

На правах рукописи

Ряховских Илья Викторович

**КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИОННО-
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ
НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ И ОЦЕНКА ИХ
СТОЙКОСТИ ПРОТИВ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ
ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Автор:



Москва 2013

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» и Обществе с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ»

Научные руководители:

Кохтев Сергей Александрович, кандидат технических наук, профессор НИЯУ «МИФИ»

Есиев Таймураз Сулейманович, кандидат технических наук, начальник лаборатории надежности трубопроводов ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Официальные оппоненты:

Кудря Александр Викторович, доктор технических наук, профессор НИТУ «МИСиС»

Маршаков Андрей Игоревич, доктор химических наук, начальник лаборатории ИФХЭ РАН

Ведущая организация:

Федеральное Государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии имени И.П. Бардина»

Защита состоится «23» октября 2013 г. в 17 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.04 НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д.31

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ

Автореферат разослан «19» сентября 2013 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор



И.И. Чернов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В последние годы проблема коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) трубных сталей относится к числу наиболее актуальных в странах, обладающих протяженной системой магистральных газопроводов (МГ) высокого давления. В разное время об отказах, связанных с КРН, сообщали США, Канада, СССР, Австралия, Ирак, Пакистан, Венесуэла и др.

На МГ России с проблемой КРН столкнулись еще в конце 70-х годов, а особую остроту она приобрела в конце 90-х, начале 2000-х годов.

По данным ОАО «Газпром» в составе Единой системы газоснабжения (ЕСГ) эксплуатируется 161700 км МГ и свыше 2100 км технологических трубопроводов 215 линейных компрессорных станций. Более 60% от общей протяженности МГ составляют газопроводы диаметром 1020–1420 мм из труб на базе малоуглеродистых низколегированных трубных сталей, при этом большинство из них имеют пленочные защитные покрытия трассового нанесения, нормативно установленные сроки службы которых истекли. В таких условиях особое влияние на надежность ЕСГ оказывают деградационные процессы, в числе которых коррозия общего и локального характера, эрозионный износ газопроводов, а также множественные поражения труб трещиноподобными дефектами, большинство из которых образованы по механизму КРН. При этом опасность развития именно дефектов КРН, по причине которого происходит ежегодно до 50% отказов МГ, заключается в том, что в настоящее время не выработаны методы надежного прогнозирования данного процесса. Последствия отказов МГ по причине КРН представляют существенную опасность для работающего персонала и сопряжены со значительными материальными и экологическими рисками для газотранспортных организаций.

Существующие феноменологические представления о явлении КРН металла труб на МГ подтверждают гипотезу совместного влияния 3-х групп факторов, к числу которых относятся:

- наличие околотрубной среды, обладающей специфическими коррозионными свойствами;
- материал труб, склонный к коррозионному растрескиванию в условиях длительного взаимодействия с околотрубной средой (металлургические и структурные особенности материала, деформационная микроструктура);
- напряженно-деформированное состояние трубы, обусловленное особенностями режимов эксплуатации газопровода (давление, циклические нагрузки и т.д.), технологического передела в цепочке производства труб (зоны концентрации напряжений в местах отклонения геометрии от теоретической окружности, остаточные напряжения и деформации, особые свойства поверхностных слоев металла).

Очевидно, что в наибольшей степени поддаются контролю факторы металлургического и технологического трубного передела при производстве труб. В то же время, нормируемые сегодня параметры трубных сталей не позволяют оценить стойкость труб против КРН, а существующие методы оценки стойкости металлов против КРН не обладают достаточной достоверностью применительно к трубным сталям, так как не учитывают их структур, сформированных в процессе металлургического и трубного передела, а также реальных условий эксплуатации МГ.

Вышеотмеченное определяет актуальность работ, направленных на освоение малоуглеродистых низколегированных трубных сталей, обладающих повышенной стойкостью против КРН, для капитального ремонта и строительства МГ.

Цель работы

Комплексный анализ коррозионно-механических свойств малоуглеродистых низколегированных трубных сталей и оценка их стойкости против коррозионного растрескивания под напряжением, в том числе в зависимости от параметров металлургического качества сталей.

Для достижения цели в работе решены следующие задачи.

- Выявлены основные стадии реализации процесса КРН трубных сталей в условиях эксплуатации магистральных газопроводов.
- Сформулированы требования к испытанию малоуглеродистых низколегированных трубных сталей в лабораторных условиях на стойкость против КРН.
- Разработана комплексная методика исследования коррозионно-механических свойств трубных сталей в лабораторных условиях.
- Установлено соответствие полученных в результате эксперимента трещин эксплуатационным трещинам КРН.
- Исследована роль металлургического и технологического переделов в процессе КРН трубных сталей различных классов прочности, а также микроструктурных особенностей стали, влияющих на ее стойкость против КРН.
- Разработаны критерии классификации трубных сталей по стойкости против КРН.

Научная новизна работы.

- 1) Впервые разработана методика испытания малоуглеродистых низколегированных трубных сталей в лабораторных условиях на стойкость против КРН, учитывающая реальные условия эксплуатации МГ, включая наличие специфической коррозионной среды и напряженно-деформированного состояния, и показано соответствие морфологии трещиноподобных дефектов, образующихся в трубных сталях при лабораторных испытаниях, стресс-коррозионным дефектам труб, образованным в реальных условиях эксплуатации магистральных газопроводов. Предложены критерии комплексной оценки стойкости стали против КРН при испытаниях по разработанной методике.
- 2) Прямыми наблюдениями установлено отрицательное влияние на стойкость трубных сталей против КРН повышенной плотности коррозионно-активных неметаллических включений (КАНВ) на базе включений алюминатов кальция, наличие которых ускоряет процессы локальной коррозии сталей при контакте поверхности трубы с околотрубной средой, а также способствует поглощению водорода при эксплуатации.
- 3) Установлено, что зарождение трещин КРН происходит на локальных коррозионных повреждениях поверхности труб (коррозионные язвы), местами образования которых являются имеющиеся структурные несовершенства стали, выходящие на поверхность образца, к которым относятся неметаллические включения, в числе которых КАНВ.
- 4) Выявлено отрицательное влияние на стойкость против КРН исследованных трубных сталей структурной неоднородности – чередования участков полигонального феррита с продуктами промежуточного превращения аустенита. Увеличение со-

держания полигонального феррита от 0 до 50% приводит к снижению стойкости против КРН.

- 5) Установлено, что трубные стали одних и тех же классов прочности разных производителей обладают различной стойкостью против КРН, которая проявляется в виде упруго-пластических деформаций и изменении числа циклов нагружения до зарождения трещин, а также конфигурации и плотности образованных трещин, что определяется структурой стали.

Практическая значимость работы

Результаты работы позволяют дать ряд обоснованных рекомендаций по выбору стальных труб, обладающих повышенной стойкостью против КРН, для строительства и ремонта магистральных газопроводов, представляют инструмент оценки стойкости трубных сталей против КРН разработчикам и производителям трубной продукции, а также позволяют выполнять комплексный анализ влияния условий эксплуатации магистральных газопроводов на процесс КРН малоуглеродистых низколегированных сталей.

Полученные в ходе диссертационной работы результаты внедрены в четырех отраслевых стандартах и одних рекомендациях организации ОАО «Газпром».

Автор работы награжден медалью «Лауреат ВВЦ» 11-й Международной специализированной выставки «АНТИКОР и ГАЛЬВАНОСЕРВИС» за работу «Высокоэффективная методика комплексной оценки склонности металла труб магистральных газопроводов к коррозионно-механическим повреждениям» (Удостоверение № 207 от 26.06.2013 г.).

Основные положения, выносимые на защиту

- 1) Разработанные требования к испытанию в лабораторных условиях малоуглеродистых низколегированных трубных сталей на стойкость против КРН с учетом реальных условий эксплуатации магистральных газопроводов.
- 2) Разработанная комплексная методика исследования коррозионно-механических свойств трубных сталей, позволяющая оценивать их стойкость против КРН.
- 3) Результаты исследования морфологии стресс-коррозионных трещин, полученных в трубных сталях по результатам коррозионно-механических испытаний и эксплуатации МГ.
- 4) Результаты исследования роли металлургического и технологического переделов в процессе образования и развития дефектов КРН трубных сталей.
- 5) Разработанные критерии классификации малоуглеродистых низколегированных трубных сталей по стойкости против коррозионного растрескивания под напряжением.

Достоверность результатов исследований и выводов подтверждается применением стандартизированных методов лабораторных испытаний и исследований сталей, воспроизводимостью и согласованностью анализируемых данных, использованием современных методов исследования, включая оптическую и просвечивающую электронную микроскопию, корреляцией их с имеющимися экспериментальными данными и результатами других исследователей.

