

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 620.193.92:622.692.4

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ОБРАЗОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ
КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ
НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ****д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ, А.С. БОНДАРЕВ, канд. техн. наук, доц. А.Г. КУЛЬБЕЙ
(Полоцкий государственный университет)**

Рассмотрен фактор трубных свойств и способа изготовления. Проведен анализ механических испытаний отобранных образцов дефектных участков, а также анализ результатов лабораторных исследований. Выявлена связь между собой ряда факторов, которые вкпе сопутствуют образованию и дальнейшему развитию дефектов типа коррозионного растрескивания под напряжением (далее – КРН).

Ключевые слова: КРН, низколегированная сталь, термическая обработка, механические испытания, предел текучести, механические свойства, металлографический контроль, испытания.

Введение. Газотранспортная система (ГТС) обеспечивает бесперебойное газоснабжение потребителей Республики Беларусь и является надежным партнером в международной системе транспортировки газа. В 2020 г. после расшифровки данных внутритрубной диагностики (далее – ВТД) впервые были выявлены дефекты типа «зона продольных трещин» на магистральных газопроводах газотранспортной системы Республики Беларусь. В дальнейшем обследовании газопроводов при шурфовке и изучение образцов, вырезанных из дефектного металла трубы, подтвердило стресс-коррозионную природу происхождения дефектов.

Одной из нерешенных проблем в транспорте газа является недостаточная изученность явления коррозионного растрескивания под напряжением. Несмотря на большое количество исследований, вопрос обеспечения надежности магистральных газопроводов исследован недостаточно, а факторы, влияющие на образование данного вида дефекта, не рассмотрены детально.

Основная часть. Цель данной статьи – обзор фактора трубных свойств и способа изготовления, для чего был проведен анализ механических испытаний отобранных образцов дефектных участков, а также анализ результатов лабораторных исследований. Была выявлена связь между собой ряда факторов, которые вкпе сопутствуют образованию и дальнейшему развитию дефектов типа коррозионного растрескивания под напряжением (далее – КРН).

Рассмотрены II и III нитки, лежащие в одном техническом коридоре, магистрального газопровода «Торжок–Минск–Ивацевичи» (далее – МГ «ТМИ») 425–527 км диаметром 1220 мм, на которых были найдены зоны продольных трещин. Стоит отметить, что срок эксплуатации двух ниток МГ превышает полный амортизационный срок эксплуатации (33 года).

Всего на II и III нитках МГ «ТМИ» по результатам ВТД было выявлено 30 (15 труб) и 110 (71 труба) зон продольных трещин соответственно.

1. Паспортные данные объектов.

Участок 425,88–528,48 км МГ «ТМИ» II введен в эксплуатацию в 1978 г. Срок эксплуатации – 42 года. МГ «ТМИ» II расположен в одном техническом коридоре с I и III нитками МГ «ТМИ», которые соединены между собой системой перемычек.

Участок 425,96–527,93 км МГ «ТМИ» III введен в эксплуатацию в 1982 г. Срок эксплуатации – 38 лет. МГ «ТМИ» III расположен в одном техническом коридоре с I и II нитками МГ «ТМИ».

2. Влияние фактора трубных свойств и способа изготовления.

Участок МГ «ТМИ» II состоит из стальных электросварных двухшовных труб D_n 1220x12,0 мм (участки III, IV категорий), а также электросварных двухшовных труб D_n 1220x15,2 мм (участки I и II категорий) класса прочности K52.

Более 99% труб, использованных при строительстве участков МГ «ТМИ» II, изготовлены в 1976–1977 гг. на Челябинском трубопрокатном заводе по ТУ 14-3-109-73 из низколегированной стали марки 17Г1С по ТУ 14-1-446-72 (толщина стенки 12,0 мм и 15,2 мм), а также в феврале–июле 1976 г. на Харцызском трубопрокатном заводе (толщина стенки 12,0 мм). После изготовления электросварные двухшовные трубы термической обработке не подвергались.

Участок МГ «ТМИ» III состоит из стальных электросварных спиральношовных и двухшовных труб с наружным диаметром 1220 мм с толщиной стенки 10,5 мм и 12 мм соответственно (участки III, IV категорий), а также электросварных двухшовных труб с наружным диаметром 1220 мм с толщинами стенок 14,5 и 15,2 мм (участки I и II категорий).

