

технологических (например, зона сплавления стыкового сварного соединения) или эксплуатационных концентраторов напряжений крепится на поверхности измерительная головка переносного диагностического комплекса и в автоматическом режиме проводится замер микротвердости с заданным шагом и усилием на индентор. Массив выборки, при полном обороте подвижного индентора с закрепленной на конце с эксцентриситетом алмазной пирамидкой, может составлять 87 значений с шагом 0,02 мм.

Результаты замера передаются на компьютер, где обрабатываются и сравниваются с имеющейся на данный материал базой данных. На дисплее появляются две гистограммы базовая и полученная после проведенных замеров, а также значение коэффициента поврежденности. Вся операция с максимальным числом замеров занимает 23 минуты. Если значение коэффициента поврежденности лежит в красной зоне, то сопротивляемость металла объекта разрушению в диагностируемой зоне снизилась столь значительно, что он не сможет обеспечить конструктивную прочность на заданном межремонтном периоде и экономически целесообразно заменить частично или полностью данный элемент конструкции. Если значение коэффициента поврежденности в пограничной или зеленой областях, то экономически целесообразно проводить ремонтные работы по восстановлению стенки трубопровода или защитных покрытий с целью продления ресурса конструкции.

Литература

1. Зорин Е.Е., Ланчаков Г.А., Степаненко А.И. Работоспособность трубопроводов. Часть 3. Диагностика и прогнозирование ресурса.// М.: Недра, 2003.- 315с.
2. Зорин Е.Е. Оценка поврежденности трубных сталей //Деформация и разрушение материалов.-2005.-№7.-С.37-41.
3. Зорин Е.Е., Зорин Н.Е. Оперативная диагностика состояния металла сварных конструкций (в процессе длительной эксплуатации)// Нефть, газ и бизнес.- №7-8.-2009.-С.67-73.
4. Зорин Е.Е. Регистрация динамики накопления рассеянной поврежденности в двухфазных сталях методом на базе процесса микровдавливания //Техническая диагностика и неразрушающий контроль - Киев, ИЭС.- 2001.- №2.- С.32-35
5. Зорин Е.Е., Ланчаков Г.А., Степаненко А.И. Оценка степени деградации металла газопроводов //Газовая промышленность - №4.-2003.-С.57-60.
6. Зорин Е.Е. Оценка поврежденности трубных сталей //Деформация и разрушение материалов.-2005.-№7.-С.37-41.
7. Зорин Е.Е., Маляревская Е.К., Зорин Н.Е. Способ определения поврежденности объекта //Патент на изобретение № 2315971 от 27.01.2008г.

Особенности коррозионно-механического разрушения газонефтепроводов

д.т.н. проф. Зорин Е.Е., асп. Волченко Д.И., к.т.н. с.н.с. Зорин Н.Е.

Университет машиностроения

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

zenacenter@mtu-net.ru

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы кинетики развития стресс-коррозионных дефектов на начальных этапах разрушения. Описана стресс-коррозионная поврежденность трубопроводов, находящихся в схожих условиях воздействия внешней среды, с различными конструктивными параметрами и режимами эксплуатации. Определены две стадии развития стресс-коррозионных дефектов с точки зрения преимущественного влияния различных групп факторов. Показано, что в поверхностном слое металла стенки газопровода, находящегося под давлением, не превышающим проектное, существуют условия для реализации разрушения по механизму коррозионного растрескивания под напряжением.

Ключевые слова: газонефтепроводы, коррозионно-механическое разрушение особенности, кинетика, развитие, стресс-коррозия, процесс.

Коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) на внешней катодозащищенной поверхности газопровода (или стресс-коррозия), относящееся к одному из видов разрушения конструкций при одновременном воздействии механического нагружения и коррозионной среды, к настоящему времени, несмотря на значительный объем выполненных теоретических и экспериментальных исследований, все еще остается труднопредсказуемым и оказывает существенное влияние на надежность эксплуатации газопроводов.