Личный вклад соискателя

Соискатель принимал непосредственное участие в обсуждении и постановке задачи разработки комплексной методики исследования коррозионно-механических

свойств трубных сталей, проведении испытаний трубных сталей на стойкость против КРН, анализе полученных результатов, подготовке публикаций по теме работы.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и библиографии. Работа изложена на 155 страницах, содержит 61 рисунок, 25 таблиц и список цитируемой литературы из 169 наименований.

Апробация работы

Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах, совещаниях и конференциях: Международная научно-техническая конференция «Целостность и прогноз технического состояния газопроводов - PITSO-2007» (г. Москва, 2007 г.); Международная научно-практическая конференция молодых специалистов и ученых «Применение новых технологий в газовой отрасли: опыт и преемственность» (г. Москва, 2008 г.); International Gas Union Research Conference (IGRC-2008) (Paris, 2008 г.); III Международная конференция «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» (GTS-2009) (г. Москва, 2007 г.); VII Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов по проблемам газовой промышленности России «Новые технологии в газовой промышленности» (г. Москва, 2007 г.); Конференция молодых специалистов «Системный подход к развитию молодых специалистов – важный фактор конкурентоспособности предприятий газовой отрасли» (г. Анапа, 2008 г.); V конференция молодых ученых и специалистов (г. Ухта, 2008 г.); Заседание НТС ОАО «Газпром», секция «Сварка, диагностика, защита от коррозии и ремонтные технологии», по вопросу «Проблемы коррозионного растрескивания под напряжением объектов магистральных газопроводов» (г. Москва 2009 г.); II Международная научно-практическая конференция эффективное управление комплексными нефтегазовыми проектами – ЕРМИ-2010 (г. Ухта, 2010 г.); 29-й тематический семинар «Диагностика оборудования и трубопроводов КС» (г. Небуг, 2010 г.); Семинар «Повышение надежности функционирования объектов ЕСГ на основе разработок и внедрения новых технических решений на КС ОАО «Газпром» (г. Томск, 2010 г.); Техническое совещание «Итоги выполнения комплексного ремонта технологических трубопроводов КС ОАО «Газпром» в 2010 году и организация работ по КРТТ в 2011 году» (г. Видное, 2010 г.); Европейский конгресс по коррозии и защите материалов «Eurocorr 2010» (г. Москва, 2010); Отраслевое совещание «Организация диагностических работ на компрессорных станциях ОАО «Газпром» в 2011 г.» (г. Москва, 2011 г.); Отраслевое совещание «Результаты проведения диагностического обслуживания оборудования и трубопроводов КС, ДКС, СОГ, КС ПХГ в 2010 году, задачи на 2011 год» (г. Видное, 2011 г.); IV Международная конференция «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» (GTS-2011) (г. Москва, 2011 г.); 31-й тематический семинар «Диагностика оборудования и трубопроводов КС» (г. Небуг, 2012 г.); Отраслевое совещание «Результаты проведения диагностического обслуживания оборудования и трубопроводов КС, ДКС, СОГ, КС ПХГ в 2012 году, задачи на 2013 год» (г. Видное, 2012 г.).

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 15 работ, включая 6 – в изданиях, входящих в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель работы и решаемые задачи, указаны новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены общие представления о проблеме стресс-коррозии магистральных газопроводов в России и за рубежом, показаны идентификационные металлофизические признаки КРН трубных сталей в процессе эксплуатации газопроводов, обобщены существующие модельные представления о процессе КРН малоуглеродистых низколегированных трубных сталей в грунтовых электролитах, выполнен анализ ранее проведенных исследований внешних признаков КРН трубных сталей, а также условий и факторов, определяющих протекание процесса на магистральных газопроводах.

Установлено, что наиболее важными результатами предыдущих исследований, касающимися влияния металлургического качества сталей на развитие КРН, являются заключения о влиянии структуры, неметаллических включений, уровня внутренних напряжений трубных сталей. При этом механизмы влияния указанных и многих других характеристик металлургического качества стали на ее стойкость против КРН не исследованы или весьма противоречивы.

Показано, что большинство исследователей процесса КРН оценивали влияние отдельных факторов или групп факторов, как правило, сформированных под действием внешних по отношению к газопроводу механических и коррозионных воздействий, без учета реального состояния нагруженной поверхности металла труб в контакте с грунтовым электролитом в виду отсутствия комплексных методов оценки стойкости сталей против КРН, учитывающих влияния их структуры на процесс КРН, сформированного в процессе металлургического и трубного передела. Практически не исследовано влияние на стойкость против КРН новых типов неметаллических включений, появление которых в стали вызвано коренными изменениями металлургических технологий. К таким включениям относятся, в частности, так называемые коррозионно-активные неметаллические включения (КАНВ), способные приводить к аномальному ускорению коррозионных процессов в водных средах.

Во второй главе приведены результаты анализа основных стадий, условий и факторов развития КРН, разработанные на его основе требования к комплексной методике исследования коррозионно-механических свойств трубных сталей и оценки их стойкости против КРН.

Показано, что процесс развития КРН трубных сталей возможно разделить на две основные стадии.

На первой стадии предрасположенность стальных труб к КРН обуславливается их структурой, технологической наследственностью, сформированной в процессе производства проката, и коррозионной агрессивностью околотрубной среды. В результате, на поверхности стали формируются аномальные участки, на которых впоследствии происходит зарождение и развитие стресс-коррозионных трещин. Сформулированы условия реализации процесса КРН в трубной стали: $\sigma_I > \sigma_{Iкр}$; $\sigma_{II} > \sigma_{IIкр}$ ($\varepsilon_{пл} > \varepsilon_{пл.кр}$); $w > w_{кр}$; $v_{пл} \geq v_{пл.кр}$. Здесь σ_I , σ_{II} – действующие в трубах напряжения I и II рода соответственно; $\sigma_{Iкр}$, $\sigma_{IIкр}$ – критические (пороговые) для растрескивания напряжения I и II рода; $\varepsilon_{пл}$ – величина пластической деформации металла в зоне растрескивания; $\varepsilon_{пл.кр}$ – критическая (пороговая) для растрескивания величина пластической деформации; w – плотность упругой энергии в металле труб под нагрузкой; $w_{кр}$ – кри-

тическая плотность упругой энергии металла труб в условиях коррозионного растрескивания; $v_{пл}$ – скорость микропластической деформации; $v_{пл.кр}$ – критическое значение скорости микропластической деформации в условиях коррозионного растрескивания. Показано, что количество электролита и концентрация агрессивных по отношению к металлу элементов играют существенную роль только в процессе образования коррозионных дефектов, являющихся впоследствии локальными концентраторами напряжений на поверхности трубной стали в местах образования коррозионно-механических трещин, в то время как образование микротрещин происходит в условиях сформированной специфичной среды, не обладающей выраженными агрессивными свойствами по отношению к металлу, так как в противном случае будет наблюдаться опережающее разрушение стали по механизму общей коррозии. Обоснована роль различных элементов структуры стали в процессе образования стресс-коррозионных трещин, в первую очередь тех, которые являются эффективными ловушками для водорода, способствуют его накоплению в атомарной или молекулярной форме. Сделано предположение о возможной роли КАНВ в снижении стойкости стали против КРН.

По результатам анализа второй стадии процесса КРН установлено, что ее протекание в значительной степени определяется механическим поведением системы «газопровод-среда», и при определенных обстоятельствах может завершаться разрушением труб по механизму коррозионной усталости или в результате повторно-статического роста трещины, активированного влиянием коррозии. Таким образом, при исследовании второй стадии процесса КРН в лабораторных условиях целесообразно обеспечивать ее катализацию за счет применения циклической нагрузки, позволяющей исчерпать запас пластичности материала в вершине трещины за относительно короткий период времени.

Установлено, что развитие микротрещин в макротрещины, слияние макротрещин в критические трещины определяются их формой, плотностью на поверхности металла труб, при этом наиболее опасными с точки зрения надежности трубопроводов являются узкие колонии продольно ориентированных трещин, имеющих тенденцию к слиянию в процессе роста и образованию критической трещины.

Разработаны требования к испытанию трубных сталей на стойкость против КРН в лабораторных условиях:

- 1) метод испытания должен учитывать влияние исходного состояния металла труб и его поверхности на склонность стали к КРН;
- 2) метод испытания должен отражать неоднородность структуры и напряженного состояния оцениваемой стали по периметру трубы;
- 3) метод испытания должен учитывать условия работы металла труб с учетом одностороннего воздействия коррозионной среды, натурной толщины стенки и двухосного напряженного состояния;
- 4) состав и свойства лабораторной коррозионной среды должны отвечать по своим главным параметрам и степени агрессивности природным коррозионным средам;
- 5) полученные в ходе испытаний трещиноподобные дефекты на поверхности образцов должны соответствовать эксплуатационным дефектам КРН стальных труб МГ.

