исследования, представлена научная новизна и практическая значимость, перечислены полученные автором результаты, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Особенности количественных методов исследования и прогнозирования структуры, механических свойств и работоспособности магистральных труб (обзор литературы).

В первой главе проанализированы литературные источники по тематике, связанной с развитием количественных критериев оценки структуры, текстуры и механических свойств трубных сталей. Рассмотрено влияние текстуры на анизотропию характеристик разрушения и ориентационную зависимость водородного охрупчивания, а также вопросы использования текстуры в качестве инструмента контроля технологии получения трубной заготовки. Отмечено, что до сих пор нет однозначного мнения о роли текстуры в анизотропии характеристик разрушения трубных сталей различных марок. Показано, что структурные дефекты, формирующиеся на различных стадиях технологического процесса

получения трубной заготовки, оказывают существенное влияние на процесс зарождения и роста усталостной трещины, что усугубляется воздействием коррозионной среды.

Рассмотрены методы оценки и прогнозирования остаточного ресурса магистральных труб, влияние коррозионных сред. На основе анализа отечественных и зарубежных источников изучено состояние вопроса, проведен анализ и обобщены результаты исследований длительной эксплуатации магистральных трубопроводов большого диаметра.

Глава 2. Материалы и методы исследования и испытания.

Во второй главе приведены основные параметры исследуемых сталей и описана методика, использованная для их исследования.

Для проведения исследований были выбраны фрагменты магистрального газопровода диаметром 1420 мм из сталей 09Г2С и 09Г2ФБ, широко применяемых в условиях холодного климата, которые относятся к классу Х70(К60).

Основные параметры исследуемых труб приведены в таблицах 1 и 2.

Табл. 1. Химический состав сталей 09Г2С и 09Г2ФБ

Марка стали	C	Mn	Si	Cr	Ni	Al	Cu	Fe
	Мас. %							
09Г2С	0,09	1,26	0,64	0,08	0,1	0,02	0,14	Ост.
09Г2ФБ	0,13	1,7	0,35	0,09	0,05	0,05	-	Ост.

Табл.2. Стандартные характеристики механических свойств сталей класса Х70(К60)

Категория прочности	Временное сопротивление, σ_B , МПа	Предел текучести, σ_T , МПа	σ_T/σ_B	Относительное удлинение, δ , %	Работа удара, KV ⁻⁴⁰ °С, Дж		Доля вязкой составляющей в изломе образца при ИПГ основного металла при минус 20°С
					основной металл	сварной шов	
	не менее		не более	не менее			
Х70(К60)	570	505	0,90	20	124	40	90

В работе использованы следующие методы исследования микроструктуры и механических свойств основного металла: микроструктуру изучали с помощью оптических микроскопов Neophot-2 и Olympus; рентгеноструктурные исследования проводили с помощью дифрактометра ДРОН-4 в фильтрованном MoK_{α} -излучении. Кристаллографическую текстуру образцов в трех зонах сечения трубы, примыкающих к внутреннему и

внешнему ее диаметру и для среднего сечения оценивали с помощью обратных полюсных фигур (ОПФ); Микротвердость определяли по ГОСТ 9450-76 на твердомере Volpert 402MVD; ультразвуковое исследование и измерение проводилось с помощью универсального сканер-дефектоскопа УСД-50, преобразователь - П121-10-65 с частотой 10МГц; испытание на растяжение и изгиб проводили при комнатной температуре для определения σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ в соответствии с ГОСТ 1497-84 на машине INSTRON-1185; испытание циклическим нагружением, продольным и поперечным изгибом проводилось на универсальном гидравлическом прессе МУП-50; испытание статическим нагружением и действия коррозионных сред проводилось на специально разработанном стенде. Кроме стандартных методов были использованы методики испытаний, разработанные непосредственно автором.

Глава 3. Разработка методического обеспечения исследований влияния технологии на работоспособность материала магистральных трубопроводов из стали марки.

Количественную текстурную информацию можно применить для анализа корреляций механических свойств трубной стали и их анизотропии. При этом в качестве основного текстурного параметра выбрана степень совпадения номинальной плоскости разрушения при испытании (например, образцов Шарпи) или преимущественной плоскости расслоения материала с кристаллографической плоскостью $\{001\}$. Эта плоскость рассматривается как плоскость скола или расслоения, поскольку нормально этой плоскости сила межатомной связи минимальна. В качестве количественного критерия такого совпадения использовали коэффициент текстурного охрупчивания B_{hkl} :

$$B_{hkl} = \cos^2 \alpha, \quad (1)$$

где α – угол между нормальными к плоскостям (hkl) и (001) .

Величину коэффициента текстурного охрупчивания стали в соответствующем направлении листа находили суммированием произведений нормированной полюсной плотности на B_{hkl} :

$$B^{\text{HH(НП,ПН)}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{hkl}^{\text{HH(НП,ПН)}} B_{hkl})_i. \quad (2)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные из соотношения (1) значения коэффициента текстурного охрупчивания B_{hkl} , соответствующих 20 экспериментальным отражениям в MoK_α -излучении. Значения этого коэффициента варьируются от 0,333 для отражения от плоскостей $\{111\}$ до 1,0 для плоскостей скола $\{001\}$. В соответствии с этим максимальная

хрупкость материала проявляется в случае совпадения номинальной плоскости расслоения или номинальной плоскости разрушения образца Шарпи с (плоскостью) $\{001\}$, а минимальная хрупкость – при совпадении этих плоскостей с (плоскостью) $\{111\}$. Для бестекстурного материала, когда полюсная плотность всех рефлексов $P_{hkl} = 1$, величина $B = 0,70$.

Кроме этого, реальный вклад в сопротивление разрушению и, соответственно, в анизотропию характеристик разрушения может вносить величина модуля Юнга. Нами разработана программа расчета модулей Юнга для металлов с кубической решеткой, которая прошла государственную регистрацию. В табл.1 приведены рассчитанные для 20 ориентаций (hkl) значения модуля Юнга для Fe. Видно, что величина модуля Юнга Fe характеризуется значительной анизотропией, максимальный модуль Юнга равный 278,1 ГПа соответствует направлению нормали к (111), а минимальная величина модуля Юнга, равная 131,8 ГПа соответствует нормали к плоскости куба (001). Такая анизотропия характерна для металлов с «положительной анизотропией», для которых параметр анизотропии $J = S_{11} - S_{12} - 0,5S_{44} > 0$.