На сегодняшний день, основные успехи по решению проблемы стресс-коррозионного разрушения связаны со своевременным выявлением и устранением дефектов, не достигших критических размеров, за счет непрерывного совершенствования применяемых средств дефектоскопии и методов ремонта. Однако избежать появления стресс-коррозионных дефектов на потенциально опасных участках, предотвратить их развитие или оценить ресурс газопровода с учетом риска появления или развития подобных дефектов пока не удается, так как нет четких и ясных представлений о механизмах и закономерностях развития данного процесса. Отсутствие единой теоретической модели процесса КРН, позволяющей объяснить все имеющиеся его проявления, во многом связано с его многофакторностью и многостадийностью. Сочетание большого количества коррозионных, металлургических и механических факторов делает стресс-коррозионное разрушение газопроводов многовариантным, реализующимся в различных, значительно отличающихся друг от друга условиях (например южные и северные регионы России и бывшего СССР). При этом взаимосвязь влияющих на этот процесс трех групп факторов на различных стадиях разрушения может меняться, что затрудняет выявление наиболее значимого определяющего фактора (или группы факторов).

В целом, для процессов разрушения конструкций, связанных с появлением напряжений в металле, подвергающихся коррозионному воздействию (переход равномерной коррозии в местную, коррозионная усталость, межкристаллическая коррозия и т.д.), известно, что на начальной стадии определяющую роль играет коррозионная составляющая. Электрохимическое и адсорбционное воздействия среды на металл приводят к постепенной локализации пластической деформации и последующему развитию разрушения в наиболее напряженных объемах металла. Напряжения при этом, за счет, например, перераспределения запасенной упругой энергии в нагруженной конструкции, будут способствовать сокращению путей развития коррозионного процесса, играя роль контролирующего фактора.

При коррозионном растрескивании газопроводов основную роль механической составляющей на начальной стадии разрушения связывают с существованием определенного уровня пороговых напряжений, сопоставимых с напряжениями, возникающими в стенке газопровода, нагруженного номинальным внутренним давлением, определяющих возможность и вероятность реализации такого вида разрушения. С этим, в частности, связан тот факт, что газопроводы, относящиеся к категориям I и B по СНиП 2-05-06-86* и для строительства которых применялись трубы с повышенной толщиной стенки, долгое время считались не подверженными стресс-коррозионному разрушению, что подтверждалось, главным образом, отсутствием на них отказов по причине стресс-коррозии, при том что в это время аварийность на газопроводах III и IV категории (составляющих основную протяженность линейной части магистральных газопроводов) достигала исторических максимумов. Но начиная с 2004 г. дефекты стресс-коррозии стали регулярно выявляться и на технологических трубопроводах компрессорных станций, относящихся к категориям I и B, причем как на "горячих" так и на "холодных" участках.

Из-за сложной воспроизводимости процесса стресс-коррозии, вследствие большого количества влияющих факторов и существенной временной составляющей, лабораторные исследования в значительной степени затруднены, и основным источником информации о закономерностях протекания процесса, стимулирующих или подавляющих условиях и факто-

рах, являются его проявления на эксплуатирующихся газопроводах, оцениваемые при проведении диагностических обследований или при расследовании причин аварийных разрушений.

С этой точки зрения особый интерес представляют технологические трубопроводы компрессорных станций. Компрессорная станция, как объект магистрального газопровода, является уникальным с точки зрения наличия на локальной территории участков трубопроводов различных диаметров, эксплуатирующихся при различном давлении и относящихся к различным категориям (I и B). Локализация трубопроводов на одной территории (территории компрессорной станции) обеспечивает схожесть природно-климатических условий, особенностей гидрологии, литологического строения почвы и т.д., а соответственно и схожесть совокупности значимых факторов, сопровождающих явление КРН, связанных с внешней средой. Так же при строительстве компрессорной станции как правило применяются трубы одного завода-изготовителя и одного периода производства для данного типоразмера, что обеспечивает для них идентичность металлургических и технологических факторов.

