

Ю.В. Казаков, инженер-механик, ООО «Эр Ликид Восток», e-mail: kazakov56@mail.ru;
А.Е. Зорин, к.т.н., начальник отдела инструментального контроля ЭАЦ «Оргремдигаз»,
ОАО «Оргэнергогаз», e-mail: zorin@oeg.gazprom.ru; **Н.Е. Зорин**, к.т.н., научный сотрудник, ООО «Газпром
ВНИИГАЗ», e-mail: N_Zorin@vniigaz.gazprom.ru

СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ГАЗОПРОВОДОВ СТРЕСС- КОРРОЗИОННОМУ РАЗРУШЕНИЮ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В статье рассмотрены некоторые подходы к определению причин образования стресс-коррозионных дефектов. На основе анализа результатов диагностических обследований линейной части магистральных газопроводов показано, что причина образования стресс-коррозионных дефектов не связана с наличием каких-либо конкретных дефектов металла или самой трубы, а должна определяться особенностями структурного состояния трубной стали, сформировавшегося в результате металлургического и технологического передела. На основе анализа дислокационной структуры показано, за счет каких механизмов происходит ускоренное развитие дефектов в местах концентрации напряжений и дефектов структуры.

Ключевые слова: газопровод, стресс-коррозия, диагностика, дислокационная структура.

Стресс-коррозионное разрушение газопроводных труб обычно определяется как образование сетки параллельно ориентированных трещин на внешней поверхности трубы, распространяющихся перпендикулярно направлению действия максимальных напряжений. Как правило, трещины ориентированы в продольном направлении относительно оси трубы, что обусловлено определяющим в большинстве случаев действием напряжений, создаваемых внутренним давлением перекачиваемого продукта.

При изучении механизма и возможных причин зарождения стресс-коррозионных дефектов и, как следствие, последующего разрушения газопроводов [1–6] очень часто предполагается связь возникшего разрушения с наличием различного рода отклонений по химическому составу металла, его механическим свойствам, наличием в локальной области металлургических дефектов, дефектов структуры, дефектов, связанных с технологией производства труб, и т.д. Подобные отклонения

обычно обнаруживаются при изучении в лабораторных условиях металла труб с мест аварийных разрушений газопроводов в процессе эксплуатации, после гидравлических переиспытаний и сравнения полученных результатов с характеристиками металла труб из аварийного запаса.

В частности, анализ характеристик металла с мест аварий показывает [1, 3, 6], что в очаге разрушения, как правило, значительно снижена пластичность и несколько превышены прочностные характеристики, такие как предел текучести и временное сопротивление, повышена твердость. По химическому составу могут быть значительные превышения по содержанию вредных примесей, сере и фосфору, недостаток или резкое превышение основных легирующих элементов (кремния и марганца), а также загрязненность примесными элементами, неметаллическими включениями и т.д.

Очевидно, что подобные отклонения должны приводить к снижению коррозионно-механической прочности

металла вследствие сильной деградации структуры и, соответственно, снижения пластических свойств и появления склонности к хрупкому разрушению, а также структурной неоднородности. И появление при этом стресс-коррозионных дефектов, представляющих собой микрохрупкое разрушение металла стенки газопровода под воздействием коррозионной среды и напряжений в конструкции, может быть объяснено именно наличием данных отклонений.

Однако появление стресс-коррозионных дефектов на газопроводах невозможно связать с наличием каких-либо конкретных типов дефектов металла или самой трубы либо определенных отклонений по структурному или химическому составу металла. А в некоторых случаях в зонах образования стресс-коррозионных дефектов какие-либо отклонения от стандартных характеристик металла ни по свойствам, ни по структуре вообще не обнаруживаются. Помимо лабораторных исследований металла труб, подверженных стресс-



Рис. 1. Распределение стресс-коррозионных дефектов на участке газопровода: а) ВТД 2001 г.; б) ВТД 2007 г.

коррозии, одним из основных источников информации о закономерностях стресс-коррозионного процесса, а также об определяющих данный процесс условиях и факторах, являются результаты диагностических обследований газопроводов.