Табл. 1 Значения B_{hkl} и E_{hkl} для 20 рефлексов (hkl)

№		B_{hkl}	E_{hkl} ГПа	№		B_{hkl}	E_{hkl} ГПа
1	001	1.000	131,6	11	035	0.735	190,1
2	116	0.947	143	12	012	0.800	176,2
3	114	0.889	156,8	13	013	0.900	153,4
4	113	0.813	175,1	14	123	0.643	217,6
5	112	0.667	217,6	15	134	0.615	217,6
6	334	0.471	265,7	16	145	0.595	217,6
7	111	0.333	278,3	17	136	0.783	181,7
8	233	0.410	263,1	18	125	0.833	170,2
9	235	0.658	217,6	19	122	0.444	247,6
10	011	0.500	217,6	20	015	0.961	139,8

Величину модуля Юнга для стали в соответствующем направлении листа находили суммированием произведений нормированной полюсной плотности на модуль Юнга для данной ориентации:

$$E^{nn(ni,ni)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(P_{hkl}^{nn(ni,ni)} E_{hkl} \right)_i, \quad (3)$$

Разработана методика комплексного испытания материала труб, включающего воздействие статической и циклической нагрузок и коррозионной среды. Оценивалось влияние коррозионной среды на кинетику разрушения, как при статических, так и при циклических нагрузках на

образцы из основного металла с его естественной поверхностью. Эта методика включает испытания на натурной модели по следующей схеме: статическое нагружение при 290 МПа ($0,8 \sigma_{0,2}$) в коррозионной ячейке в течение 72 часа, с последующим измерением кинетики распространения усталостной трещины на воздухе, при этом после каждых 60 тыс. циклов усталостного нагружения образец возвращался на разработанный испытательный стенд под действие статической нагрузки в коррозионной среде. Один из растворов для статических исследований представлял из себя смесь раствора NS-4 и боратного буфера с добавкой активатора анодного растворения и наводороживания стали - ионов сульфида. При проведении испытаний образцов трубных сталей на склонность к коррозионному растрескиванию под напряжением, в условиях статического нагружения образца с предварительно выращенной усталостной трещиной, агрессивной коррозионной средой являлась : 122мг/л KCl, 483мг/л NaHCO₃, 181мг/л CaCl, 131мг/лMgSO₄, 24,72г/л H₃BO₃, 15,25г/л (Na₂B₄O₇ x 10H₂O), 78мг/л Na₂S.

В качестве натурной модели использовали фрагменты размером 500x140x16,7 мм, вырезанные из трубопроводов диаметром 1420 мм, участок которых выведен из эксплуатации. Испытания проводили на универсальной испытательной машине МУП–50, предназначенной для механических испытаний сжатием, растяжением, продольным и поперечным изгибом при статических и циклических нагрузках. На испытуемый образец устанавливали тензометр для определения необходимых усилий на него.

Исследования экспериментальных крупномасштабных образцов из сталей 09Г2ФБ, 09Г2С (относящихся к сталям класса X70 – K60) при воздействии статической нагрузки и коррозионных сред проводились по СТО Газпром 2-5.1-148-2007 на разработанном испытательном стенде (рис. 1)

Испытание проводили с периодичностью статического нагружения сроком на 72 часа и циклического нагружения по 60 тыс. циклов до полного разрушения образца. После чего изготавливали шлифы для детального изучения характеристик структуры и параметров роста усталостной трещины.

Моделируя реальную работу металла трубы, при нагружении экспериментальных образцов статической нагрузкой в их рабочей зоне создавалось напряженно-деформированное состояние, и упругая энергия рабочей зоны моделировала упругую энергию поверхности реального трубопровода.

Однородность поля напряжений обеспечивалась на протяжении всего времени испытаний как по поверхности образца, так и по его толщине. С помощью изменения параметров нагружающей системы образцам были приданы различные запасы упругой энергии.



Рис.1. Крупномасштабный образец из стали X70 под статической нагрузкой ($\sigma=0,8\sigma_{0,2}$) под действием коррозионной среды в герметичной камере-ячейке.

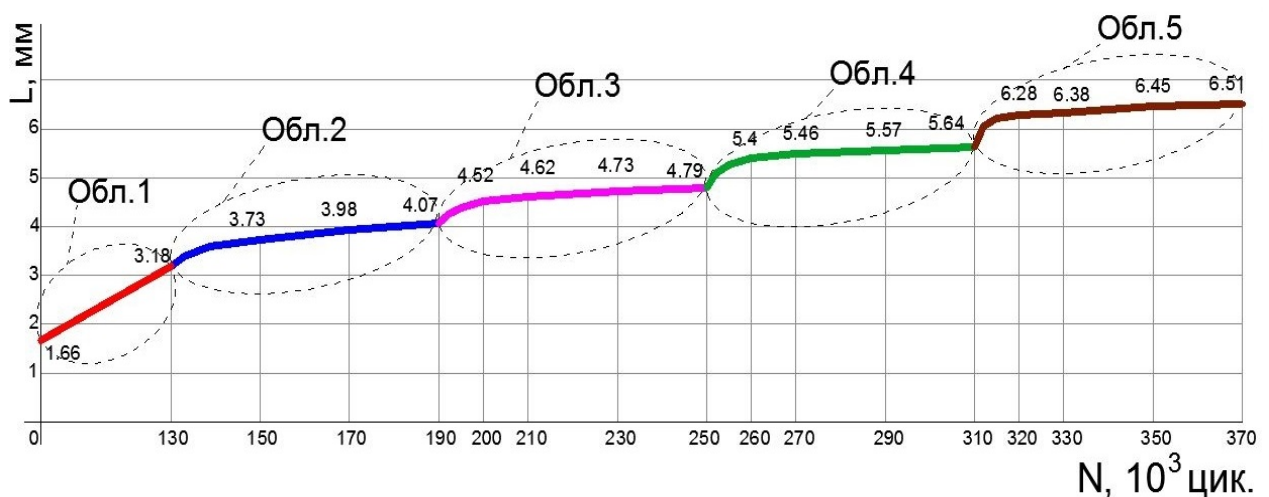


Рис.2. Зависимость длины усталостной трещины от количества циклов на всем протяжении испытания.

Глава 4. Изучение особенностей поведения трубной стали в условиях испытания статической и циклической нагрузкой в коррозионной среде.