На основании сформулированных требований к испытанию в лабораторных условиях трубных сталей на стойкость против КРН разработана комплексная методика исследования коррозионно-механических свойств трубных сталей, включающая

исследования механических, микроструктурных и коррозионных параметров стали по стандартным методикам; методы оценки стойкости стали против локальной коррозии и испытания трубных сталей на стойкость против КРН.

Для проведения испытаний сталей на стойкость против КРН автором разработан экспериментальный метод моделирования стресс-коррозии трубных сталей путем нагружения крупномасштабных образцов в коррозионной среде, позволяющий проводить количественную оценку стойкости трубной стали против КРН с учетом реальных условиях эксплуатации магистральных газопроводов. В качестве лабораторной среды, моделирующей коррозионное воздействие на материал труб, использован раствор Паркинса – $NS4$ ($0,483 \text{ NaHCO}_3 + 0,122 \text{ KCl} + 0,137 \text{ CaCl}_2 + 0,131 \text{ MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, г/л). Показатель pH после барботажа CO_2 составляет 6,8. Схема захватов испытательной машины с установленным образцом представлена на рис. 1. Для учета влияния коррозионной среды выполнялась выдержка образца при комнатной температуре с коррозионной ячейкой в течение 72 ч до проведения испытаний.

Расчет напряжений в рабочей части образца был выполнен в балочном приближении по формуле:

$$\sigma = M_{\max} / \xi W_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где ξ – коэффициент уменьшения жесткости сечения образца изгибу вследствие начальной кривизны образца в кольцевом направлении; $M_{\max}$ – максимальный изгибающий момент в центральной части образца, вычисляемый по формуле:

$$M_{\max} = FL/2, \quad (2)$$

где F – приложенное усилие, Н; L – рычаг, м; $W_{\text{пр}}$ – приведенный момент сопротивления сечения образца, вычисляемый по формуле:

$$W_{\text{пр}} = b_{\text{пр}} h^2 / 6, \quad (3)$$

h – толщина образца, м; b – ширина рабочей зоны образца, м.

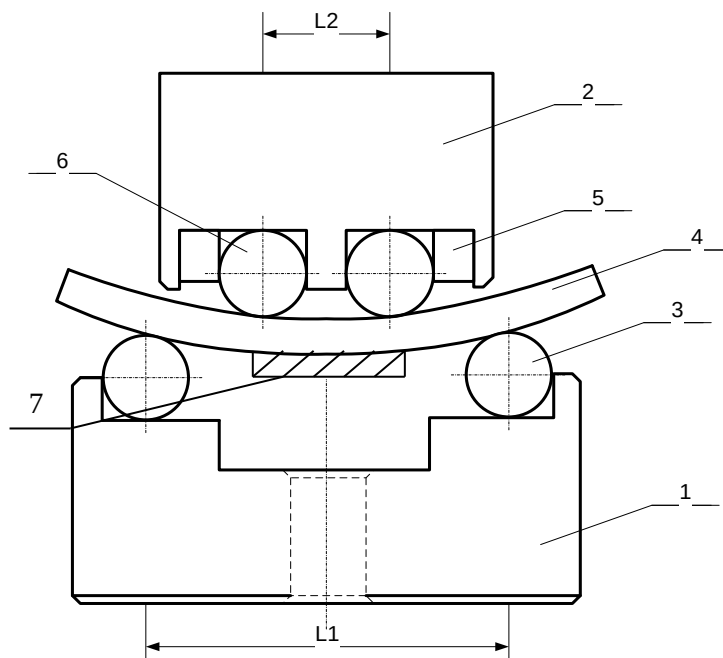


Рис. 1. Схема захватов испытательной машины с установленным образцом:

1 – нижняя опора; 2 – верхняя опора; 3 – нижние опорные ролики; 4 – испытуемый образец; 5 – проставка; 6 – верхние опорные ролики; 7 – коррозионная ячейка; L1 и L2 – расстояния между нижними и верхними опорными роликами соответственно

Момент образования макротрещин трещин фиксировался по изменению наклона диаграммы «перемещение захватов испытательной машины S – количество циклов

нагрузки N » автоматически с шагом 1000 циклов (рис. 2). Величина S характеризует уровень упруго-пластической деформации поверхностного слоя рабочей зоны образца, и ее резкое снижение в процессе испытаний происходит при образовании трещин под действием накапливающихся растягивающих напряжений.

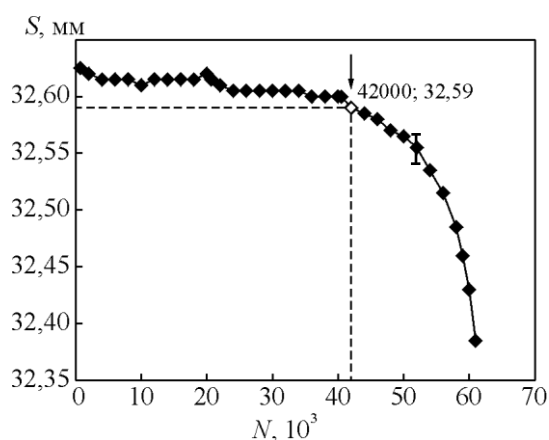


Рис.2. Типичная диаграмма изменения величины перемещения захвата испытательной машины S от количества циклов нагружения N при циклических испытаниях трубной стали на стойкость против КРН
(координатой 42000; 32,59 показан момент появления макротрещин в образце)

В третьей главе выполнены исследования коррозионно-механических свойств малоуглеродистых низколегированных трубных сталей класса прочности К60 и К65 шести партий труб наружным диаметром 1420 мм и толщиной стенки до 18,7 мм, изготовленных на разных металлургических предприятиях с использованием различных технологий формовки (табл. 1).

Таблица 1

Перечень образцов для испытаний на КРН

№ стали	Номер образца	Технология формовки труб	Класс прочности стали	Зоны вырезки образцов относительно продольного сварного шва
1	1.1	УОЕ-формовка с одним сварным швом	К60	$2\pi/3$
	1.2			π
2	2.1		К65	$2\pi/3$
	2.2			π
3	3.1	УОЕ-формовка с одним сварным швом	К60	$2\pi/3$
	3.2			π
4	4.1		К65	$2\pi/3$
	4.2			π
5	5.1	Вальцовая формовка	К60	$2\pi/15$
	5.2			π
6	6.1		К65	$2\pi/15$
	6.2			π

Для всех исследуемых сталей был определен химический состав методом спектрального анализа на эмиссионном спектрометре SpectroLabS по ГОСТ 18895 (табл. 2).

Таблица 2

Результаты определения химического состава исследуемых сталей

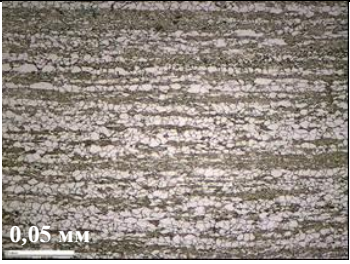
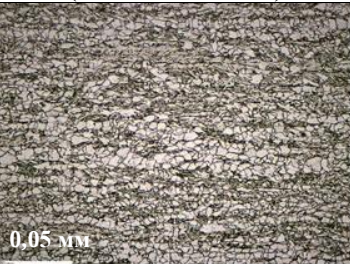
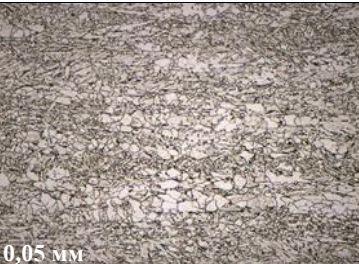
№ стали	Класс прочности	Содержание элементов, мас. %												
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	V	Nb
1	K60	0,061	0,26	1,54	0,009	0,002	0,017	0,19	0,16	0,105	0,037	0,017	0,05	0,049
2	K65	0,079	0,23	1,8	0,009	0,002	0,017	0,18	0,24	0,26	0,03	0,012	-	0,027
3	K60	0,093	0,26	1,61	0,009	<0,002	0,039	0,034	-	0,06	0,037	0,016	0,08	0,04
4	K65	0,057	0,21	1,65	0,009	0,003	0,21	0,23	0,22	0,076	0,042	0,017	0,025	0,067
5	K60	0,066	0,24	1,54	0,008	0,002	0,022	0,19	0,14	0,10	0,037	0,015	0,05	0,045
6	K65	0,055	0,23	1,63	0,008	<0,002	0,20	0,23	0,22	0,057	0,045	0,021	0,025	0,056

Из таблицы видно, что для всех исследуемых сталей характерно сравнительно низкое содержание углерода, высокая концентрация марганца, наличие микролегирующих элементов – титана, ниобия и ванадия в разных соотношениях. В химический состав всех сталей, кроме стали № 3, входит молибден. При этом следует отметить низкое содержание серы, особенно в сталях № 3 и 6 (<0,002%) и ее некоторое повышение до 0,003% – в стали № 4.