Таким образом, анализируя поврежденность трубопроводов стресс-коррозионными дефектами внутри компрессорной станции можно оценить влияния механических факторов, по крайней мере, на начальной стадии развития стресс-коррозионного разрушения.

На рисунке 1 приведены распределения по глубине стресс-коррозионных дефектов, выявленных при диагностическом обследовании входного и выходного подключающих шлейфов и подземной трубопроводной обвязки аппаратов воздушного охлаждения газа (АВО) компрессорной станции.

Газопроводы подключающих шлейфов относятся к участкам I категории и были выполнены из импортных труб \varnothing 1020 мм с толщиной стенки 16 мм из стали контролируемой прокатки класса прочности X70. Трубопроводы АВО газа относятся к категории B и были выполнены также из импортных труб диаметром \varnothing 1020 мм из стали класса прочности X70, но с толщиной стенки 22,0 мм. Трубопроводы рассчитаны на рабочее давление 7,5 МПа, период наработки составляет 30 лет.

Условия эксплуатации входных шлейфов отличаются от выходных и трубопроводов АВО газа более низким рабочем давлением и температурой газа на входе в компрессорную станцию, а так же отсутствием вибраций, связанных с работой оборудования станции.

Из распределений дефектности видно, что для всех объектов максимальное количество дефектов приходится на глубины 0,6 – 0,7 мм. Снижение количества выявленных дефектов при уменьшении глубины связано с чувствительностью применяемого для дефектоскопии оборудования, позволяющего уверенно выявлять дефекты, начиная с 0,5 мм, а так же с особенностью выделения дефектоскопистами отдельных зон растрескивания. Нередко стресс-коррозионные дефекты, находящиеся на небольшом расстоянии друг от друга, объединяются в одну зону, имеющую в качестве характеристики значение глубины дефектной зоны с наиболее глубокими трещинами. Таким образом, происходит растворение зон стресс-коррозионных дефектов меньшей глубины.

Основная часть дефектов имеет глубину, не превышающую 0,8 – 1,0 мм, однако на выходных шлейфах имеются единичные дефекты глубиной до 2-х раз превышающие глубину основного количества дефектов. На трубопроводах АВО газа дефекты, глубина которых превышает 1,0 мм, практически отсутствуют. Очевидно, что скорость роста этих дефектов значительно выше за счет по всей видимости несколько отличающегося механизма развития.