В четвертой главе продемонстрировано применение разработанной методики для оценки остаточного ресурса магистральных трубопроводов стали марки X70 (К60). Оценивалось влияние коррозионной среды на кинетику разрушения, как при статических, так и при циклических испытаниях. В ходе исследования образца под действием циклической нагрузки уже на первой стадии испытания было зафиксировано значительное ускорение роста усталостной трещины. После проведения испытаний нескольких образцов, было замечено, что рост трещины в испытуемых образцах при идентичных циклических нагрузках и амплитудах, происходит не с постоянной скоростью, а зависит от времени действия агрессивной

среды. На основании измерений ультразвуковым дефектоскопом построены графики роста трещины на каждые 20 тыс. циклов, которые показаны на (рис.2).

График разделили на области. Область 1 - рост усталостной трещины без действия агрессивной среды, длительностью в 130 тыс. циклов. Области 2-5 обозначают последовательность 4 стадий циклических испытаний по 60 тыс. циклов, в промежутках между которыми образец подвергался статическому нагружению при воздействии агрессивной среды. Т.к. области 2-5 имеют общие условия испытания, то объединив их с условно общей начальной точкой, можно показать (рис.3), что скорость роста усталостной трещины увеличивается с каждым циклом испытания образца.

Глубина проникновения (область растворения) коррозионной среды зависит от накопления повреждаемости у основания трещины, следовательно, накопления повреждаемости способствуют росту трещины. При совместном воздействии нагрузений и агрессивной среды на металл, скорость роста трещины, в области воздействия агрессивной среды, значительно повышается. Прохождение зоны подверженной действию агрессивной среды свидетельствует резкое понижение скорости роста и практически сравнивается со скоростью ее роста в отсутствии коррозионного воздействия. Интенсивность действия агрессивной среды зависит от времени и концентрации раствора.

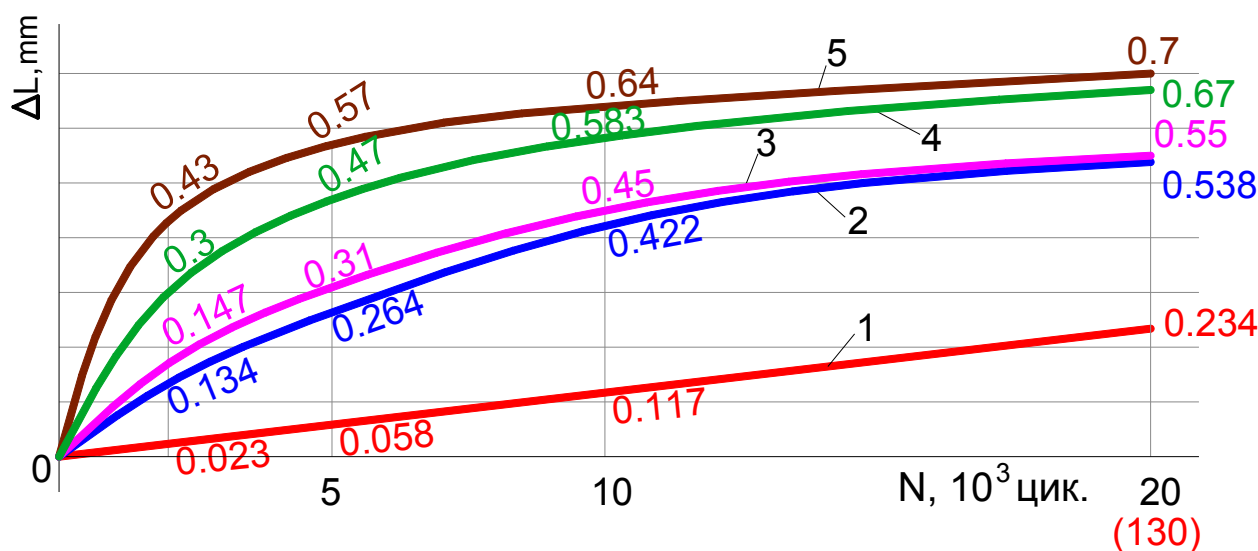


Рис.3. Зависимость увеличения длины усталостной трещины от количества циклов на всем протяжении испытания.

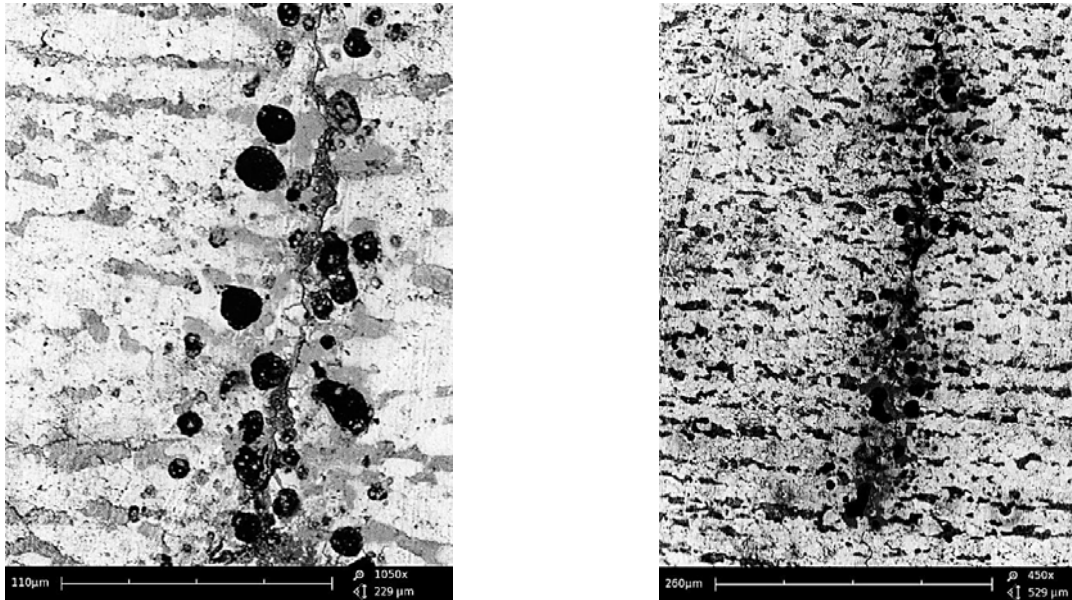


Рис.4. Влияние агрессивных сред на трещиностойкость стали под нагрузкой.