В настоящее время в наиболее полной мере оценить стресс-коррозионное состояние системы магистральных газопроводов позволяют результаты внутритрубной дефектоскопии (ВТД) и отбраковки труб в процессе проведения капитального ремонта газопроводов. Значительная протяженность линейной части магистральных газопроводов позволяет оценить склонность к образованию дефектов КРН на газопроводах,

эксплуатирующихся в различных природно-климатических условиях и при различных условиях нагружения, в частности в зависимости от расстояния до компрессорной станции, а регулярность проведения обследования (до одного раза в три года) на наиболее поврежденных участках позволяет частично оценить развитие процесса во времени.

На рисунке 1 приведено распределение дефектов на участке проведения внутритрубной дефектоскопии (1341,4–1461 км) магистрального газопровода, по данным, полученным в 2001 и 2007 гг.

Как видно на рисунке, дефекты распределены неравномерно и практически

все локализованы на участках, расположенных в пределах 20 км от компрессорной станции. Особенности режимов эксплуатации данных участков являются повышенное давление, температура эксплуатации, а также присутствие циклических нагрузок различной частоты и асимметрии, связанных с работой оборудования компрессорной станции. Подобное нагружение, как известно, приводит к ускоренному развитию трещиноподобных дефектов как в инертных внешних условиях, так и в условиях коррозионного воздействия [7].

Применение в 2007 г. при проведении ВТД более совершенного оборудования привело к выявлению большего коли-

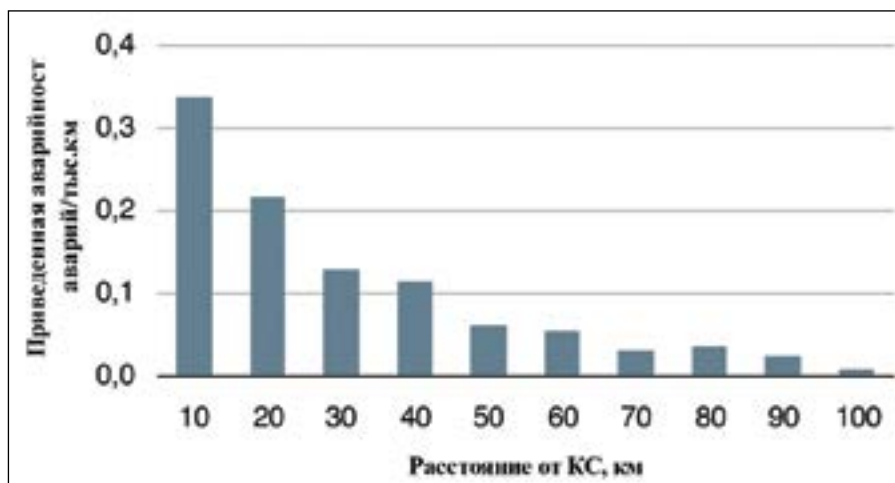


Рис. 2. Распределение отказов МГ, связанных со стресс-коррозией, в зависимости от удаленности от КС

чества дефектов, однако на распределение дефектов по длине участка это не повлияло.

Несмотря на то что внутритрубные снаряды имеют ограниченную чувствительность к обнаружению стресс-коррозионных дефектов и с их помощью удастся обнаруживать только крупные, развитые дефекты, результаты, приведенные на рисунке 1, позволяют говорить о наличии зон, обладающих специфическим набором свойств и параметров металла, самой трубы либо условий эксплуатации, определяющих, по всей видимости, ускоренное развитие в этих местах стресс-коррозионных дефектов в сравнении с соседними участками. В случае несвоевременного проведения ремонтных работ очевидно, что именно развитие одного из этих дефектов приведет к разрушению трубопровода. А исследования характеристик металла в этих зонах или очаге вызванного ими разрушения будут показывать в большинстве случаев наличие дефектов структуры металла, технологии про-

изводства труб, исходных дефектов поверхности и т.д., что подтверждается результатами приведенных выше исследований. Либо исследование условий эксплуатации трубопровода будет показывать наличие непроеekтных нагрузок и воздействий.