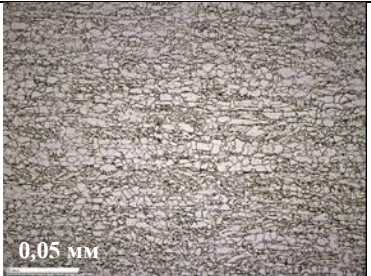
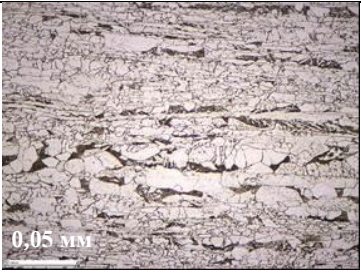
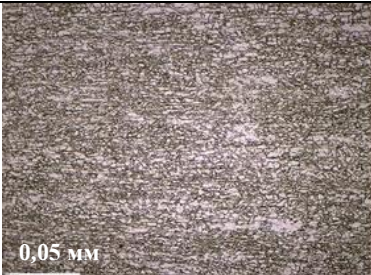
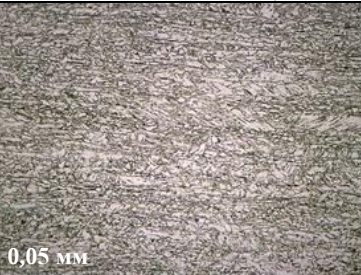
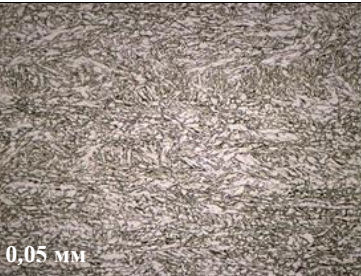
Выполнено исследование микроструктуры сталей на оптическом микроскопе Axiovert 40MAT (ZEISS) после травления в 4%-ном растворе азотной кислоты в спирте. По результатам металлографического анализа определены следующие параметры стали: фазовый состав, размер зерна феррита (ГОСТ 5639), содержание традиционных неметаллических включений (ГОСТ 1778). Результаты исследования приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты металлографического анализа исследованных сталей

№ стали	Характер микроструктуры		Параметры зерна феррита (№ зерна/ размер(мкм)/ ср. размер (мкм))	
	Ближе к наружной поверхности	Осевая зона	Поверхность	Осевая зона
1	 Ф(46%)+Б (полосчатость)	 Ф (24%)+Б	11 – 12/ 3 – 8/ 5,3	10 – 12/ 3 – 11/ 6,2
2	 Ф(50%)+Б (полосчатость)	 Ф(10%)+Б	11 – 12/ 3 – 8/ 4,0	10 – 12/ 3 – 11/ 5,9

Продолжение таблицы 3

3	 Ф(52%)+Б	 Ф(48%)+П(6%)+Б (разнозернистость, полосчатость)	11 – 12/ 3 – 8/ 5,6	9 – 12/ 4 – 16/ 9,0
4	 ИФ+Б+ОА	 ИФ+Б+ОА		
5	 ИФ+Б+ОА	 ИФ+Б+ОА		
6	 ИФ+Б+ОА	 ИФ+Б+ОА		

Примечание: Ф – полигональный феррит, Б – бейнит, ИФ – игольчатый феррит, ОА – остаточный аустенит, П – перлит.

Значительные различия в структуре исследованных сталей можно объяснить неоднородностью химического состава, влиянием процессов горячей деформации и ускоренного охлаждения, а также неравномерностью (γ - α) превращения.

Выполнена оценка стойкости исследуемых сталей против локальной коррозии путем определения плотности коррозионно-активных неметаллических включений (которое оценивали как вблизи наружной поверхности трубного образца, так и по его сечению), а также по методике СТО 00190242-001-2008 «Методика определения стойкости углеродистых и низколегированных сталей против локальной коррозии», разработанной ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина». Указанная методика заключается в снятии потенциодинамической кривой (ПДК) прямого и обратного хода в

водных средах, содержащих ионы хлора, и определении значений параметров ПДК, позволяющих оценивать стойкость стали против локальной коррозии, в том числе:

- 1) максимальная плотность тока i_{max} , А/м²;
- 2) плотность тока при потенциале -300 мВ, i_{-300} , А/м²;
- 3) потенциал активации (появления анодного тока) $E_{акт}$, мВ.

Повышение значений плотности тока и снижение потенциала активации свидетельствуют о снижении стойкости против локальной коррозии. Наиболее адекватные результаты оценки коррозионной стойкости сталей получаются в водном растворе с концентрацией ионов хлора 10–30 г/л при изменении потенциала со скоростью 1,2–2,5 В/ч в интервале от – (650–500) мВ до – (350–250) мВ. Как свидетельствуют результаты сопоставления экспериментальных испытаний с фактическими сроками эксплуатации стальных труб в нефтепромысловых условиях, увеличение максимальной плотности тока от 20 до 110 А/м² соответствует снижению срока эксплуатации труб с 8 лет до 1 года.

Результаты определения плотности КАНВ в исследуемых сталях, а также их электрохимических параметров приведены в табл. 4. По результатам исследования установлено, что одним из основных факторов, стимулирующих коррозионные процессы в исследуемых сталях при взаимодействии с электролитом, является присутствие КАНВ активность которых связана, в частности, с повышенным уровнем растягивающих напряжений в матрице вокруг включений. Указанный факт подтверждается на примере сталей № 1 и 4, которые имеют повышенную плотность КАНВ, как на поверхности, так и по сечению исследуемых образцов (см. табл. 4), а также низкую стойкость против локальной коррозии при испытаниях по электрохимической методике – высокие значения плотности тока i_{max} и низкие значения потенциала активации $E_{акт}$. Это свидетельствует о том, что именно КАНВ обладают высокой способностью стимулировать коррозионные процессы в исследуемых сталях.

Таблица 4

Результаты определения плотности КАНВ и электрохимических параметров
в исследованных сталях

№ стали	Вблизи наружной поверхности	По сечению образца	$E_{акт}$, мВ	i_{-300} , А/м ²	i_{max} , А/м ²
	КАНВ, вкл./мм ²	КАНВ, вкл./мм ²			
1	4,0	5,1	- 405	118,0	118,0
2	2,2	0,9	- 398	94,6	94,6
3	3,0	0,7	- 442	102,2	102,2
4	4,2	5,3	- 410	102,2	102,2
5	2,5	3,6	- 376	74,4	86,8
6	4,3	2,7	- 408	71,8	72,7

Отмечена также низкая стойкость против локальной коррозии (высокие значения плотности тока и наиболее низкое значение потенциала активации) для стали варианта № 3 с максимальным содержанием полигонального феррита (52%), при среднем значении плотности КАНВ в поверхностных участках (3 вкл./мм²) и низкой плотности КАНВ во внутренних участках. Таким образом, микроструктурная неоднородность в сочетании даже со сравнительно невысокой плотностью КАНВ поверхностных участков может приводить к быстрому зарождению очагов локальной коррозии.

Выполнены испытания трубных сталей на стойкость против КРН. По результатам исследования внешней поверхности образцов после испытаний установлено внешнее соответствие полученных на испытанных образцах трещин, с трещинами стресс-коррозии на фрагментах реальных труб (рис. 3); отмечены их следующие характерные особенности: трещины образуют колонии единичных трещин, расположенных перпендикулярно приложенным напряжениям; трещины имеют различную длину, что указывает на различия кинетики их развития; рост близко расположенных трещин приводит к их слиянию и образованию протяженных трещин.

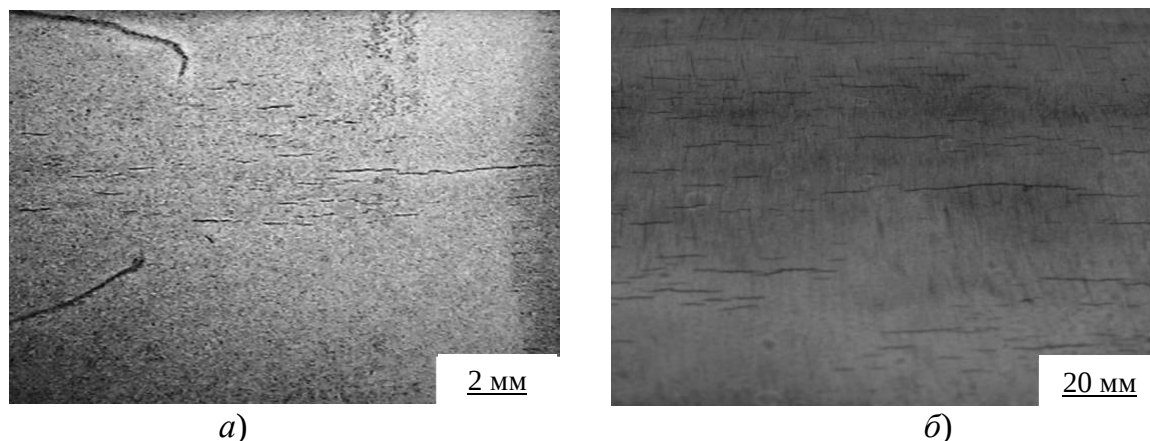


Рис. 3. Коррозио-механические трещины на поверхности трубной стали:
а – трещины на поверхности модельного образца (сталь № 1, образец 1.1) после испытаний; *б* – эксплуатационные трещины КРН на трубе после 26 лет эксплуатации