Образец 3 (рис.3) на начальном уровне испытания показал ускорение роста. На графике видно, что первые 5 тыс. циклов рост трещины составляет 0,31 мм, а за оставшиеся 55 тыс. циклов рост трещины составляет 0,41 мм.. Суммарный рост составляет 0,72 мм., что превышает рост трещины без агрессивной среды (при 130 тыс. циклов) более чем в два раза. Это связано с тем, что атомарный водород образуется вследствие электрохимических процессов на поверхности металла при участии сероводорода, углекислого газа и влаги. Он диффундирует до участка сечения стенки (как правило располагается в средней части ее сечения), где реализуются наиболее благоприятные условия для образования молекулярного водорода H_2 . Здесь концентрируются различные микродефекты (поры, газовые раковины, шлаковые включения, микро- и макropустоты), а также скопления примесей, обусловленных технологией прокатки стали (рис.4).

Эти дефекты обычно располагаются в середине сечения листа в результате недостаточной проработки структуры при прокатке толстых листов. В конечном счете, давление молекулярного водорода в указанных участках повышается до значений, превышающих предел прочности стали, и приводит к расслоению и растрескиванию металла.

Результаты большого числа исследований свидетельствуют о том, что усталостные микротрещины возникают уже на самой ранней стадии циклического нагружения, (рис.5), развитие которых протекает в два последовательных этапа: распространение микроструктурных коротких усталостных трещин, а затем рост усталостных трещин. В определенный момент, когда трещина достигнет критического размера, она перестает быть «короткой» и продолжит развиваться уже как «нормальная» усталостная трещина.

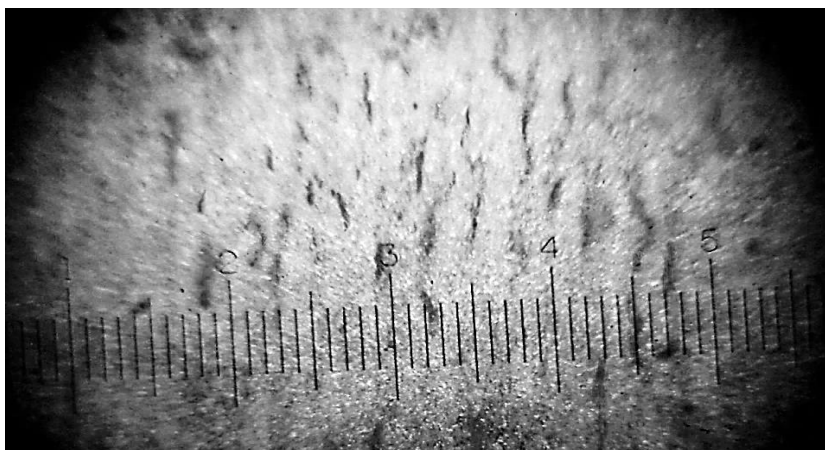


Рис.5. Множественное образование малых трещин.

Разновидности роста усталостных трещин изображены на (рис.6), развитие которых зависит от структуры металла, условий прокатки, длительности эксплуатации, воздействия коррозионно-агрессивных сред.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что они могут быть использованы при определении опасности дефекта и поведения его в эксплуатационных условиях. Сопоставление критической трещины с размерами развивающейся трещины при циклических испытаниях позволит определить запас жизнеспособности дефектной трубы по уровню давления и позволить дать оценку остаточного ресурса данной трубы, а также режимы ее безопасной эксплуатации. На (рис.7), показаны результаты испытания образцов при различных условиях нагружения.

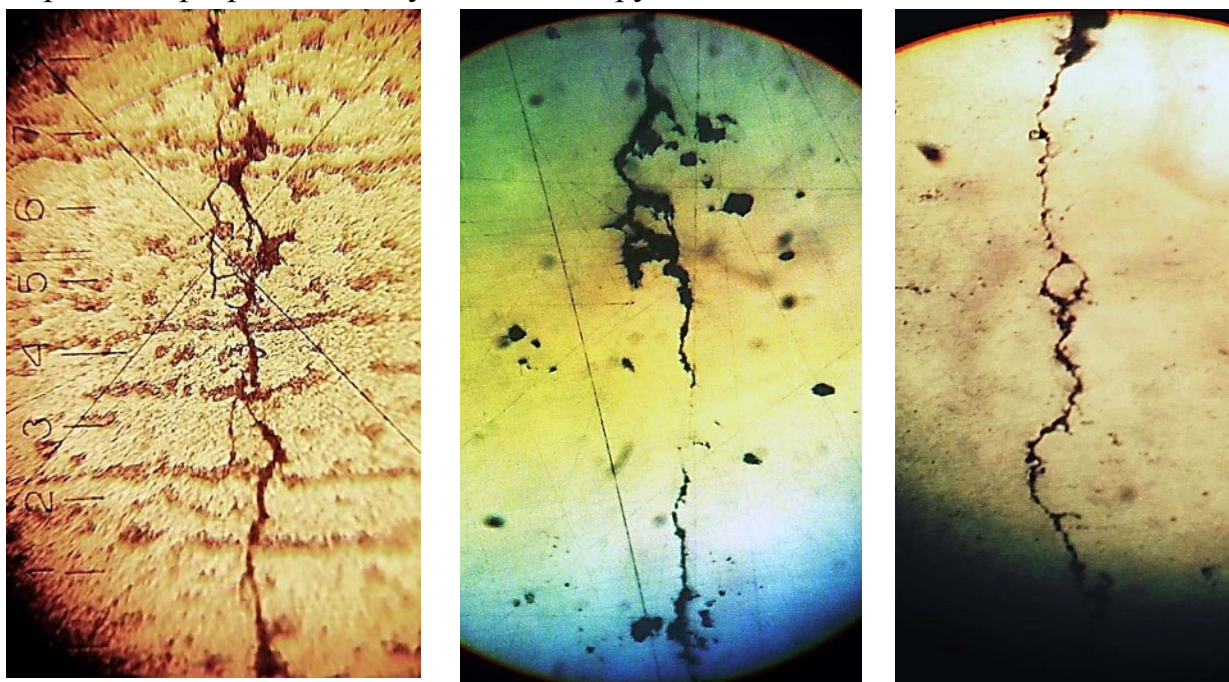


Рис.6. Геометрия роста усталостной трещины экспериментальных образцов магистрального газопровода различного условия эксплуатации.