В 2012 г. рассматриваемый участок был частично отремонтирован методом переизоляции (рис. 1). При проведении диагностических работ были выявлены многочисленные стресс-коррозионные дефекты, глубина которых в основном не превышала 10–15% толщины стенки трубы. Анализ характера и распределения выявленных дефектов показал, что растрескиванию могут быть подвержены как локальные участки трубопроводов протяженностью в несколько труб, так и протяженные участки, достигающие нескольких сотен метров, с дефектами почти на каждой трубе. При этом отдельные зоны растрескивания могут по длине достигать всей длины трубы, а в ширину – половины ее окружности. При рассмотрении локальных участков трубопровода, подверженных КРН, как

правило, обнаруживаются дефектные зоны, глубина которых значительно превышает глубину основного количества дефектов, что свидетельствует об ускоренном развитии трещин в этих зонах по сравнению с остальными.

Резюмируя отмеченные особенности появления и развития дефектов КРН, можно сказать, что развитие стресс-коррозионного процесса на начальной стадии [8] аналогично коррозионному процессу, возможность реализации которого определяется доступом электролита к поверхности металла и созданием в данной среде требуемого потенциала. Только в случае со стресс-коррозией требуются более сложные условия, определяемые большим числом внешних факторов. А с точки зрения самой конструкции возможность стресс-коррозионного растрескивания, по всей видимости, связана с наличием определенного структурного состояния металла, характерного для всего класса таких конструкционных материалов, как трубные стали, и реализуется при условии создания на поверхности металла специфических условий, обеспечивающих возможность локализации анодного процесса, и наличия напряжений в конструкции, превышающих некоторую пороговую для данных условий величину.

В дальнейшем скорость развития дефектов и переход к стадии ускоренного роста будут определяться сопротивляемостью металла труб коррозионно-механическому разрушению, которая, в свою очередь, зависит как от собственной дефектности металла в зоне разрушения (дефектов поверхности металла и дефектов структуры), так и от условий нагружения и напряженно-деформированного состояния на данном участке трубопровода. К примеру, какие-либо

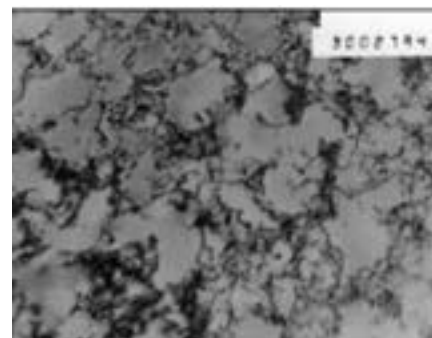
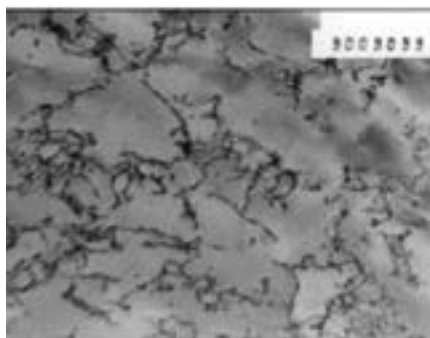
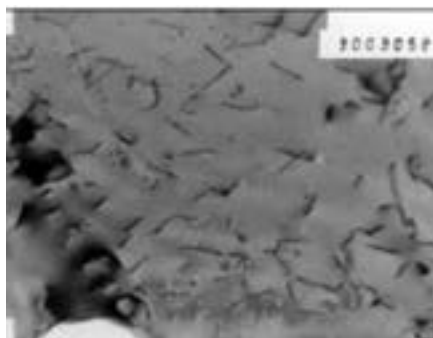


Рис. 3. Дислокационная структура исследованных образцов (увеличение $\times 30\,000$)

- а) дислокационная структура образца № 1 (характерна по всей толщине образца);
- б) дислокационная структура центральной части образца № 2 и частично встречающаяся на его наружной поверхности;
- в) дислокационная структура по всей толщине образца № 3 и на наружной поверхности образца № 2