Методом электронной микроскопии установлены следующие основные параметры образовавшихся на поверхности образцов трещин:

- все трещины имеют малое раскрытие берегов на поверхности образцов (рис. 4, *а* и 5, *а*) и незначительное коррозионное растворение берегов и вершины по сечению (рис. 4, *г* и 5, *г*), что свидетельствует о низкой коррозионной активности среды в процессе испытаний;
- крупные трещины, образующиеся в результате слияния микротрещин (рис. 4, *б* и 5, *б*), имеют четкую полуэллиптическую форму в сечении (рис. 4, *д* и 5, *д*) с характерным для КРН превалированием длины трещины над глубиной, что указывает на превалирующую роль механических напряжений в их развитии;
- местами зарождения трещин являются локальные коррозионные повреждения поверхности исследованных образцов (рис. 4, *в* и 5, *б*, *в*);
- трещины в поперечном сечении образцов, характеризуется макро- и микроветвлениями (см. рис. 4, *г* и 5, *г*), что также соответствует характеру распространения стресс-коррозионных трещин в трубных сталях МГ;
- в изломах трещин наблюдаются характерные для трещин стресс-коррозии веерообразные рубцы, максимальная глубина исследованных трещин в изломе образца из стали № 1 составила 600 мкм (рис. 4, *д*), из стали № 2 составила 240 мкм (рис. 5, *д*);
- при больших увеличениях на поверхности ряда исследованных трещин отмечен развитый рельеф, свидетельствующий о том, что развитию трещин сопутствовала пластическая деформация приповерхностных слоев стали; в изломах ряда трещин при значительных увеличениях можно выявить наличие регулярных бороздок, свидетельствующих о циклическом характере нагружения (рис. 4, *е* и рис. 5, *е*).

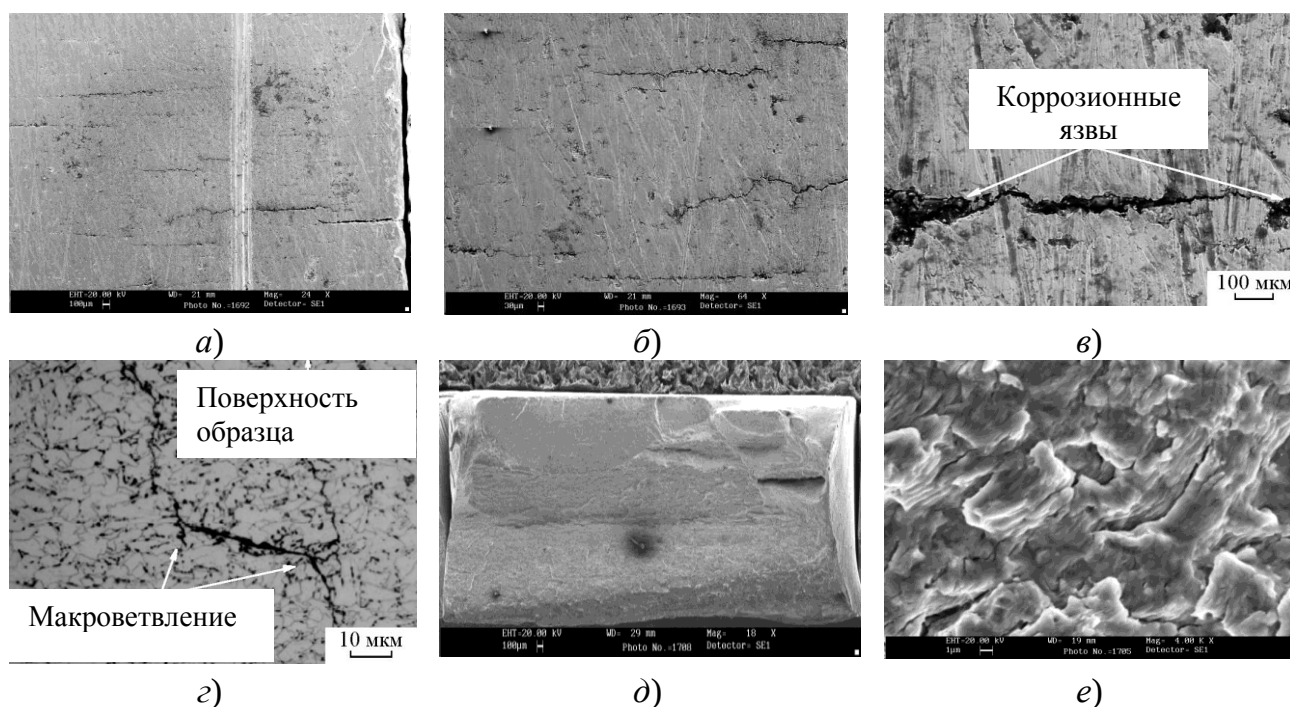


Рис. 4. Образец из стали № 1 (K60) после проведения испытаний:

a – поверхность рабочей части образца ($\times 24$), колония трещин; *б* – поверхность рабочей части образца ($\times 64$), слияние микротрещин; *в* – поверхность рабочей части образца ($\times 200$), трещина, образованная на коррозионном дефекте; *г* – продольный шлиф рабочей части образца ($\times 1500$), макроветвление трещины; *д* – поперечный излом рабочей части образца ($\times 18$), слияние полуэллиптических трещин; *е* – поперечный излом рабочей части образца ($\times 4000$)

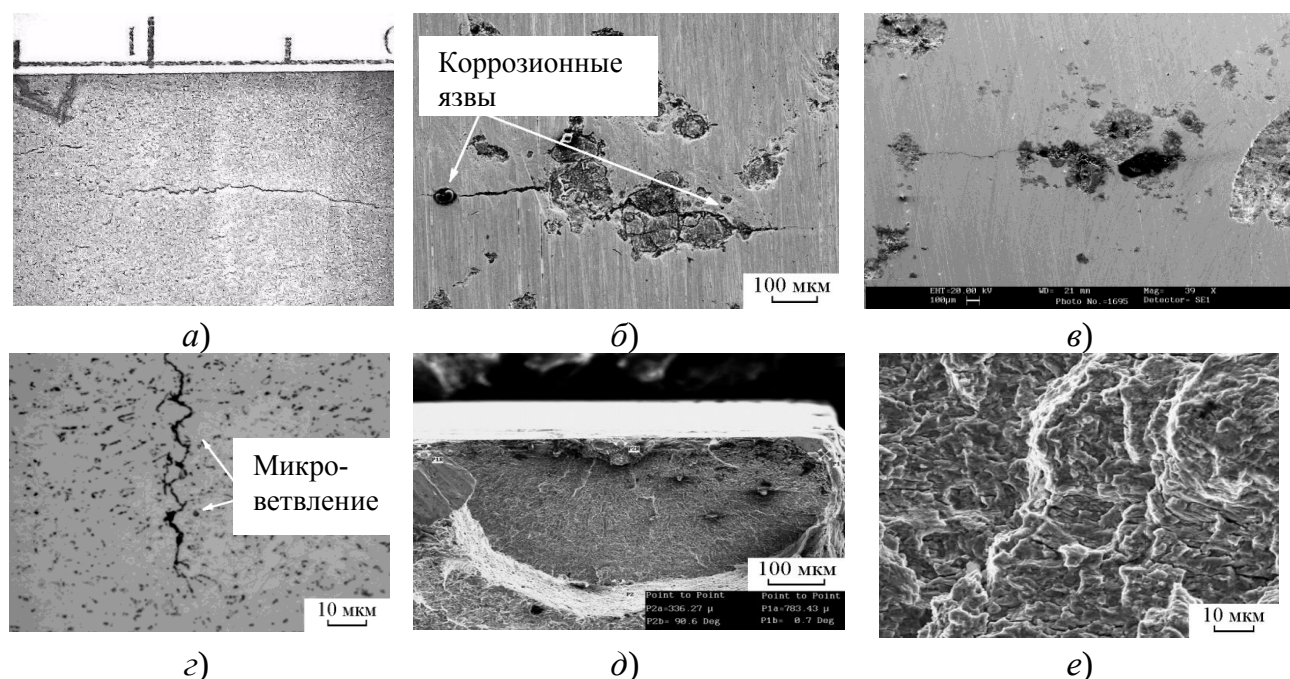


Рис. 5. Образец из стали № 2 (K65) после проведения испытаний:

a – поверхность рабочей части образца ($\times 2$), колония трещин; *б* – поверхность рабочей части образца ($\times 150$), слияние микротрещин; *в* – поверхность рабочей части образца ($\times 40$), трещина, образованная на коррозионном дефекте; *г* – продольный шлиф рабочей части образца ($\times 1500$), макроветвление трещины; *д* – поперечный излом рабочей части образца ($\times 100$), слияние полуэллиптических трещин; *е* – поперечный излом рабочей части образца ($\times 2000$)

По результатам испытания трубных сталей на стойкость против КРН установлено, что расположение трещин на рабочей поверхности всех образцов характеризуется существенной неоднородностью по плотности трещин. Такой характер повреждения поверхности образцов связан с наличием локальных концентраторов напряжений на поверхности металла.