Основной объем использованных при строительстве труб на участке МГ «ТМИ» III изготовлен по ТУ 14-3-721-78 на Волжском трубном заводе из стали марки 17Г1С (класс прочности К60) в 1980 г. (электросварные спиральношовные трубы D_n 1220x10,5 мм). Трубы D_n 1220x12,0 мм изготовлены по ТУ 14-3-602-77 на Челябинском трубопрокатном заводе из стали марки 17Г1С-У (класс прочности К52) в 1980–1981 гг.

После изготовления трубы термической обработке не подвергались за исключением электросварных спиральношовных труб D_n 1220x10,5 мм, которые были подвергнуты термическому упрочнению (ускоренное охлаждение от температуры аустенизации с последующим высоким отпускком) для обеспечения соответствия характеристик механических свойств металла классу прочности К60.

Из приведенных данных следует, что повышенное число стресс-коррозионных дефектов в 200-миллиметровой зоне от продольного шва на двухшовных трубах связано с особенностями технологии их производства.

При формовке заготовок для труб и подгибке кромок в непрерывных валковых станах на трубных заводах возникает предрасположенность к растрескиванию труб в околшовной зоне в виде продольно ориентированных рисок, царапин, зон растрескивания и аномальных пластических деформаций, а также зон напряжений у мест загиба.

При формовке лист протягивается роликами, поэтому для обеспечения сцепления с ними лист формируется сухим и предварительно не очищается. Посторонние мелкие частицы (песок и др.), попадающие между листом и роликами, вызывают большое число поверхностных продольно-ориентированных механических дефектов. После сварки продольных швов трубы термически не обрабатываются, что приводит к остаточным напряжениям в зоне термического влияния.

Спиральношовные трубы изготавливаются из рулонной стали при сворачивании ее в формовочное устройство. После сварки шва трубы проходят термообработку от остаточных напряжений, возникающих из-за формовки и сварки спирального шва.

Вывод по трубным свойствам и способа изготовления:

- повышенное число стресс-коррозионных дефектов в 200-миллиметровой зоне от продольного шва на двухшовных трубах связано с особенностями технологии их производства;
- недостаточно термической обработки, выполняемой для спиральношовных труб, чтобы убрать все концентраторы напряжений, возникающих при изготовлении труб, поэтому в условиях, благоприятных для развития КРН, происходит развитие зон продольных трещин именно в опорной части спиральношовных труб;
- на спиральношовных трубах зоны трещин заявлялись в 4 раза чаще, чем на двухшовных;
- анализ результатов обследования дефектных труб позволяет утверждать, что концентраторы напряжений и другие аномалии, инициирующие рост стресс-коррозионных трещин, возникают в трубах на стадии их производства.

3. Отбор образцов и механические испытания.

На сегодняшний день все исследуемые участки МГ, на которых обнаружены дефекты – зоны продольных трещин, эксплуатируются более 38 лет.

Значительный срок эксплуатации в сочетании с рядом факторов (накопление дефектов в результате воздействия напряжений, коррозионной среды, водорода, износа изоляционных покрытий, ремонтных работ, электрохимического процесса и пр.) отражается на характеристиках трубной стали и предполагает некоторую деградацию металла и возможное снижение прочностных характеристик трубных плетей. Концентраторы напряжений на поверхности трубы (царапины, задиры и др.), которые были не очень опасны после строительства, могут стать критическими после длительной эксплуатации. По сравнению с другими показателями (предел текучести, временное сопротивление), по мнению большинства исследователей, наиболее заметные изменения происходят с ударной вязкостью, характеризующей хрупкое разрушение. Также отмечается, что стандартные механические свойства металла труб МГ после длительной эксплуатации практически не отличаются от нормативных значений, несмотря на деструктивные процессы, происходящие в структуре материала трубы.

На основании обобщения накопленных знаний о трещиноподобных дефектах в рамках реализации мероприятий по снижению аварий МГ по причине КРН ПАО «Газпром» определен перечень труб, склонных к коррозионному растрескиванию под напряжением.

Основная масса труб, используемых при строительстве на анализируемых участках МГ «ТМИ» II, МГ «ТМИ» III (более 50%) в соответствии с перечнем, приведенным в СТО Газпром 2-2.3-760-2013¹, являются склонными к КРН. Спиральношовные трубы по ТУ 14-3-721-78 марки стали 17Г1С (Волжский трубный завод) участка 425,96–527,93 км «ТМИ» III, хоть и отсутствуют в перечне, не единожды упоминались в исследованиях в связи с аварийным разрушением труб вследствие КРН. Перечень труб¹, склонных к КРН и эксплуатируемых на исследуемых участках, приведен в таблице 1.