конкретные металлургические или технологические дефекты трубы при реализации стресс-коррозионного разрушения становятся, как правило, местами локализации и ускоренного протекания процесса. Зависимость скорости роста стресс-коррозионных дефектов от условий нагружения хорошо подтверждается статистикой отказов магистральных газопроводов (рис. 2). Как видно на рисунке, количество отказов, связанных со стресс-коррозией, экспоненциально увеличивается с уменьшением расстояния до места выхода газа с компрессорной станции. Как уже отмечалось ранее, условия нагружения участков, прилегающие к КС, характеризуются высокочастотными циклическими нагрузками с небольшой амплитудой, повышенной температурой и давлением. При этом, как показывают результаты отбраковки труб при капитальном ремонте линейной части магистральных газопроводов, на участках, подверженных в данных условиях стресс-коррозии, дефекты в достаточном количестве могут присутствовать на всем протяжении между компрессорными станциями. Рассматривая отдельно влияние механических факторов, связанных с

особенностями нагружения газопровода, на скорость развития стресс-коррозионных дефектов, очевидно, что в случае близости дефектов к компрессорной станции, ускорение роста дефектов будет связано с задействованием усталостного механизма развития. То есть в условиях сложного квазистатического нагружения сформировавшиеся стресс-коррозионные трещины, достигая определенной глубины, определяющей их чувствительность к данным внешним условиям нагружения, становятся концентраторами напряжений, в которых происходит преимущественное накопление металлом поврежденности, что в конечном итоге приводит к исчерпанию пластичности металла в этой области и ускорению роста дефектов. Для наглядного подтверждения реализации на газопроводах указанных процессов были проведены исследования дислокационной структуры металла [9], поскольку накопление металлом поврежденности характеризуется эволюцией его дислокационной структуры. Исследования производились посредством электронной микроскопии метал-

ла на трех различных образцах: образец № 1 – из трубы стали 17Г1С, Ду 1200 мм, находящейся в аварийном запасе; образец № 2 – из трубы стали 17Г1С, Ду 1200 мм, после 21 года эксплуатации; образец № 3 – из той же трубы, что и образец № 2, но вырезанный из металла под коррозионной каверной диаметром 40 мм и глубиной 25% толщины стенки. Для проведения электронной микроскопии использовался микроскоп JEM200СХ с ускоряющим напряжением 120 кВ. Заготовки в виде пластинок толщиной ~0,3 мм вырезались электроэрозионным способом параллельно наружной поверхности металла с расстояния от поверхности в ~0,1 мм, а также с шагом в 2 мм по всей толщине образцов. Далее образцы механически утонялись до толщины ~0,1 мм и окончательно утонялись методом электролитической полировки в стандартном для материалов на основе железа электролите. Результаты исследований приведены на рисунке 4. Дислокационная структура образца № 1 характеризуется наличием одиночных дислокаций низкой плотности и отсутствием их скоплений (рис. 3а). Данная структура наблюдается по всей толщине образца.



НОВИНКА!

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДОВ ОТ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ



СКЗ-ИП – станции катодной защиты с импульсным преобразованием различных модификаций
КИП-Л, КИП-ПП – стойки контрольно-измерительного пункта из полимерных материалов

- **В-ОПЕ-3, В-ОПЕ-ТМ-1(2)** – автоматические выпрямители
- **В-ОПЕД-М «КЕДР»** – выпрямители с ручным управлением
- **БДРМ** – блоки диодно-резисторные
- **ЭДЛ** – электродренажи поляризованные
- **СКИП-1(2), СКИП-Г** – металлические стойки контрольно-измерительного пункта
- **ЭНЕС** – медносльфатные электроды сравнения
- **БЛИ-2** – блоки пластин-индикаторов скорости коррозии
- **Орион ИП-01** – измерители потенциалов цифровые
- **Установки нагрева нефти в скважинах**

Россия, 355037, г. Ставрополь, 2-й Юго-Западный проезд, 9а
 Тел.: (8652) 77-98-32, 55-15-03, 77-57-16
 Факс: (8652)-77-93-30, 77-93-78
 E-mail: marketing@signalrp.ru;
 www.signalrp.ru