В ходе эксперимента показано, что местами зарождения трещин являются локальные коррозионные повреждения поверхности исследованных образцов (коррозионные язвы). В свою очередь, местами указанных коррозионных повреждений, являются имеющиеся структурные несовершенства стали, выходящие на поверхность образца, к которым относятся КАНВ. Структурная неоднородность (в частности, увеличение содержания полигонального феррита) интенсифицирует указанные процессы.

В ходе проведенных экспериментов установлено, что сочетание высокой плотности КАНВ с повышенной структурной неоднородностью стали – высоким содержанием полигонального феррита – способствует образованию трещин, однако не установлена корреляция между местами образования трещин с наличием структурных составляющих сталей (феррит + бейнит, феррит + перлит) и ликвационной полочатостью.

Сопоставление полученных в результате эксперимента трещин с эксплуатационными стресс-коррозионными трещинами показало их полную идентичность как по морфологии (связь мест зарождения с дефектами поверхности, множественный характер растрескивания, форма трещин и строение излома), так и по особенностям кинетики трещин (склонность к объединению отдельных микротрещин). Таким образом, разработанная методика позволяет воспроизводить условия коррозионного растрескивания под напряжением, а результаты выполненных испытаний правомерно использовать для установления влияния условий и факторов образования и развития дефектов КРН трубных сталей.

В четвертой главе выполнен количественный анализ результатов комплексных испытаний сталей на стойкость против КРН, полученные результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты испытаний трубных сталей на стойкость против КРН

№ стали	Номер образца	Класс прочности стали	Технология формовки труб	Число циклов до зарождения трещин N	Максимальная плотность трещин на поверхности ρ , 10^4 м^{-2}	Напряжение зарождения трещин σ_n , МПа	Перемещение захватов, S		
							$S_{\max}$, мм	$S_{\text{кон}}$, мм	$S_{\text{отн}}$
1	1.1	K60	УОЕ-формовка с одним сварным швом	49500	0,3	471 + 90	32,55	32,07	0,9851
	1.2	K60		56000	0,5	471 + 90	32,85	31,76	0,9668
2	2.1	K65		52000	0,6	538 + 90	32,37	31,85	0,9839
	2.2	K65		60000	0,9	538 + 90	32,94	32,00	0,9714
3	3.1	K60	УОЕ-формовка с одним сварным швом	33350	0,3	478 + 60	30,84	29,80	0,9662
	3.2	K60		42600	0,7	478 + 60	31,60	31,02	0,9816
4	4.1	K65		51500	0,9	518 + 90	31,88	31,10	0,9755
	4.2	K65		48500	1,7	518 + 90	32,57	31,87	0,9785
5	5.1	K60	Вальцовая формовка	53400	0,9	523 + 90	31,65	31,11	0,9831
	5.2	K60		61000	1,0	523 + 120	32,62	32,23	0,9880
6	6.1	K65		65000	2,4	584 + 120	33,20	32,79	0,9875
	6.2	K65		68800	3,5	584 + 120	32,71	32,45	0,9920

Примечание: $S_{\text{отн}} = S_{\text{кон}}/S_{\text{max}}$

Установлено, что образцы исследованных сталей одного класса прочности (К60), но изготовленные разными производителями, имеют различную стойкость против КРН, тогда как для образцов одной и той же стали, отобранных из различных участков трубы, разброс характеристик коррозионной стойкости под напряжением невелик (рис. 6). Наблюдаемые различия в сопротивлении растрескиванию разных сталей является следствием качества подготовки их поверхности и структурной неоднородности, обусловленной металлургическим качеством и технологией изготовления трубы.

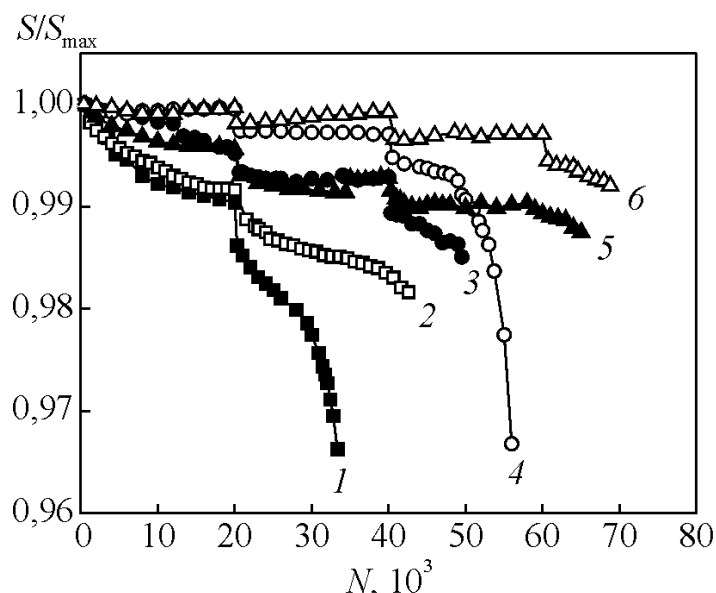


Рис. 6. Диаграммы по результатам испытаний на КРН сталей К60 (относительное перемещение захвата S/S_{max} – число циклов нагружения N) модельных образцов, изготовленных из однотипных сталей разных производителей:

- 1 – сталь № 1, обр. 1.1; 2 – сталь № 1, обр. 1.2; 3 – сталь № 3, обр. 3.1;
4 – сталь № 3, обр. 3.2; 5 – сталь № 5, обр. 5.1; 6 – сталь № 5, обр. 5.2.

Установлено, что для всех сталей наблюдается повышение количества циклов до образования трещин с удалением от сварного шва, кроме образцов из стали № 4, показавших близкие значения долговечности независимо от места вырезки образца. Это подтверждает ранее сделанное предположение о влиянии остаточных напряжений на процесс КРН. Разброс значений по количеству циклов до появления трещин на образцах из сталей одного производителя и класса прочности обусловлен отбором образцов из различных зон трубы и подтверждает правильность выбора зон для получения объективной информации о стойкости сталей КРН.

Установлено, что наибольшую долговечность имеют образцы стали № 6 (число циклов до зарождения трещины 65000 и 68800) и стали № 5 (53400 и 61000) отобранные из труб, выполненных по технологии вальцово-формовки. Несколько меньшую долговечность показали образцы отобранные из труб, выполненных по технологии УОЕ-формовки из стали № 2 (52000 и 60000). Долговечность остальных образцов из сталей № 1, № 4 и, особенно № 3, существенно ниже.

Установлено, что для сталей одного производителя наблюдается общее повышение долговечности при переходе от класса прочности стали К60 до К65, соответственно. Однако некоторые варианты сталей класса К65 одного производителя показали меньшую долговечность, чем стали класса К60 другого производителя (например, сталь варианта 4 имеет меньшую долговечность, чем сталь № 5). Это не позволя-

ет в рамках выполненной работы установить корреляцию между прочностными свойствами трубных сталей и их стойкостью против КРН. Таким образом, можно говорить, что переход от труб из сталей класса прочности К60 к трубам из сталей класса прочности К65 при строительстве газопроводов не приведет к снижению их стойкости против КРН.

Установлено соответствие долговечности исследованных сталей и величины напряжения σ_n , которое достигается в образце в момент образования трещин (рис. 7).