¹ Инструкция по идентификации коррозионного растрескивания под напряжением металла труб как причины отказов магистральных газопроводов : стандарт организации : СТО Газпром 2-2.3-760-2013 / Разработан науч.-исследоват. ин-том природ. газов и газовых технологий. – М. : ОАО «Газпром», 2015. – IV. – 36 с.

Таблица 1. – Трубы, предрасположенные к коррозионному растрескиванию под напряжением

ТУ на трубу	Диаметр, мм	Класс прочности (марка стали)
ТУ 14-3-109-73	1220	17Г1С, 17Г1С, 17Г2СФ, 14Г2САФ
ТУ 14-3-602-77	1220	17Г1С-У

С учетом результатов последней ВТД, итогов локального обследования и ремонтов дефектов были проведены лабораторные исследования металла труб и сварных соединений темплетов, вырезанных на участке 425,88–528,48 км МГ «ТМИ» II в Оршанском и Крупском УМГ с подтвержденными трещиноподобными дефектами. При исследовании образцов выполнены лабораторные испытания на растяжение в соответствии с ГОСТ 6996-66² и на ударный изгиб в соответствии с ГОСТ 9454-78³. При испытании на ударный изгиб использованы образцы с концентраторами вида U (КСУ-40) и V (КСV0).

По результатам испытаний определены фактические механические свойства металла труб 1220x12,0 мм и сварных соединений (предел прочности, предел текучести и ударная вязкость) из стали марки 17Г1С производства Челябинского и Харьцызского трубопрокатных заводов. Сравнение полученных результатов с нормируемыми величинами⁴ позволяет сделать вывод о несоответствии отдельных показателей. Результаты испытаний, нормируемые значения, минимальные и максимальные значения механических свойств по результатам испытаний, выполненных в 2020 г., приведены в таблицах 2–4.

Таблица 2. – Результаты испытаний на ударную вязкость на участке 425,88–528,48 км МГ ТМИ II

Толщина стенки, мм	Образцы	Ударная вязкость, Дж/см ²			
		Значение КСУ ⁻⁴⁰ по сертификату	Значение КСУ ⁻⁴⁰ КСV ⁰ по СНиП	Диапазон значений КСУ ⁻⁴⁰ по испытаниям	Диапазон значений КСV ⁰ по испытаниям
12 (Оршанское УМГ)	бездефектная зона ОМ	45	Не менее 39,2	52,9–90,2	33,9–73,5
	зона КРН	–	–	16,6–90,7	17,3–68
12 (Крупское УМГ)	бездефектная зона ОМ	45	Не менее 39,2	51,7–93,2	30,4–73,1
	зона КРН	–	–	28,2–58,4	47,8–76,1

Таблица 3. – Результаты испытаний на предел прочности на участке 425,88–528,48 км МГ ТМИ II

Толщина стенки, мм	Образцы	Предел прочности, МПа			
		Минимальное значение по сертификату	Нормируемое значение по ТУ 14-3-109-73	Минимальное значение по испытаниям	Максимальное значение по испытаниям
12 (Оршанское УМГ)	бездефектная зона	540	510	530,7	635
	зона КРН			411,2	640,1
12 (Крупское УМГ)	бездефектная зона ОМ	530	510	543	652
	зона КРН	–	–	502,1	631

Таблица 4. – Результаты испытаний на предел текучести на участке 425,88–528,48 км МГ ТМИ II

Толщина стенки, мм	Образцы	Предел текучести, МПа			
		Минимальное значение по сертификату	Нормируемое значение по ТУ 14-3-109-73	Минимальное значение по испытаниям	Максимальное значение по испытаниям
12 (Оршанское УМГ)	бездефектная зона	540	353	312	455
	зона КРН			314,2	552,4
12 (Крупское УМГ)	бездефектная зона ОМ	360	353	290,7	468,6
	зона КРН	–	–	293,5	502,2

² Сварные соединения. Методы определения механических свойств [Электронный ресурс] : ГОСТ 6996-66. – Введ. 01.01.1967. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003544>

³ Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах [Электронный ресурс] : ГОСТ 9454-78. – Введ. 01.01.1979. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005045>