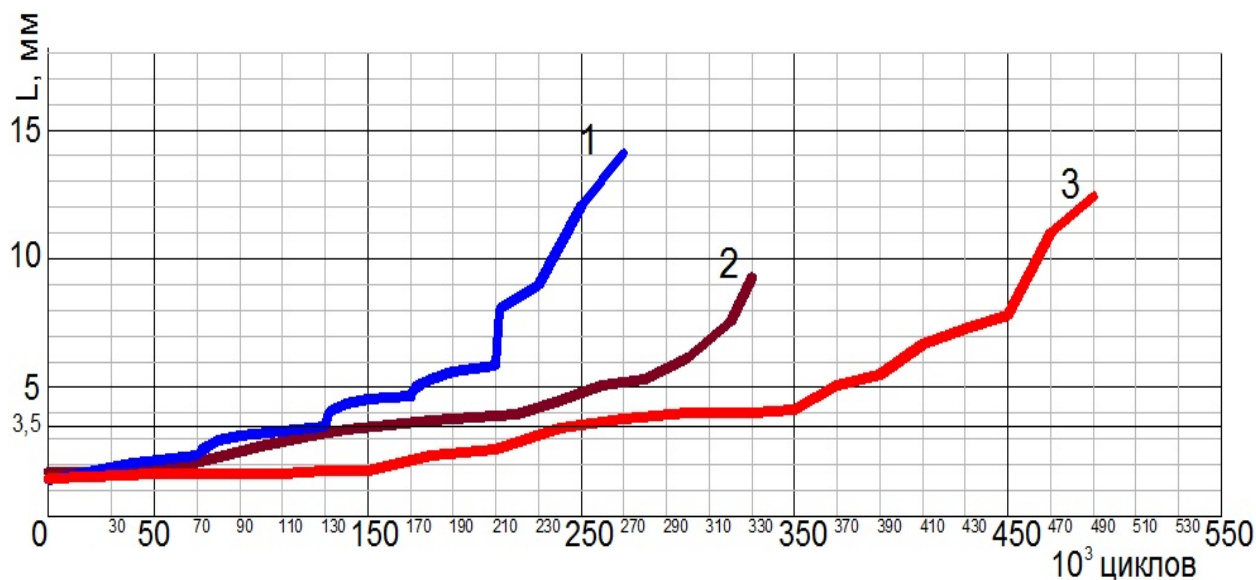


Рис. 7. Зависимость длины роста трещины образцов и количества циклических нагрузок при условиях:

- 1 - действия коррозионной среды и статических нагрузок ($\sigma_{\max}=0,8\sigma_T$);
- 2 - действия коррозионной среды, без статических нагрузок;
- 3 - без действия коррозионной среды, без статических нагрузок.

Видно, что значительное увеличение скорости роста трещины происходит после прохождения критического значения глубины трещины в 3,5мм. Начиная с этого значения на всех образцах происходит значительное увеличение скорости роста трещины, вне зависимости от наличия коррозионных сред и действия статических нагрузок. Тем самым, статические нагрузки и коррозионная среда влияют на первоначальное зарождение и образование трещины, а значит, именно данная стадия требует особого внимания, тщательного анализа и прогноза. Толщина испытываемых образцов равна 16,8 мм., а следовательно критической глубиной роста трещины является 1/5 толщины образца.

Таким образом, в тяжелых условиях эксплуатации, при действии условий циклических и статических нагрузок, находясь в коррозионной среде - работоспособность трубопровода сохраняется до тех пределов, пока размер потенциального дефекта (трещина) не превышает глубины 3,5 мм. от внешней поверхности трубопровод. Остаточный ресурс, в свою очередь, определяется как время дальнейшей безопасной эксплуатации трубопровода (при необходимом рабочем давлении) на основании статических и циклических испытаний материала исходной и эксплуатируемой трубы по формуле:

$$t_{\text{ост}} = \frac{(t_{\text{и}} - t_{\text{э}})(N_{\text{и}} - n) \cdot \sigma_{\text{в}}}{N_{\text{с}} \sigma'_{\text{в}}} \quad (4)$$

где $t_{\text{ост}}$ – остаточный ресурс; $t_{\text{и}}$ – время разрушения образца исходной

трубы; $t_э$ – время эксплуатации трубопровода до проведения испытаний; n – количество циклов нагрузок, которым фрагмент трубопровода подвергался за время эксплуатации; $N_{и}$ – количество циклов нагрузок к моменту разрушения образца из исходной трубы; N_c – количество циклов нагрузок к моменту разрушения образца из эксплуатируемой трубы; σ_B – предел прочности металла испытываемого образца; σ'_B – предел прочности металла трубы, до проведения испытаний.

Исследуя образцы магистральных трубопроводов, завершивших срок эксплуатации, нам удалось определить время службы, а также количество циклов до полного разрушения в условиях испытаний приближенных к реальным. Тем самым имея данные о времени и условиях эксплуатации в период технологического процесса, мы можем обозначить срок службы до момента полного разрушения данного фрагмента трубопровода и следовательно всего участка трубопровода в целом. Оценку остаточного ресурса имеет смысл проводить по истечению гарантийного срока работоспособности трубопровода. Завод изготовитель обозначает этот срок минимум 20 лет. Реальные сроки эксплуатации трубопроводов гораздо больше, таким образом, применение данного метода исследования остаточного ресурса является необходимым для трубопроводов, превысивших гарантийный срок эксплуатации.

Глава 5. Исследование количественных структурных характеристик материала магистральных труб

В настоящей главе рассмотрены вопросы совершенствования методик получения количественной текстурной информации и разработки текстурных критериев, чувствительных к технологии получения трубной заготовки и анизотропии ее свойств.