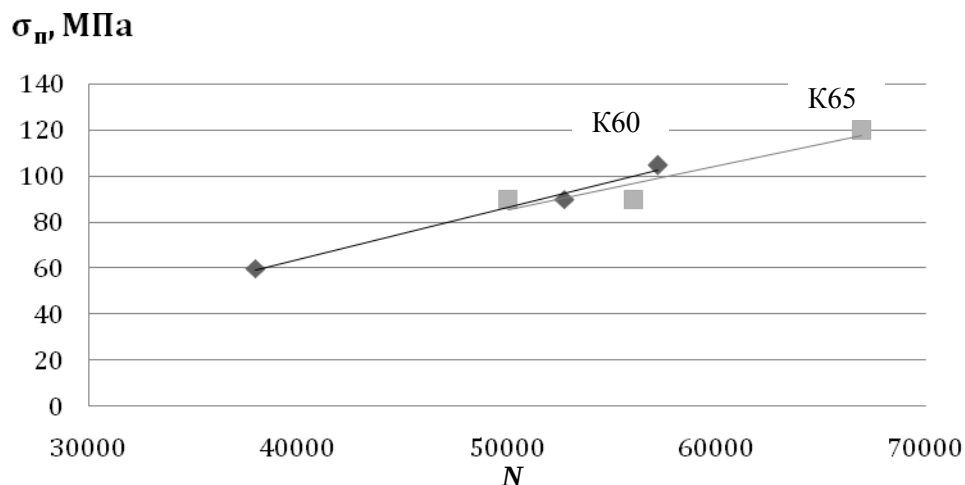


Рис. 7. Зависимость величины напряжения σ_n от количества циклов до зарождения трещин N в сталях

По результатам исследования внешней поверхности испытанных образцов выявлено, что наибольшая плотность трещин соответствует образцам из сталей класса прочности К65, причем значительно отличающейся является сталь № 6, которой соответствует наибольшее значение числа циклов до образования трещин среди испытанных сталей при максимальных напряжениях (рис. 8). В данном случае увеличение плотности трещин можно рассматривать как благоприятный фактор, так как при высокой плотности мелких трещин дальнейшее их развитие затруднено из-за «экранирования» напряжений, действующих в зоне расположения трещин.

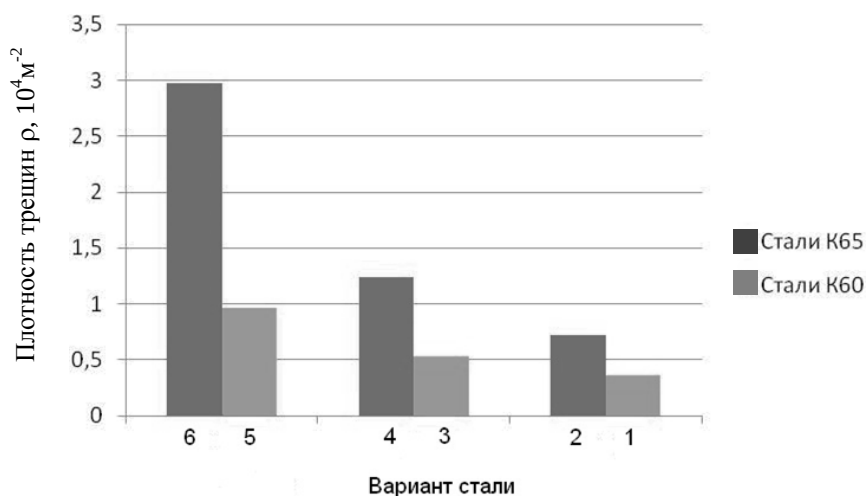


Рис. 8. Плотность трещин на поверхности образцов после испытаний

На примере исследованных изломов трещин сталей № 1 и 2 установлено, что наиболее глубокие трещины отмечены у сталей с меньшей плотностью трещин на поверхности образца. Так, у стали № 1 при плотности трещин на поверхности образца

$(0,3-0,5) \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$ максимальная глубина трещин составила 0,60 мм, у стали № 2 при плотности трещин на поверхности образца $(0,6-0,9) \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$ максимальная глубина трещин составила 0,24 мм.

Выполнен анализ влияния металлургических факторов (содержания полигонального феррита и плотности КАНВ) на стойкость сталей против коррозионно-механического разрушения и локальной коррозии.

Установлено, что повышенным значениям плотности тока соответствуют наименьшие показатели долговечности, то есть количество циклов до разрушения образцов $N_{\text{тр}}$. Также показано, что средние для каждого варианта значения числа циклов до зарождения трещины, соответствующие высокой стойкости против КРН (более 55000 циклов), получены для вариантов со значениями i_{max} при электрохимических испытаниях менее 100 А/м^2 . Аналогичная зависимость получена и для величины относительного перемещения захватов $S_{\text{отн}}, \%$ – большие значения соответствуют наименьшей плотности тока.

По результатам анализа полученных результатов показано, что на стойкость против коррозионного растрескивания влияют те же характеристики стали, что и на стойкость против локальной коррозии – повышенное содержание полигонального феррита, при наличии структурной полосчатости, а также высокой плотности в стали КАНВ. Так, для сталей, одной из структурных составляющих которых является полигональный феррит (варианты № 1, 2 и 3), получены практически линейные зависимости параметров, ответственных за стойкость стали против КРН, от содержания полигонального феррита. Увеличение содержания полигонального феррита и плотности КАНВ влечет уменьшение числа циклов N до зарождения трещин (рис. 9).

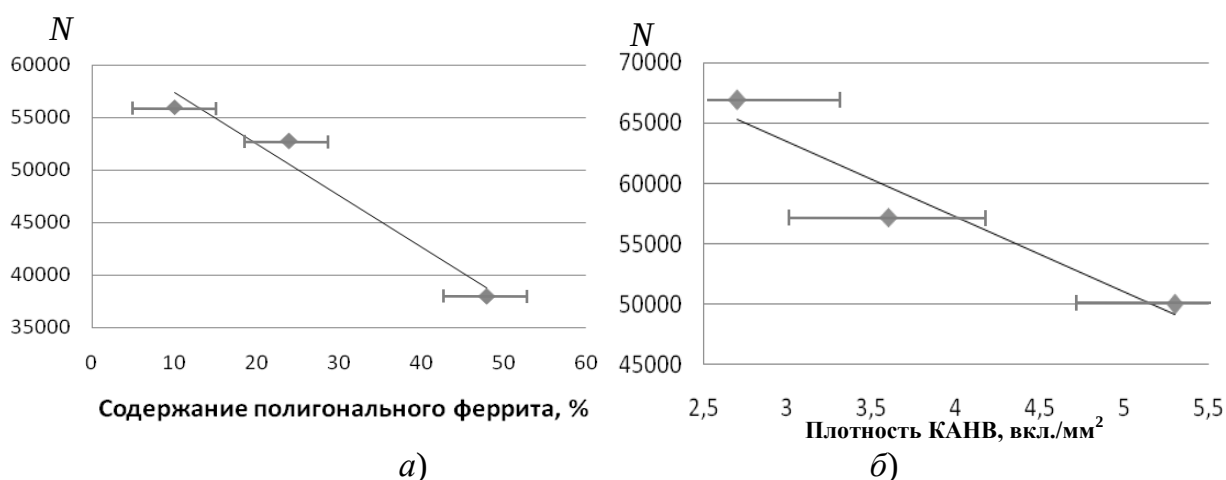


Рис. 9. Влияние содержания полигонального феррита (а) и плотности КАНВ (б) в стали на число циклов до зарождения трещин

Установлено существенное снижение стойкости против КРН у сталей при превышении плотности КАНВ 5 вкл./мм^2 .

Произведена экспериментальная оценка склонности сталей № 1, № 3 и № 4 к поглощению водорода. Для этого определяли содержание водорода в стали указанных вариантов в исходном состоянии, а также после имитации старения образцов, выдержанных при температуре 200°C в течение 30 ч в печи без защитной атмосферы. Показано, что для стали № 3 наблюдается увеличение содержания водорода по сравнению с исходным более чем в 5 раз, для стали № 1 – в 3 раза, для стали № 4 примерно в 2 раза. При этом конечное содержание водорода для данных вариантов составляет более 13 ppm ($\text{ppm} - \text{parts per million}$). Для остальных сталей конечное содержание

водорода менее 10 ppm. То есть, при контакте с влажной атмосферой при повышенных температурах стали с повышенным содержанием КАНВ или со структурной неоднородностью способны насыщаться водородом, что может быть одной из причин снижения их стойкости против КРН.

По результатам выполненных испытанных сталей по комплексной методике оценки коррозионно-механических свойств малоуглеродистых низколегированных трубных сталей разработаны критерии их классификации по стойкости против КРН (табл. 6).

Таблица 6.