⁴ Магистральные трубопроводы [Электронный ресурс] : СНиП 2.05.06-85. – Введ. 01.04.1987. URL: <https://www.belorusneft.by/sitebeloil/.content/docs/snip-2.05.06-85-magistralnye-truboprovody.pdf>

Ударная вязкость испытанных образцов основного металл КСУ-40 с концентраторами вида U (бездефектные зоны) соответствует нормируемому значению. Изменений в сторону ухудшения данного свойства не зафиксировано. Несмотря на значительный разброс значений, наблюдается снижение ударной вязкости при испытании металла труб на образцах с острым надрезом КСV0, характеризующее увеличение хрупкости и снижение пластичности.

Так, на 8 трубах из 15 в Оршанском УМГ и на 2 трубах из 8 Крупского УМГ участка 425,88–528,48 км МГ «ТМИ» II (основной металл бездефектных зон) КСV0 зафиксирован ниже минимально допустимого нормативного значения. Для 4 труб результаты испытаний с показателем ниже нормируемого подтверждены дважды (определены на двух образцах из трех), т.е. у 10 труб из 23 испытанных на ударную вязкость на одном образце из 3 выявлены несоответствия (у 4 труб из 23 результаты несоответствия подтверждены дважды). Нельзя исключать, что некоторые трубы изначально имели более низкие значения ударной вязкости основного металла КСV0, при этом соответствовали требованиям ТУ (не ниже 29,4 Дж/см²), но не соответствовали требованиям СНиП 2.05.06 (не ниже 39,2), что подтверждают испытания, проводившиеся ранее (МГ «ТМИ» II, 2010 г.: КСV0 35,7 ± 4,4).

Изменение характеристики КСV0 может влиять на процесс возникновения и развития дефектов КРН, хотя и не будет являться основным признаком склонности сталей к преждевременному хрупкому разрушению при длительном воздействии статических напряжений. Испытания на ударную вязкость не дают однозначную оценку склонности металла к замедленному разрушению, каковым в общем случае является КРН.

Исходя из проведенных испытаний, можно сделать вывод, что предел прочности практически не изменился и в бездефектной зоне превышает минимально допустимое значение (металл труб соответствует нормативным значениям и имеет запас прочности). На 14 трубах (61% из использованных для вырезки темплетов) выявлено снижение предела текучести основного металла (до 290,7 МПа): на 6 трубах из 15 (9 образцов из 45) участка в Оршанском УМГ и на всех 8 трубах (15 образцов из 30) в Крупском УМГ, вырезанных в бездефектных зонах. Для 3 труб (20%) участка Оршанского УМГ и 4 труб (50%) участка Крупского УМГ результаты испытаний с показателем ниже нормируемого подтверждены дважды (определены на двух образцах из трех), при этом одна труба с подтвержденными дважды результатами располагалась в зоне упругопластического изгиба.

В зоне упругопластических изгибов на металл труб воздействуют дополнительные напряжения растяжения и сжатия. Снижение предела текучести в этих зонах обусловлено как изменением механических свойств по причине длительного срока эксплуатации, так и дополнительными напряжениями, приводящими к пластической (в отличие от упругой) деформации. При прочих равных условиях это увеличивает возможность зарождения и развития КРН.

Вывод по механическим испытаниям:

– большой разброс значений предела текучести (от 314 до 552 МПа) в зоне КРН скорее свидетельствует о неоднородности и неравномерности процессов изменения механических свойств металла в зоне роста колониальных трещин и изменений, происходящих в микроструктуре стали;

– механические свойства по результатам испытаний, диапазон значений:

- бездефектных зон:
 - предел текучести основной металл $\sigma_{0,2}$, МПа: 290,7–468;
 - предел прочности (временного сопротивления) σ_b , МПа: 530,7–652;
 - ударная вязкость основной металл КСУ (-40 °С), Дж/см²: 47,8–93,2;
 - ударная вязкость основной металл КСV (0 °С), Дж/см²: 30,4–73,5;
- зон с КРН:
 - предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа: 314 - 552;
 - предел прочности (временного сопротивления), σ_b , МПа: 411–640;
 - ударная вязкость основной металл КСУ (-40 °С), Дж/см²: 16,6–94,7;
 - ударная вязкость основной металл КСV (0 °С), Дж/см²: 17,3–68.

4. Результаты лабораторных исследований.

Были выполнены лабораторные исследования темплетов с дефектами «зона продольных трещин».