Дислокационная структура поверхности образцов № 2 и 3 представляет собой псевдоячеистые формирования, состоящие из практически бездефектных участков размером ~0,3–0,5 мкм и стенок (дислокационных скоплений высокой плотности) толщиной в 2–3 раза меньшей (рис. 3в). Однако на поверхности образца № 2 встречаются также участки с меньшей плотностью дислокаций и меньшей выраженностью ячеистой структуры (рис. 3б), которые по мере отдаления от наружной поверхности начинают преобладать. На поверхности образца № 3 такие участки не наблюдаются, и даже по мере отдаления от наружной поверхности дислокационная структура, приведенная на рисунке 3в, является доминирующей.

Полученные результаты однозначно свидетельствуют о кардинальных изменениях, произошедших в дислокационной структуре металла газопровода в процессе его эксплуатации. Причем безотносительно того, в течение какого времени газопровод эксплуатировался с коррозионной каверной, можно говорить о том, что изменения дислокационной структуры металла под дефектом еще более ярко выражены.

Таким образом, результаты эксперимента подтверждают, что уровень и характер нагрузок, которые воспринимает газопровод в процессе эксплуатации, являются достаточными для того, чтобы

в его металле происходило накопление повреждений, и в первую очередь в зонах концентрации напряжений. При этом наличие в этих зонах металлургических дефектов, дефектов структуры, остаточных напряжений или других факторов, снижающих трещиностойкость, будет способствовать еще большему ускорению процесса повреждения и истощения ресурса металла. В результате на участках газопроводов, эксплуатирующихся в условиях воздействия непроецируемых нагрузок или повышенного нестационарного нагружения, сложного напряженно-деформированного состояния или имеющих значимую металлургическую или технологическую дефектность элементов, будет происходить образование большего количества и на более ранних этапах эксплуатации дефектов значительной глубины по сравнению с соседними участками, подверженными в данных условиях стресс-коррозии. Наличие подобной неоднородной поврежденности, вызванной различной сопротивляемостью стресс-коррозионному разрушению в процессе эксплуатации участков по длине газопровода, может стать основой для формирования системы мониторинга стресс-коррозионного состояния, базирующейся на контроле наиболее поврежденных участков, а также подходов к оценке степени опасности выявляемых стресс-

коррозионных дефектов и технического состояния газопроводов.

Литература:

1. Канаikin В.А. Диагностика коррозионных повреждений магистральных газопроводов / Под ред. В.Ф. Чабуркина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 104 с.
2. Арабей А.Б., Есиев Т.С. Актуальные вопросы производства труб с повышенной стойкостью к стресс-коррозии // Проблемы системной надежности и безопасности транспорта газа: Сб. науч. тр. – М.: ОО «ВНИИГАЗ», 2008. – 332 с.
3. Канаikin В.А., Матвиенко А.Ф. Разрушение труб магистральных газопроводов: Современные представления о коррозионном растрескивании под напряжением. – Екатеринбург, 1997. – 102 с.
4. Салюков В.В., Медведев В.Н., Тухбатуллин Ф.Г. и др. Влияние технологии производства труб на их предрасположенность к коррозионному растрескиванию под напряжением. – М.: ОО «ИРЦ Газпром», 2007. – 116 с.
5. Репин Д.Г., Лисин В.Н., Спиридович Е.А., Никитина Н.Е. Влияние технологии изготовления труб большого диаметра на возможность их КРН // Газовая промышленность. – 2008. – № 7. – С. 74–75.
6. Отт К.Ф. Стресс-коррозия на газопроводах. Гипотезы, аргументы и факты. – М.: ИРЦ Газпром, 1998. – 70 с.
7. Зорин Н.Е. Экспериментальная оценка работоспособности труб магистральных газопроводов при циклическом нагружении: Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 24.00.19. – Москва, 2010. – 149 с.
8. Казаков Ю.В., Зорин Н.Е. Особенности кинетики развития стресс-коррозионного процесса // Нефть, газ и бизнес. – 2012. – № 10. – С. 62–66.
9. Зорин А.Е. Причины возникновения трещиноподобных дефектов на газопроводах // Газовая промышленность. – 2012. – № 5. – С. 54–57.