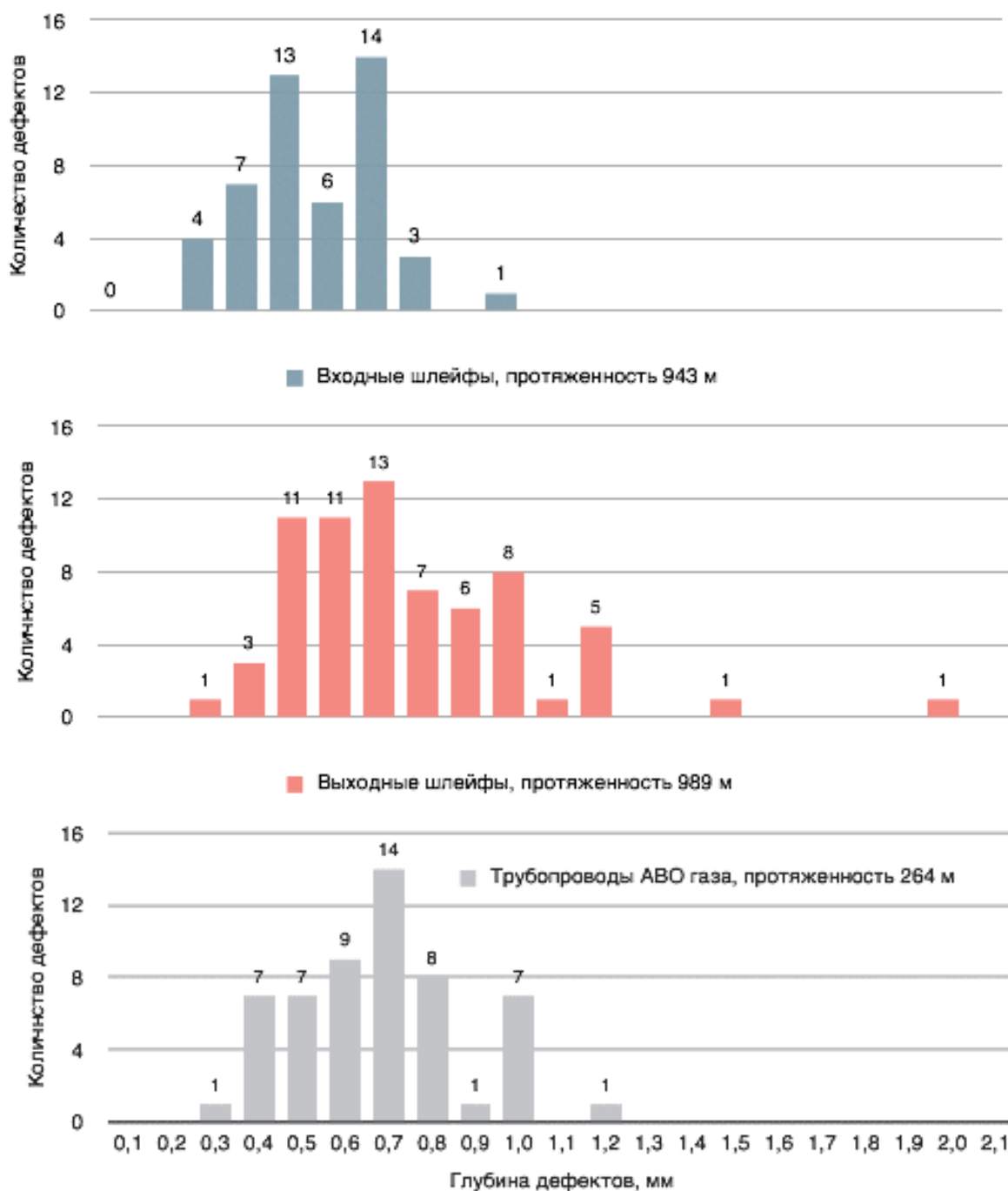


Рисунок 1. Распределение по глубине стресс-коррозионных дефектов трубопроводов компрессорной станции

Схожесть в количестве и распределении по глубине основного количества дефектов на входных и выходных шлейфах и трубопроводах АВО газа свидетельствует о том, что различия в характере нагружения и уровне напряжений в стенке труб этих участков не повлияли на зарождение и развитие стресс-коррозионных дефектов на начальной стадии. Определяющими здесь будут общее для всех трубопроводов сочетание факторов внешней среды, характеризующее коррозионную составляющую процесса. При достижении частью дефектов выходного шлейфа определенной глубины, влияние механических факторов, таких как величина и нестационарность нагружения, усилилось, что привело к резкому увеличению скорости роста дефектов. Для трубопроводов АВО газа, за счет применения труб с повышенной толщиной стенки, подобная пороговая величина глубины дефекта, по всей видимости будет

лежать несколько выше.