Для лабораторных исследований были использованы темплеты, вырезанные из труб 4-х участков с выявленными дефектами зоны продольных трещин (7 фрагментов труб с трещинами КРН на наружной поверхности).

В процессе исследования:

- определен химический состав металла труб;
- выполнен металлографический контроль труб;
- проведены испытания на одноосное статическое растяжение поперечных образцов основного металла трубы;
- проведены испытания на ударный изгиб на образцах Шарпи (ISO-V).

Отмечено, что все обследованные аномалии вида «зона продольных трещин» представляют собой колонии многочисленных трещин, состоящие из совокупности параллельно расположенных отдельных трещин, имеющих общую продольную ориентацию относительно оси трубы. Траектория отдельных трещин внутри колонии имеет извилистый и/или ступенчатый вид. В обследованных зонах в основном отсутствуют значимые коррозионные повреждения металла (общая и неравномерная коррозия, каверны, язвы).

Преимущественная ориентация трещин совпадает с направлением, перпендикулярным действующим растягивающим напряжениям от внутреннего давления при эксплуатации трубы. Траектория трещин имеет извилистый характер, по ходу продвижения трещин наблюдаются разветвления. Между берегами трещин присутствуют продукты коррозии.

Микроисследования показали, что трещины, зародившись на наружной поверхности трубы, продвигаются вглубь ее стенки по извилистой траектории с многочисленными разветвлениями, что говорит о межзеренном характере распространения трещин. Берега трещин с раскрытием более 10 мкм заполнены полностью либо частично продуктами коррозии. Трещины носят ступенчатый характер. Вторичные микротрещины, зародившиеся во внутренних объемах стенки трубы независимо от магистральной трещины, представляют собой микро-расслоения, возникающие на границе раздела матрица–сульфидное включение.

На основании проведенных макро- и микроисследований делается вывод, что растрескивание основного металла носит коррозионно-механический характер, в частности, протекает по механизму КРН. Образование трещин КРН вызвано длительным взаимодействием факторов специфической внешней среды (околотрубного электролита) в зонах повреждения изоляции и напряженного состояния металла трубы, вызванного кольцевыми напряжениями от внутреннего давления продукта, а также структурой и свойствами металла трубы. На рисунках 1, 2 представлены трещины в поперечном сечении на критической и начальной стадиях развития КРН.

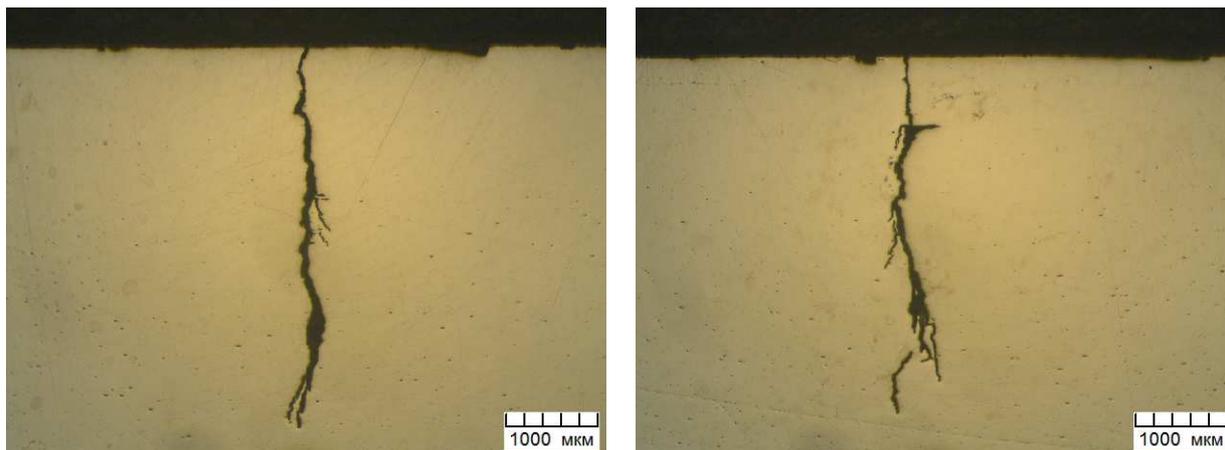


Рисунок 1. – Трещины КРН в поперечном сечении основного металла трубы (критическая стадия)



Рисунок 2. – Трещины КРН в поперечном сечении основного металла трубы (начальная стадия)

Для одного фрагмента трубы исследован излом образца стали (рисунок 3), проведен рентгеноструктурный анализ окисленного слоя. В зоне почернения (поверхность трещины КРН) при увеличении 100 крат был обнаружен окисленный слой красного цвета. Светлая зона представляет собой чистый излом основного металла без окисления.