5.1 Количественный критерий влияния температуры конечной прокатки на текстуру трубной заготовки

Было показано, что формирование текстуры деформации и рекристаллизации аустенита при горячей прокатке определяется наследованием текстурных компонент аустенита при $\gamma \rightarrow \alpha$ - превращении. Анализ показывает, что единственными компонентами, не совпадающим с текстурой прокатки α -фазы являются компоненты текстуры Госсса $\{011\}\langle 100 \rangle$ - $\langle 110 \rangle$. Для построения зависимости текстурных параметров от $T_{кп}$ в чистовой группе клеток использовали результаты исследования текстуры листов сталей 09Г2СФ и 09Г2ФБ, полученных горячей прокаткой слябов на непрерывном широкополосном стане 2000 «Северстали» с последующей чистовой конечной прокатки ($T_{кп}$), равной 620-890⁰С. Было изучено влияние $T_{кп}$ на интенсивности различных текстурных компонент сталей на комплекс

механических свойств, включающий свойства на растяжение и ударную вязкость, долю вязкой составляющей в изломе и температуру вязко-хрупкого перехода. Показано, что с повышением температуры прокатки снижается интенсивность компонентов $\{001\}$, $\{112\}$ и $\{111\}$ и повышается доля компонентов $\{011\}$ и $\{013\}$. На этом основании для установления количественной корреляции между $T_{кп}$ и текстурой мы предлагаем ввести текстурный коэффициент ($K_{тек}$), равный отношению суммы полюсных плотностей компонентов, соответствующих текстуре прокатки α -фазы $\{001\}$, $\{112\}$ и $\{111\}$ к сумме полюсных плотностей компонентов, принадлежащих исключительно к текстуре превращения $\{011\}$ и $\{013\}$:

$$K_{тек} = \frac{P_{\{001\}} + P_{\{112\}} + P_{\{111\}}}{P_{\{011\}} + P_{\{013\}}} \quad (5)$$

На рис. 8 приведена зависимость этого текстурного коэффициента от $T_{кп}$, демонстрирующая четкую корреляцию этого коэффициента с температурой конечной прокатки в двухфазной области. Это дает возможность по величине этого текстурного коэффициента оценивать $T_{кп}$, которая является важнейшей характеристикой технологической истории материала трубной заготовки, определяющей ее служебные свойства.

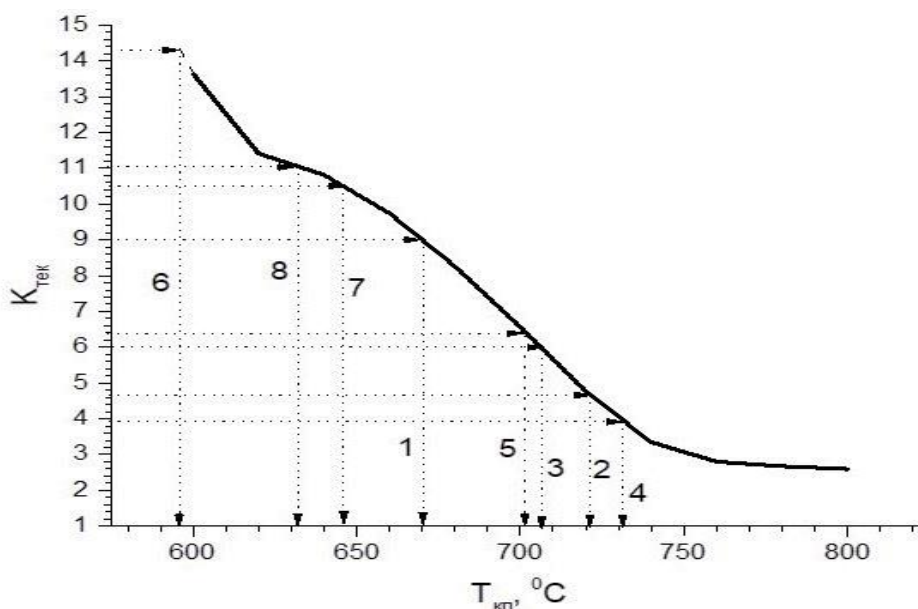


Рис. 8. Зависимость текстурного коэффициента ($K_{тек}$) от температуры конечной прокатки ($T_{кп}$)

Табл.2. Текстурные коэффициенты ($K_{тек}$), полюсные плотности рефлекса (110) на ОПФ для НН, коэффициенты «охрупчивания» ($V^{НН(НП,ПН)}$), модули Юнга и факторы Закса для 8 труб класса Х70

№ трубы	Напр.	$K_{тек}$	$P_{(110)}$	$T_{кп}, ^\circ C$	$V^{НН(НП,ПН)}$	$E^{НН(НП,ПН)}$ ГПа	$M^{НН(НП,ПН)}$
1	НН	9,0	0,2	670	0,70	203,1	2,346
2	НН	4,7	0,3	720	0,71	198,0	2,40
3	НН	6,0	0,1	710	0,69	203,5	2,42
4	НН	3,9	0,5	730	0,67	206,8	2,35
5	НН	6,4	0,3	700	0,69	202,7	2,46
6	НН	14,3	0,07	600	0,70	202,3	2,36
7	НН	10,5	0,09	650	0,66	210,2	2,45
8	НН	11,1	0,08	630	0,67	208,3	2,39
3	НП	-		-	0,71	203,0	2,33
3	ПН	-		-	0,69	207,6	2,23

Для проверки эффективности предложенного текстурного коэффициента для анализа технологической истории магистральных труб исследована текстура восьми труб диаметром 1420 мм и толщиной стенки 16,7 мм класса прочности Х70. В (табл. 2), приведены значения текстурных коэффициентов, рассчитанных из ОПФ для НН этих 8 труб и на рис. 8 продемонстрирована процедура оценки $T_{кп}$, которая варьируются в диапазоне 600-730 $^\circ C$.

5.2 Оценка характеристик анизотропии магистральных труб

Магистральные трубы характеризуются значительной анизотропией механических свойств, которую связывают с текстурой. При исследовании влияния температуры конечной прокатки на характеристики труб обнаружено, что ударная вязкость и значения относительного удлинения долевых образцов значительно выше, чем поперечных и наблюдается четкая тенденция снижения анизотропии с увеличением температуры прокатки.

На основании рассчитанных для 20 отражений значений коэффициента текстурного охрупчивания (табл.1) и экспериментальных значений полюсных плотностей для соответствующих отражений на ОПФ с помощью уравнения (1) вычислили коэффициенты текстурного охрупчивания для восьми магистральных труб в НН - табл.2. Для трубы 3 расчеты проведены также и для направлений НП и ПН. В нашем случае (табл. 2), коэффициент текстурного охрупчивания изменяется от 0,66 до 0,71 для НН, что свидетельствует о том, что склонность к расслоению материала варьируется вблизи значений, характерных для бестекстурного материала.