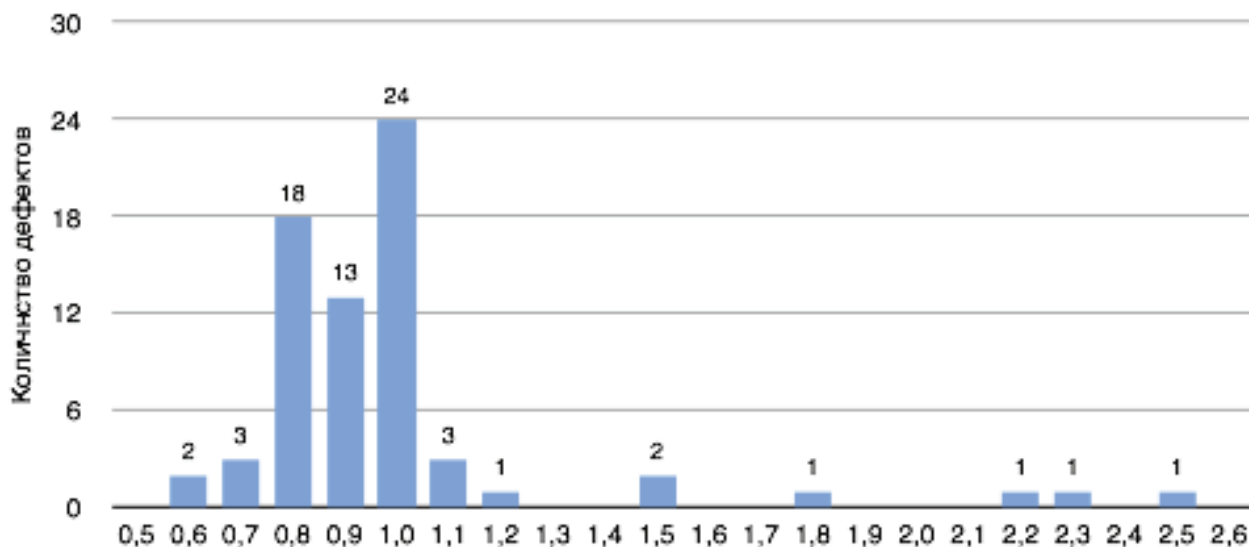


Рисунок 2. Распределение по глубине стресс-коррозионных дефектов выходного шлейфа

Следует также отметить, что подключающие шлейфы представляют собой протяженные линейные участки газопроводов, и территория их пролегания будет пересекать зоны, как с наличием, так и с отсутствием условий для протекания процесса КРН. В то время как трубопроводы обвязки АВО газа локализованы вокруг аппаратов и, в случае необходимого сочетания внешних условий и факторов в этом районе, будут обладать повышенной плотностью дефектов по сравнению, например, со шлейфами, что и наблюдается в данном случае. Количество дефектных труб на всех объектах примерно одинаково.

На рисунке 2 приведено распределение по глубине стресс-коррозионных дефектов выходного шлейфа, выполненного из отечественных труб $\varnothing 1220$ с толщиной стенки 14,3 мм из нормализованной стали 17Г1С-У. Трубопровод рассчитан на рабочее давление 5,5 МПа, период наработки составляет 15 лет.

Основная часть дефектов также лежит в узком диапазоне глубин от 0,5 до 1,0 мм, но максимум дефектов приходится на глубины 0,8 – 1,0 мм, а дефекты максимальной глубины достигают 2,0 – 2,5 мм, что составляет 15 – 20 % от толщины стенки трубы, притом, что наработка трубопроводов в двое меньше. Не учитывая разницу в абсолютных величинах проектного давления и диаметрах трубопроводов двух компрессорных станций, нормализованная сталь, из которой выполнены трубы выходного шлейфа, имеет более крупное зерно и повышенную концентрацию углерода и вредных примесей серы и фосфора по сравнению со сталями контролируемой прокатки, что будет определять более низкое сопротивление межзеренному разрушению, в том числе и коррозионно-механическому. Таким образом, стресс-коррозионное разрушение будет происходить интенсивней как на начальном этапе, обусловленным главным образом коррозионными процессами, так и при последующем развитии трещин под воздействием механических нагрузок.