По результатам расшифровки рентгенограммы окисленный слой на поверхности трещины КРН определен как красная ржавчина состава Fe_2O_3 .

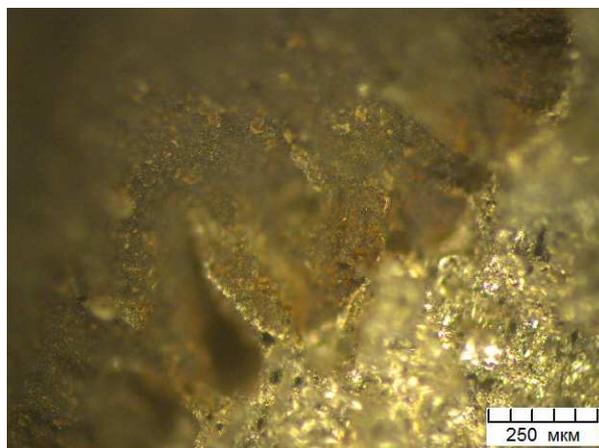


Рисунок 3. – Поверхность излома в зоне почернения

Испытанием на одноосное статическое растяжение поперечных образцов основного металла труб определены базовые характеристики механических свойств, параметров кривой упрочнения и предельных состояний исследуемого металла образцов, изготовленных из основного металла (ОМ) двухшовных труб 1220x12,0 мм марки стали 17ГС, 17Г1С-У по ТУ 14-3-109-73, ТУ 14-3-602-77.

Средние значения прочностных характеристик основного металла труб по результатам испытаний на растяжение поперечных образцов представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Средние значения прочностных характеристик основного металла труб по результатам испытаний на растяжение поперечных образцов

Характеристика	«ТМИ» II (425,88–528,48 км)			«ТМИ» II (529,99–649,76 км)
	1	2	3	4
Номер образца	1	2	3	4
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	496	496	422	438
Предел прочности σ_e , МПа	640	645	547	620
Относительное удлинение $\delta_5\%$	21	23,1	26,9	25,6
Отношение $\sigma_{0,2} / \sigma_e$	0,78	0,77	0,77	0,71
Напряжение разрушения σ_k , МПа	1239	1294	1032	985
Удельная работа равномерной деформации W_m , МДж/м ³	82	96	104	111
Удельная работа разрушения образца W_p , МДж/м ³	845	872	716	469

Испытанием на ударный изгиб на образцах Шарпи (ISO-V) основного металла труб определены минимальная ударная вязкость KCV при температуре испытаний 0 °С и доля вязкой составляющей в изломе образца. Средние значения характеристик основного металла труб по результатам испытаний на ударный изгиб представлены в таблице 6.

Таблица 6. – Средние значения характеристик основного металла труб по результатам испытаний на ударный изгиб

Характеристика	«ТМИ» II (425,88–528,48 км)			«ТМИ» II (529,99–649,76 км)
	1	2	3	4
Номер образца	1	2	3	4
Минимальная ударная вязкость KCV, Дж/см ²	33,1	25,7	46,6	39,2
Доля вязкой составляющей в изломе, %	0	0	20-25	100

Сравнение полученных данных с нормативными документами позволяет заключить, что фактические прочностные и пластические характеристики основного металла труб полностью соответствуют нормируемым требованиям.

Ударная вязкость и трещиностойкость основного металла 5 образцов находятся на низком удовлетворительном уровне, 1 – на неудовлетворительном.

Вывод по лабораторным исследованиям:

– в соответствии с результатами анализ выполненных обследований дефектов и лабораторных исследований труб показал полное соответствие выявленных зон продольных трещин дефектам КРН. Выявленные дефекты классифицируются как начальная, средняя и критическая стадия развития трещин КРН (глубина проникновения трещин КРН составляет от 0,5 мм до 4,25 мм);

– анализ выполненных обследований дефектов и лабораторных исследований труб на МГ «ТМИ» II км 425,88–528,48 показал полное соответствие выявленных зон продольных трещин дефектам КРН. Выявленные дефекты классифицируются как средняя и критическая стадия развития трещин КРН (глубина трещин КРН составляет от 0,6 мм до 1,8 мм);

– анализ выполненных обследований дефектов и лабораторных исследований труб на МГ «ТМИ» III км 425,90–529,00 показал полное соответствие выявленных зон продольных трещин дефектам КРН. Выявленные дефекты классифицируются как начальная, средняя и критическая стадия развития трещин КРН (глубина трещин КРН составляет до 0,5 мм на спиральношовных трубах до 3,5 мм на двухшовных).