Реальный вклад в сопротивление разрушению и, соответственно, в анизотропию характеристик разрушения может вносить величина модуля Юнга. Согласно уравнению Гриффитса напряжение разрушения (σ_c) определяется:

$$\sigma_c = (2E\gamma_p/\pi l_c)^{1/2}, \quad (6)$$

где E – модуль Юнга; γ_p – удельная поверхностная энергия; l_c – половина длины трещины.

В (табл.2), приведены значения модулей Юнга для 8 труб в направлении НН и для одной трубы 3 в НП и ПН. Видно, что значения модуля Юнга варьируются в сравнительно узких пределах (198–210 ГПа), при том, что для монокристаллов железа модули Юнга варьируются очень широко: от 131,6 ГПа для направления $\langle 001 \rangle$ до 278,3 ГПа для направления $\langle 111 \rangle$. Для трубы 3 коэффициент охрупчивания долевых образцов несколько выше, чем поперечных (0,71 и 0,69 соответственно). Это противоречит экспериментальным данным, согласно которым показатели ударной вязкости выше для долевых образцов. Величина модуля Юнга выше в ПН (207 ГПа) по сравнению с НП (203 ГПа), что также свидетельствует о том, что исходя из анализа влияния текстуры на ударную вязкость она должна быть выше у поперечных образцов. В целом значения коэффициентов текстурного охрупчивания и модуля Юнга (табл.2) не показывают какой-то четкой зависимости от температуры конечной прокатки, что свидетельствует о том, что анизотропия механических свойств магистральных труб слабо связана с текстурой, а является следствием механической текстуры или волокнистости. Для прокатанных листов из-за вытянутости зерен в направлении прокатки эффективный размер зерна в долевых образцах меньше, а прочность выше, чем в поперечных образцах в соответствии с законом Петча-Холла. Однако в трубных сталях прочность выше у поперечных образцов, а у продольных значительно выше ударная вязкость и удлинение. Этот эффект можно объяснить слоистой микроструктурой, которая способствует ветвлению трещины и увеличению работы распространения трещины, при этом эффект слоистости доминирует для продольных образцов.

5.3. Параметры анизотропии текучести и прочность при двухосном нагружении: критерий Хилла

Для описания деформационного поведения текстурированных труб из циркониевых сплавов в условиях сложнапряженного состояния используют критерий текучести Хилла. Аналогичный подход может быть использован для текстурированных стальных магистральных труб, работающих в условиях несбалансированного двухосного растяжения ($\sigma_2=2\sigma_1$). Для плоского напряженного состояния ($\sigma_3 = 0$) в координатах главных напряжений критерий Хилла имеет вид:

$$R(R+1) \sigma_1^2 - 2RP\sigma_1\sigma_2 + R(P+1) \sigma_2^2 = R(P+1) \sigma_{T(2)}^2 \quad (7)$$

где: $R = d\varepsilon_2/d\varepsilon_3$; $P = d\varepsilon_1/d\varepsilon_3$ – коэффициенты анизотропии, $\sigma_{T(2)}$ – предел текучести в тангенциальном направлении трубы (направление 2//ПН) ;

Уравнение (7) позволяет определить отношение предела текучести при сложнонапряженном состоянии (σ_2), характеризуемом отношением $V=\sigma_2/\sigma_1$, к пределу текучести при одноосном растяжении ($\sigma_{T(2)}$). Для трубы под внутренним давлением $V=2$. Подставим это значение в (7) и получим:

$$\sigma_2/\sigma_{T(2)} = \sqrt{\frac{4R(P+1)}{RP+4R+P}} \quad (8)$$

Если оценить коэффициенты анизотропии R и P из текстурных данных на основании вычисления факторов Закса для трех ортогональных направлений трубы, то можно оценить величину отношение (8). Покажем это на примере материала трубы 3, для которой значения факторов Закса для направлений НН, НП и ПН равны 2,42; 2,33 и 2,23 соответственно. Параметры анизотропии можно получить в виде решения уравнения (7), для двух произвольных напряженных состояний, например для случая одноосного растяжения в осевом направлении трубы ($\sigma_2=0$ и $\sigma_1=\sigma_{T(1)}$) и для случая сбалансированного двухосного растяжения ($\sigma_1=\sigma_2$). Решая эти два уравнения совместно, получим значения параметров анизотропии: $R=1,40$ и $P=1,125$. Если подставить эти значения в уравнение (8), получим:

$$\sigma_2/\sigma_{T(2)} \sqrt{\frac{4R(P+1)}{RP+4R+P}} = 1,20$$

Таким образом, текстурированный материал трубы 3 демонстрирует эффект текстурного упрочнения на 20% по отношению к пределу текучести при одноосном растяжении в поперечном направлении. Следует, однако, указать, что изотропный бестектурный материал показывает 15% упрочнение по отношению к одноосному растяжению, но, тем не менее, 5% упрочнение за счет текстуры все-таки имеет место и его следует учитывать. Важно также иметь в виду, что помимо текстурного упрочнения может быть и текстурное разупрочнение, когда величина прочности при двухосном растяжении ниже, чем при одноосном растяжении.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Усовершенствована методика определения количественных обратных полюсных фигур для ОЦК сплавов, позволившая увеличить количество экспериментальных рефлексов на стандартном стереографическом треугольнике за счет использования парных рефлексов, что повысило информативность метода ОПФ

2. Продемонстрирована возможность оценивать параметры технологической истории изделия на основании текстурного коэффициента, равного отношению полюсных плотностей компонентов текстуры прокатки α -Fe к компонентам текстуры $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, который может быть включен в комплекс показателей магистральных труб, что позволит

накапливать информацию о влиянии технологии изготовления труб на их ресурсные характеристики.

3. Установлено, что использование анизотропного критерия Хилла совместно с количественными текстурными данными позволяет оценить разницу между результатами одноосных испытаний и прочностью при двухосном напряженном состоянии, которое соответствует условиям работы труб, что может быть использовано для корректировки допустимых давлений в трубах с учетом эффекта текстурного упрочнения или разупрочнения.

4. Установлено, что на показатели анизотропии ударной вязкости основной эффект оказывает механическая текстура или волокнистость, при этом кристаллографическая текстура не является решающим фактором; показано также, что обусловленная текстурой анизотропия упругих модулей для исследованных магистральных труб незначительна и не должна оказывать существенного влияния на механические свойства.

5. Показано, что наличие сдвиговой компоненты в текстуре поверхностных слоев и ее протяженность по глубине стенки трубы может служить количественным критерием неоднородности процесса деформации исходного листа и дает возможность контролировать эту неоднородность.