Anticorrosive protection

Y.V. Kazakov, piping and mechanical engineer, Air Liquide Vostok LLC; **A.E. Zorin**, Candidate of Technical Sciences, head of division, Subsidiary Joint-Stock Company Orgenergogaz JSC; **N.E. Zorin**, Candidate of Technical Sciences, research scientist, Gazprom VNIIGAZ LLC

Gas pipelines resistance to stress-corrosion cracking in the process of operation

Many studies to determine causes of stress-corrosion cracking (SCC) evidence that SCC-defects may be associate with the defects of structure, composition deflection, defects of pipe form and other defects. In this article on base of main pipeline in-pipe inspection and rebuilding result analysis was elucidated that possibility of SCC-defects formation is determined the features of pipeline steel due to metallurgical and technological production pipe processes. The non-stationary tension in pipeline wall results in micro damage accumulation and, as a consequence, increasing the rate of SCC-defects proceed, especially, in regions with defects of structure and other. This correlation was confirmed examination of metal dislocation structure.

Keywords: gas pipeline, stress-corrosion cracking, diagnostic, dislocation structure

References:

1. Kanaykin V.A. Diagnostika korrozionnykh povrezhdeniy magistral'nykh gazoprovodov (Diagnostics of main gas pipelines corrosion damage) / Under the editorship of V.F. Chaburkin – Moscow: Publishing House of Bauman MSTU, 2000. – 104 p.
2. Arabey A.B., Yesiev T.S. Aktual'nye voprosy proizvodstva trub s povyshennoi stoikost'yu k stress-korrozii (Topical issues of increased stress-corrosion resistance pipe production) // Problems of gas transportation system reliability and safety: Collection of scientific papers – Moscow: VNIIGAZ LLC, 2008. – 332 p.
3. Kanaykin V.A., Matvienko A.F. Razrushenie trub magistral'nykh gazoprovodov: Sovremennye predstavleniya o korrozionnom rastreskivanii pod napryazheniem (Main gas pipelines failures: Modern concepts of stress corrosion cracking). – Yekaterinburg, 1997. – 102 p.
4. Salyukov V.V., Medvedev V.N., Tukhbatulin F.G. et al. Vliyanie tekhnologii proizvodstva trub na ikh predraspolzhennost' k korrozionnomu rastreskivaniyu pod napryazheniem (Impact of pipes production technology on their tendency for stress corrosion cracking). – Moscow: Information and Advertising Center of Gazprom LLC, 2007. – 116 p.
5. Repin D.G., Lisin V.N., Spiridovich Ye.A., Nikitina N.Ye. Vliyanie tekhnologii izgotovleniya trub bol'shogo diametra na vozmozhnost' ikh KRN (Impact of large diameter pipes production technology on the possibility for their stress corrosion cracking) // Gas industry. – 2008. – No. 7. – P. 74–75.
6. Ott K.F. Stress-korroziya na gazoprovodakh. Gipotezy, argumenty i fakty (Stress corrosion on gas pipelines. Hypotheses, arguments and facts). – Moscow: Information and Advertising Center of Gazprom, 1998. – 70 p.
7. Zorin N.Ye. Eksperimental'naya otsenka rabotosposobnosti trub magistral'nykh gazoprovodov pri tsiklicheskom naagruzhении (Experimental evaluation of the main gas pipes cyclic operability): Thesis for Doctor of Science Degree: 24.00.19. – Moscow, 2010. – 149 p.
8. Kazakov Yu.V., Zorin N.Ye. Osobennosti kinetiki razvitiya stress-korrozionnogo protsessa (Kinetics peculiarities of stress corrosion process development) // Oil, gas and business. – 2012. – No. 10. – P. 62–66.
9. Zorin A.Ye. Prichiny vozniknoveniya tretshinopodobnykh defektov na gazoprovodakh (Causes for crack-like defects appearance on gas pipelines) // Gas industry. – 2012. – No. 5. – P. 54–57.