Опыт эксплуатации газопроводов показывает [1, 2, 3], что для КРН существуют пороговые напряжения, которые в зависимости от температуры окружающей среды и других факторов могут варьироваться в широком диапазоне от 0,2 до 1,0 $\sigma_{0,2}$. Возможность разрушения газопроводов при таком уровне напряжений может быть связана с особенностями фактического нагружения, в том числе и малоциклового, наличием нагрузок с критическим уровнем частот колебаний, приводящих к возникновению усталостных явлений, что значительно отличается от расчетного статического нагружения. На практике возникали разрушения по вине КРН даже при напряжениях равных 0,4 $\sigma_{0,2}$.

Таким образом, образование стресс-коррозионных трещин может происходить при на-

пряжениях значительно меньших предела текучести, не превышающих, например, напряжений, возникающих в стенке трубопроводов компрессорных станций категории В на "холодных" участках, и будет практически не зависеть от их величины в этом диапазоне.

В ряде работ [4, 5] показано, что микропластическое течение (микротекучесть) монокристаллических и поликристаллических металлов начинается на самых ранних стадиях деформирования и охватывает первоначально тонкий поверхностный слой материала глубиной несколько микрон или порядка размера зерна.

Облегченное протекание пластической деформации в поверхностных слоях связано с наличием поверхностных концентраторов напряжений (поверхностные неметаллические включения, ступеньки скола, царапины и т. п.) в сочетании большим запасом потенциальной энергии поверхностного слоя, наличие в поверхностном слое более грубой, чем в объеме металла, дислокационной сетки Франка [6], особенностью закрепления приповерхностных источников дислокаций (имеющих одну точку закрепления). Это приводит к тому, что в поликристаллах, зерна в поверхностном слое имеют меньший предел текучести, чем зерна во внутренних объемах металла (~ 20 мкм [7]).

У металлов с объемно центрированной кубической решеткой, имеющих физический предел текучести, к которым относятся и трубные стали, в условиях статического растяжения наблюдается стадия микротекучести при напряжениях от нуля до напряжения, соответствующего пределу текучести [8].

На начальных стадиях деформирования движения дислокаций во внутренних объемах металла не наблюдается. Дислокации, смещаясь под действием напряжений на расстояния меньшие, чем параметр решетки, не выходят за пределы потенциального барьера. И петля механического гистерезиса остается закрытой вплоть до напряжения, соответствующего истинному пределу текучести. Однако уже на этой стадии можно предположить, что в приповерхностном слое в отдельных благоприятно ориентированных зернах уже при этих напряжениях возможно необратимое движение отдельных дислокаций.

По мере дальнейшего возрастания напряжений начинается движение дислокаций и происходит все более интенсивное их генерирование. Возникает открытая петля пластического гистерезиса, которая, однако, после разгрузки смыкается. Главным источником дислокаций в этом диапазоне напряжений являются приповерхностные слои металла и границы зерен [9, 10]. К моменту достижения некоторого порогового напряжения приповерхностные слои металла порядка размера зерна начинают претерпевать более значительную микропластическую деформацию по сравнению с внутренними объемами металла. Это происходит в первую очередь за счет деформации поверхностных зерен благоприятной ориентации (зерен с меньшим пределом текучести).

При дальнейшем нагружении петля механического гистерезиса не смыкается, фиксируя остаточную деформацию, что свидетельствует о протекании процессов микропластической деформации во всем объеме металла. Плотность дислокации начинает резко возрастать за счет генерирования новых дислокаций и взаимодействия их между собой и с примесями. Судя по ряду экспериментальных исследований [10–12] на этом участке кривой статического растяжения наблюдается перегиб на кривой зависимости «напряжение σ - плотность дислокаций ρ ». Плотность дислокаций в приграничных областях зерен (включая сами границы) металла становится на 1,5 порядка выше, чем в объеме зерен. Это различие сохраняется и после прохождения фронта Людерса-Чернова на площадке текучести. Более интенсивное увеличение плотности дислокаций в приграничных областях зерен наблюдается и до достижения точки перелома, в то время как во внутренних объемах зерен плотность дислокаций с возрастанием напряжения повышается очень незначительно. С момента резкого возрастания плотности дислокаций в приграничных объемах зерен происходит формирование более прочного приповерхностного слоя за счет протекания в нем пластической деформации и соответственно деформационного упрочнения. При этом наиболее упрочненными будут яв-

ляться границы зерен.