6. Разработана методика комплексного испытания материала труб, под воздействием коррозионной среды при статических и циклических нагрузках, включающая испытания на натурной модели по следующей схеме: статическое нагружение при нагрузке $0,8 \sigma_{0,2}$ в коррозионной среде, с последующим измерением кинетики распространения усталостной трещины на воздухе, при этом после каждых $60 \cdot 10^3$ циклов усталостного нагружения образец возвращался на разработанный испытательный стенд под действие статической нагрузки в коррозионной среде.

7. При наличии коррозионной среды скорость роста трещины максимальна на начальной стадии нагружения ($\sim 7,8 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл в интервале от нуля до 2 тыс. циклов) что в 13 раз выше, чем в отсутствие коррозионной среды ($\sim 0,6 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл.), затем скорость роста трещины снижается до $\sim 4,7 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл в интервале от 2 до 5 тыс. циклов, $\sim 1,0 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл в интервале от 10 до 20 тыс. циклов, $\sim 0,6 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл в интервале от 20 до 40 тыс. циклов и $\sim 0,3 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл в интервале от 40 до 60 тыс. циклов.

8. Установлено, что работоспособность трубопровода под действием циклических и статических нагрузок в коррозионной среде, сохраняется до тех пор, пока глубина трещины не превысит $1/5$ толщины стенки, таким образом, критическая величина трещины для трубы толщиной 16,8 мм составляет 3,5 мм.

9. На основании предложенного методологического подхода можно проводить сравнительные испытания различных марок сталей и способов их обработки для магистральных труб с обеспечением объективного критерия оценки работоспособности материалов в различных условиях силового и коррозионного воздействий.

10. Разработанная методика позволяет также оценивать остаточный ресурс магистральных труб для конкретных условий эксплуатации (климатические условия, наличие коррозионной среды, наличие коррозионной защиты и т.д.) на основании экспериментально измеренных значений времени до разрушения при усталостных испытаниях для материала новых труб и труб, отработавших известное время в данных условиях.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ:

Список публикаций в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК

1. Басиев, К.Д. Исследование трубной стали марки Х70 при одновременном воздействии механических напряжений и коррозионной среды./ К.Д. Басиев, К.М. Дзиев, Л.Н. Величко, А.А. Бигулаев, **С.Д. Мусаев**. // Коррозия: материалы и защита. 2013. №8. С.16-18.
2. **Мусаев, С.Д.** Исследование особенностей развития усталостных трещин в магистральных трубопроводах./ **С.Д. Мусаев**, С.Я. Бецофен. // Деформация и разрушение материалов. 2015. №9. С.40-45.
3. Бецофен, С.Я. Влияние агрессивных сред на трещиностойкость стали под нагрузкой./ С.Я. Бецофен, **С.Д. Мусаев**. // Деформация и разрушение материалов. 2016. №3. С.26-30. (Перечень ВАК); (Перевод, Scopus) Betsofen S.Ya. Effect of corrosive media on the cracking of pipe stile under load./ S.Ya. Betsofen , **S.D. Musaev**. // Russian Metallurgy (Metally). 2016. №10. С.981-985.
4. Бецофен, С.Я. Количественные характеристики текстуры магистральных труб./ С.Я. Бецофен, Г.А. Филиппов, А.М. Арсенкин, **С.Д. Мусаев**, В.И. Славов// Деформация и разрушение материалов. 2017. №8. С. 30-38.

Список объектов интеллектуальной собственности:

1. Устройство для определения дефектов образца магистральных трубопроводов. К.Д. Басиев, А.А. Бигулаев, М.Ю. Кодзаев, **С.Д. Мусаев**, Д.А. Камболов, Г.И. Хабалов. RU 2013137070. Дата рег.10.03.2014.
2. Способ контроля роста усталостной трещины в магистральном трубопроводе. **С.Д. Мусаев**, С.Я. Бецофен. RU 2015155354. Дата рег. 12.04.2017.
3. Программа вычисления рентгеновских упругих констант для кубических кристаллов. С.Я. Бецофен, М.И. Князев, И.А. Грушин, **С.Д. Мусаев**, М.И. Долгова. RU 2017613236. Дата рег.14.03.2017.

Список публикаций в других научных журналах и сборниках трудов:

1. Басиев, К.Д. Разработка методики оценки трещиностойкости стальных конструкций в агрессивных средах./ К.Д. Басиев, Д.А. Камболов, **С.Д. Мусаев**, Г.И. Хабалов. // Сборник материалов республиканской научно-технической конференции «Пути совершенствования качества строительства промышленных и гражданских зданий и инженерных сооружений». 2012. С. 241-248.
2. Басиев, К.Д. Исследование развития поверхностных трещин в стальных конструкциях./ К.Д. Басиев, Д.А. Камболов, **С.Д. Мусаев**, Г.И. Хабалов. // Сборник материалов республиканской научно-технической конференции «Пути совершенствования качества строительства промышленных и гражданских зданий и инженерных сооружений». 2012. С. 231-238.
3. **Мусаев, С.Д.** Развитие усталостных трещин в коррозионных средах в условиях циклического нагружения./ **С.Д. Мусаев**. // Материалы Международной научно-практической конференции «Инновации в современной науке». 2014. С. 53-61.
4. **Мусаев, С.Д.** Выявление коррозионно-механических дефектов и оценка остаточного ресурса магистральных трубопроводов. / **С.Д. Мусаев**, Майрансаев З.Р. // Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. 2015 С.36-38
5. **Мусаев, С.Д.** Исследование влияния коррозионного воздействия и неоднородности структуры на кинетику роста усталостной трещины в материале магистрального трубопровода. / **С.Д. Мусаев**. // XLII Гагаринские чтения, Материалы Всероссийской НТК. 2016. т.3. С. 409-410.
6. Грушин, И.А. Совершенствование методики расчета анизотропии физико-механических свойств из обратных полюсных фигур. / И.А. Грушин, **С.Д. Мусаев**, К.А. // XLII Гагаринские чтения, Материалы Всероссийской НТК. 2016. т.3. С. 395-396.
7. **Мусаев, С.Д.** Проблемы эксплуатации и контроля остаточного ресурса магистральных трубопроводов. / **С.Д. Мусаев**. // Сборник статей VI Международной научно-практической конференции. 2017. С. 61-63.