Классификация трубных сталей по стойкости против КРН

Критерий классификации	Класс стали по стойкости против КРН		
	Низкий	Средний	Высокий
Количество циклов до появления трещины, N	$N \leq 20000$	$20000 < N \leq 40000$	$N > 40000$
Время до появления трещины (при статических испытаниях) t , ч	≤ 1500	$1500 \div 3000$	> 3000
Относительное перемещение захвата испытательной машины, $S_{отн}$	$S_{отн} > 1,0$	$0,5 < S_{отн} \leq 1,0$	$S_{отн} < 0,5$
Напряжение зарождения трещин $\sigma_{п}$, МПа	$\sigma_{п} \leq 0,9\sigma_{0,2}$	$0,9\sigma_{0,2} < \sigma_{п} \leq 0,9\sigma_{0,2} + 60$	$\sigma_{п} > 0,9\sigma_{0,2} + 60$
Плотность трещин ρ , 10^4 м^{-2}	$\rho \leq 1$	$1 < \rho \leq 5$	$\rho > 5$
Плотность КАНВ, вкл./мм ²	≤ 3	$3 \div 5$	> 5
Содержание полигонального феррита, %	≤ 10	$10 \div 30$	> 30

Примечание: Критерий классификации стали по плотности трещин применяют при условии, что общее количество трещин в рабочей части образца больше 1.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Установлены основные стадии реализации процесса КРН трубных сталей в условиях эксплуатации МГ и сформулированы условия их реализации. На первой стадии доступ коррозионной среды к поверхности «перегруженных» участков труб приводит к образованию концентраторов напряжений в вершине которых реализуется процесс локальной пластической деформации, который приводит к образованию микротрещин. На второй стадии развитие микротрещин в макротрещины определяется их формой, плотностью на поверхности металла труб, типом и уровнем напряжений и структуры стали.

2. Разработаны требования к комплексной методике исследования коррозионно-механических свойств сталей в лабораторных условиях.

3. Экспериментально установлено, что местами зарождения трещин КРН являются локальные коррозионные повреждения на поверхности исследованных образцов (коррозионные язвы), а расположение трещин на рабочей поверхности всех образцов характеризуется существенной неоднородностью по плотности. В свою очередь местами указанных коррозионных повреждений, являются имеющиеся структурные несовершенства стали, выходящие на поверхность образца.

4. Впервые установлено, что плотность коррозионно-активных неметаллических включений оказывает отрицательное влияние на стойкость трубных сталей против локальной коррозии и КРН. Также установлено отрицательное влияние повышенного содержания полигонального феррита на фоне структурной полосчатости на стойкость стали против КРН.

5. Установлено, что одним из факторов, существенно влияющим на стойкость сталей против КРН, является технология формовки труб: большую стойкость против КРН показали образцы сталей из труб, изготовленных по технологии вальцовой формовки; повышение класса прочности трубной стали от К60 до К65 не приводит к снижению стойкости против КРН.

7. Установлена корреляция между плотностью тока при электрохимических испытаниях, характеризующей стойкость стали против локальной коррозии, и количеством циклов до образования коррозионно-механических трещин. Показано, что средние для каждой стали значения числа циклов до зарождения трещины, соответствующие высокой стойкости против КРН (более 55000 циклов до образования трещин), получены для вариантов со значениями максимальной плотности тока при электрохимических испытаниях менее 100 A/m^2 .

8. Установлено, что параметры трещин, полученных в процессе испытания сталей на стойкость против КРН, соответствуют идентификационным признакам эксплуатационных трещин на МГ, что свидетельствует о превалирующем влиянии механических напряжений в развитии трещин КРН над коррозионным механизмом. При этом методика испытаний позволяет воспроизвести необходимые условия и факторы КРН металла труб за относительно короткое время, что позволяет исследовать их влияние на процесс КРН для широкой номенклатуры трубных сталей.

9. Впервые разработаны критерии классификации трубных сталей по стойкости против КРН:

- количество циклов до появления трещины N ;
- время до появления трещины t , ч;
- относительное перемещение захвата испытательной машины $S_{\text{отн}}$, %;
- напряжение зарождения трещин $\sigma_{\text{п}}$, МПа;

- плотность трещин ρ , 10^4 м^{-2} ;
- плотность КАНВ, вкл./мм^2 ;
- содержание полигонального феррита, %.

Комплексный учет перечисленных критериев при лабораторных испытаниях трубных сталей позволяет существенно повысить достоверность оценки их стойкости против КРН.

10. При выборе труб для создания магистральных газопроводов на территориях с высокой предрасположенностью к стресс-коррозии рекомендуется использовать трубы с применением технологических режимов, обеспечивающих минимальное накопление остаточных напряжений в процессе формовки. При разработке сталей, обладающих повышенной стойкостью против КРН, следует обеспечить минимальное содержание неметаллических включений в виде оксидов на основе алюмината кальция и предупредить образование полигонального феррита.

Основные публикации по теме диссертации

1. Есиев Т.С., Ряховских И.В., Теплинский Ю.А., и др. Научно методическое обоснование выбора участков для приоритетного ремонта методом переизоляции. – В сб.: Тезисы Международной научно-технической конференции «Целостность и прогноз технического состояния газопроводов» (PITSO-2007). – М.: ВНИИГАЗ, 2007, с. 16 – 17.
2. Есиев Т.С., Ряховских И.В., Белов А.В. Современные подходы к анализу стресс-коррозионного состояния объектов транспорта газа. – В сб.: Научные труды ООО «ВНИИГАЗ» «Проблемы надежности и безопасности транспорта газа». – М.: ВНИИГАЗ, 2008, с. 187 – 195.
3. Петров Д.В., Есиев Т.С., Ряховских И.В. и др. Техническое диагностирование стресс-коррозионного состояния газопроводов. – В сб.: Материалы восемнадцатой международной встречи «Диагностика 2009». – М.: ООО «Газпром экспо», 2009, с. 97 – 101.
4. А.Б. Арабей, Есиев Т.С., Ряховских И.В. Закономерности и зависимости коррозионного растрескивания под напряжением магистральных газопроводов с учетом влияния параметров трубной продукции. – В сб.: Тезисы Третьей Международной конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» (GTS-2009). – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2009, с. 122.
5. Есиев Т.С., Ряховских И.В., Машуров С.С. и др. Использование статистических методов и ГИС-технологий для оценки стресс-коррозионного состояния объектов МГ. – Газовая промышленность, 2010, № 7, с. 53 – 56.
6. Kuzbozhev A., Solovej V., Ryakhovskikh I. Operation experience of gas pipelines from pipes of the various assortment in the conditions of stress corrosion cracking. – Book of Abstracts: EUROCORR'2010 The European Corrosion Congress. – М.: МАКС Пресс, 2010, с. 760.
7. Mashurov S.S., Mirzoev A.M., Mirzoev A.M., Ivashenko M.S., Esiev T.S., Ryakhovskikh I.V. Neural network approach to pipeline SCC and external corrosion integrity assessment – Book of Abstracts: EUROCORR'2010 The European Corrosion Congress. – М.: МАКС Пресс, 2010, с. 535.
8. Сидорочев М.Е., Есиев Т.С., Ряховских И.В. и др. Стресс-коррозионное состояние технологических трубопроводов компрессорных станций и методика их технического диагностирования. – Газовая промышленность, 2010, № 9, с. 48 – 52.
9. Ряховских И.В., Зорин Н.Е., Бурутин О.В. Специфика идентификации и диагностики коррозионного растрескивания под напряжением на технологических трубопроводах компрессорных станций. – В сб.: Тезисы докладов IV Международной научно-практической конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2011, с. 402.
10. Шишкин И.В., Кузьбожев А.С., Колотовский А.Н., Ряховских И.В. Особенности проявления КРН на магистральных газопроводах ООО "Газпром трансгаз Ухта". – В сб.: Тезисы докладов IV Международной научно-практической конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2011, с. 382.
11. Арабей А.Б., Есиев Т.С., Ряховских И.В. и др. Влияние особенностей технологии производства труб на стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжением в процессе эксплуатации магистральных газопроводов. – Газовая промышленность, 2012, № 2, с. 52 – 54.

12. Ряховских И.В., Есиев Т.С., Кохтев С.А. Совершенствование методов оценки склонности газопроводных сталей к коррозионному растрескиванию под напряжением (стресс-коррозии) . – Физика и химия обработки материалов, 2012, № 4, с. 88 – 93.

13. Семенов А.М., Меркуль К.В., Есиев Т.С., Ряховских И.В. Влияние скорости деформации при растяжении высокопрочных трубных сталей на время до разрушения в коррозионной среде с нейтральным водородным показателем pH. – Наука и техника в газовой промышленности, 2012, № 4, с. 99 – 106.

14. Зайцев А.И., Родионова И.Г., Бакланова О.Н., Гришин А.В., Удод К.А., Есиев Т.С., Ряховских И.В., Кохтев С.А. и др. Исследование влияния металлургических факторов на стойкость современных трубных сталей против коррозионного растрескивания. – Проблемы черной металлургии и материаловедения, 2013, № 1, с. 1 – 16.

15. Ряховских И.В. Системный подход к повышению стойкости технологических трубопроводов компрессорных станций к коррозионному растрескиванию под напряжением. – В сб.: Материалы совещания «Повышение надежности функционирования объектов ЕСГ на основе разработок и внедрения новых технических решений на КС» – М.: ООО «Газпром экспо», 2013, с. 115 – 116.

Подписано к печати 17.09.2013

1 уч. – изд. л. ф-т 60x84/16 Тираж 100 экз. Заказ № 4107

Отпечатано в ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

по адресу 142717, Московская область,

Ленинский район, п. Развилка, ООО «Газпром ВНИИГАЗ»