В условиях нестационарного нагружения процесс формирования прочного приповерхностного слоя будет иметь более локализованный характер. Формирование отдельных усталостных зон макроскопической деформации приводит к тому, что это приповерхностный слой становится неоднороден по своему структурному состоянию. При создании определенных условий коррозионного воздействия такие участки становятся наиболее химически активными, что приведет их преимущественному растворению по сравнению с остальными объемами металла. В дальнейшем эти участки становятся как механическими, так и электрохимическими концентраторами при разрушении. Таким образом, за счет протекания микропластической деформации участков упрочняющегося приповерхностного слоя, уже на начальной стадии нагружения при напряжениях значительно меньших физического предела текучести, создаются условия для реализации стресс-коррозионного разрушения металла газопроводных труб под воздействием коррозионной среды.

В заключение хотелось бы отметить, что дальнейшее изучение закономерностей развития стресс-коррозионных дефектов на начальной стадии, характеризующейся незначительной скоростью роста дефектов и носящей преимущественно коррозионный характер, а также на стадии перехода к механическому росту трещин, позволит проводить оценку ресурса газопроводов с заданными параметрами для конкретных условиях эксплуатации с учетом риска появления стресс-коррозионных дефектов, и остаточного ресурса газопроводов со стресс-коррозионными дефектами.

Литература

1. Зорин Е.Е., Ланчаков Г.А., Степаненко А.И. Работоспособность трубопроводов. Часть 3. Диагностика и прогнозирование ресурса // М.: Недра, 2003.- 315с.
2. Зорин Е.Е., Ланчаков Г.А., Степаненко А.И. Оценка степени деградации металла газопроводов // Газовая промышленность - №4.-2003.-С.57-60.
3. Мазур И.И. Безопасность трубопроводных систем / И.И. Мазур, О.М. Иванцов. -М.: ИЦ «ЕЛИМА», 2004. - 1104 с.
4. Glocker R., Hasenmaier H. Rontgen-Spannungsmessungen uber den Beginn des FlieBvorganges bei Kohlenstoffstahl // VDI-Zeitschrift, 1940. 84. № 43. S. 825.
5. Faninger G. Einfluss des Gefüges auf das Verformungsverhalten unlegierter und chromlegierter Stähle // Harterei-Techn. Mitt., 1967. Bd. 22. № 4. S. 341.
6. Мак Лин Д. Механические свойства металлов. - М.: Metallургия, 1965. - 285 с.
7. Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. - М.: Интермет Инжиниринг, 2002. - 288 с.
8. Enter D., Macherauch E. Die Streckgrenze des Ferrits an der Oberflä.che von Zugproben aus unlegierten Stählen mit bis 1,15 % C // Arch. Eisenhüttenwes. 1964. V. 35. N 9. С. 909-918.
9. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. - М.: Наука, 1983. - 280 с.
10. Орлов Л.Г. Образование дислокаций на границах зерен как составная часть механизма ранних стадий пластической деформации: Тезисы докл. I Всесоюз. конф. «Структура и свойства границ зерен».-Уфа, 1983. С.13-14.
11. Wu C.H., Hsu J., Chen C.H. The Effect of surface stress on the stability of surfaces of stressed solids // Acta mater & 1998. V. 46. N 11. P. 3755 - 3760.
12. Saka H., Noda K., Imura T. Tensile test of foil specimens of iron single crystals at room and low temperature under observation in high voltage electron microscope // Crystal Lattice Defects. 1973. N 4. P. 45 - 56.