Таким образом, для определения участков с возможными дефектами стресс-коррозионного происхождения, не выявленных ВТД, необходимо учитывать следующие факторы:

– пленочное защитное покрытие трассового нанесения;

– наличие многочисленных дефектов защитного покрытия в виде гофр и складок (фактор фактически невозможно использовать при определении участков ввиду отсутствия достоверных данных);

– наличие многочисленных коррозионных язв, расположенных в опорной части трубы на расстоянии 100–300 мм от кольцевых швов и вытянутых вдоль продольного шва (для спиральношовных труб – только в опорной части) и зафиксированных на нескольких трубах подряд по результатам ранее выполненной ВТД;

– минимальная толщина стенки трубы на участке;

– наличие временных водотоков, отчетливо выраженных в рельефе местности;

– наличие глинистых периодически увлажняемых грунтов согласно данным исполнительной документации;

– общая зарегулированность дождевого и речного стока – наличие мелиоративных каналов по трассе МГ (количество КРН уменьшается).

Заключение. Анализ результатов диагностических обследований, шурфовок и ремонтов участков МГ с дефектами «зона продольных трещин» показал, что КРН подвержены трубы:

– с минимальной толщиной стенки (10,5 мм; 12 мм) из уложенных на участках труб;

– спиральношовные Волжского трубного завода, двухшовные производства Харцызского и Челябинского трубопрокатных заводов;

– марки стали 17Г1С, 17Г1С-У;

– со сроком эксплуатации 38 и более лет;

– с пленочной изоляцией трассового нанесения;

– с неудовлетворительным состоянием изоляции (как правило, с наличием подпленочного электролита ввиду большого количества гофр и складок);

– заложенные в суглинистых и глинистых почвах либо песчаных/супесчаных, подстилаемых тяжелыми водонепроницаемыми глинистыми грунтами в местах сезонного и постоянного переувлажнения.

По результатам проведенных механических испытаний отмечены незначительные изменения в свойствах стали труб анализируемых участков: снижение предела текучести и ударной вязкости.

В соответствии с результатами лабораторных исследований установлено полное соответствие выявленных зон продольных трещин дефектам КРН; фактические прочностные и пластические характеристики основного металла труб соответствуют нормируемым требованиям. Ударная вязкость и трещиностойкость основного металла находятся на низком удовлетворительном и неудовлетворительном уровне.

Практически 100% дефектов расположено в угловой ориентации от 4 до 8 часов, для двухшовных труб – в зоне продольного сварного шва в опорной части.

Влияние циклических нагрузок за период 2016–2020 гг. (максимальных перепадов давления и температур, характерных для участков, расположенных по ходу газа за выходными шлейфами КС) не подтверждается. Основная масса труб с подтвержденными дефектами располагалась на расстоянии > 20 км от выходного шлейфа и далее по ходу газа. На участке МГ «ТМИ» III наблюдается аналогичная ситуация – за выходным шлейфом КЦ-3 дефектов КРН в 15-километровой зоне не выявлено.

Однозначно выделить доминирующий фактор для возникновения и развития КРН не представляется возможным, т.к. факторы оказывают взаимосвязанное и комплексное воздействие.

Поступила 27.10.2021

**INVESTIGATION OF FACTORS THAT INFLUENCE THE FORMATION AND DEVELOPMENT
OF STRESS CORROSION CRACKING
IN GAS PIPELINES**

V. IVANOV, A. BONDAREV, A. KULBEI

The article considers factor pipe properties and manufacturing method, an analysis of mechanical tests of selected samples of defective areas was carried out, as well as an analysis of the results of laboratory studies. A number of factors have been identified, which together accompany the formation and further development of defects such as stress corrosion cracking (hereinafter referred to as CRN).

Keywords: *KRN, low-alloy steel, heat treatment mechanical tests, yield strength, mechanical properties, metallographic control, testing.*