

О.И. Стеклов, д.т.н., профессор РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина; **К.М. Дзиев**, вице-президент ООО «Стройгазконсалтинг»; **К.Д. Басиев**, д.т.н., профессор; **И.Д. Музаев**, д.т.н., профессор, ООО «СпецРемДиагностика»

КОРРОЗИОННЫЕ И СТРЕСС-КОРРОЗИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ ПЕРЕКАЧИВАЕМОГО ГАЗА

Разработана методика оценки склонности трубных сталей и сварных соединений к зарождению и развитию коррозионных и стресс-коррозионных трещин. Исследована кинетика развития одиночных поверхностных трещин на воздухе и в коррозионной среде при циклическом нагружении. Опасность трещин основывается на сведениях об их размерах, скорости роста и взаимного влияния двух или более трещин в процессе их развития. Полученные результаты позволяют прогнозировать степень опасности трещин и определяют запас прочности дефектной трубы.

Ключевые слова: коррозия, стресс-коррозия, магистральные газопроводы, напряженное состояние, сварные соединения, упругая энергия, поверхностные трещины.

Условия эксплуатации газонефтепроводов существенно отличаются от работы других металлических конструкций. Они эксплуатируются, как правило, в сложных природно-климатических условиях, испытывают воздействие двухосного напряженного состояния, циклических нагрузок и подвергаются воздействию коррозионно-активных сред как внутри, так и снаружи трубы [1]. Серьезно усложняют работу металла в трубах сварные соединения, которые в силу ряда известных особенностей обладают повышенной склонностью к разрушениям. Очевидно, что помимо прочих факторов на эксплуатационную надежность трубопроводов значительное влияние будут оказывать конструктивные особенности и технологическая наследственность трубы, которая обусловлена всем комплексом последовательных технологических приемов изготовления и монтажно-сварочных операций сборки самого трубопровода. Роль этих факторов в обеспечении работоспособности кон-

струкции различна и может существенным образом меняться в зависимости от конкретных условий эксплуатации, в частности от состава транспортируемого продукта, температуры окружающей среды, характера нагружения и т.д. Однако ясно, что их влиянием на прочность и долговечность пренебрегать нельзя. Газопроводы диаметром $\varnothing 1220, 1420$ мм аккумулируют большое количество упругой энергии перекачиваемого продукта, а также энергии упругой деформации стенки трубопровода и представляют большую опасность вследствие коррозионного и стресс-коррозионного разрушения. Запас упругой энергии (ЗУЭ) газа зависит от диаметра трубы, ее жесткости, величины давления газа, поэтому исследование влияния ЗУЭ газа на коррозионные и стресс-коррозионные разрушения трубопроводов является важной задачей. Повышение ЗУЭ в газопроводе способствует накоплению повреждений и стимулирует процессы КРН.

Проведенные исследования посвящены моделированию процессов зарождения и развития поверхностных трещин в стенках газонефтепроводов. Разработанная модель позволила получить расчетные формулы для определения критических размеров развивающейся трещины.

Удельная упругая энергия сжатого газа на единицу длины трубопровода определяется по формуле:

$$U_r = \frac{\pi d^2}{4} \cdot P \ln \frac{P}{P_a}, \quad (1)$$

где P – давление газа в трубе, P_a – атмосферное давление, d – диаметр трубы.

Энергия в нефтепроводе состоит из двух частей. Одна часть определяется упругими свойствами нефти, вторая – гидростатическим давлением:

$$U_{H1} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{P^2}{2E} (2) \text{ и } U_{H2} = \frac{\pi d^2}{8} \cdot P, \quad (2)$$

где $E = 1,35 \cdot 10^9$ Н/м² [2].

При диаметре трубы $d = 1020$ мм,

$P=70 \cdot 10^{-5}$ Па, отношение

$$\frac{U_{1H}}{U_H} \approx 0,25 \cdot 10^{-2}, \quad (3)$$

следовательно, потенциальная энергия нефти в нефтепроводе определяется по формуле:

$$U_H \approx U_{H2} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot P. \quad (4)$$

На рисунке 1 представлена зависимость отношений удельных упругих энергий газа и нефти от давления при диаметре $d=1420$ мм и толщине стенки трубы 16,6 мм.

Из приведенной зависимости видно, что при

$$\frac{P}{P_a} = 70$$

удельная энергия газа в 4,25 раза больше, чем в нефтепроводе.

Процесс роста поверхностной трещины представим в виде модели, состоящей из двух последовательно соединенных пружин (рис. 2).

Пружина А имитирует упругие свойства сжатого газа, а пружина В – развитие трещины в стенке трубопровода.

В месте контакта указанных пружин сосредоточена фиктивная масса m . Колебательное движение массы m описывается дифференциальным уравнением второго порядка [3]:

$$m \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \mu \frac{dx_1}{dt} + (K_1 + K_0) X_1 = K_1 X_0, \quad (5)$$

где $X_1(t)$ – перемещение массы m ; μ – коэффициент вязкого сопротивления; K_1 – жесткость пружины А; K_0 – жесткость пружины В; X_0 – величина сжатия пружины А, численное выражение которого определяется из выражения:

$$K_1 \frac{X_0^2}{2} = \Delta U_r; \quad X_0 = \sqrt{\frac{2 \Delta U_r}{K_1}}, \quad (6)$$

где ΔU_r – удельная упругая энергия газа. Решение уравнения (5) при начальных условиях $X_1(t)=0$; $\dot{X}_1(t)=0$ при $t=0$ имеет следующий вид:

$$X_1(t) = -e^{-\frac{\mu t}{2m}} \left(\frac{\mu}{2m\lambda} \cdot \frac{K_1 X_0}{K_1 + X_0} \cdot \sin \lambda \cdot t + \frac{K_1 X_0}{K_1 + X_0} \cdot \cos \lambda t \right) + \frac{K_1 X_0}{K_1 + X_0}, \quad (7)$$

где $\lambda = \sqrt{\frac{K_1 + K_0}{m} - \frac{\mu^2}{4m^2}}$, при $t \rightarrow \infty X_1 \rightarrow$

асимптотически приближается к величине:

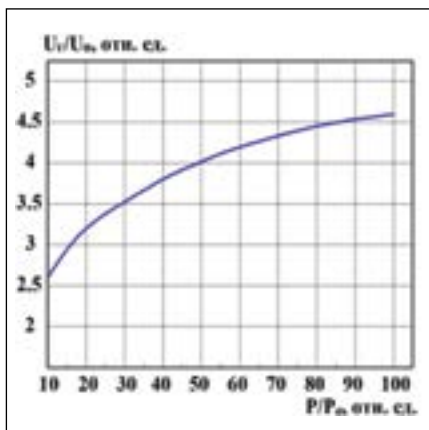


Рис. 1. Зависимость отношения удельных упругих энергий газа и нефти от относительного давления в трубопроводах

$$X_1 = \frac{K_1 K_0}{K_1 + K_0}, \text{ или } X_1 = \frac{\sqrt{2 \Delta U_r} \cdot K_1}{K_1 + K_0} \quad (8)$$

Из закона Бойля – Мариотта для изотермического процесса жесткость пружины, описывающая ЗУЭ сжатого газа, равна $K_1=P$, где P – давление газа в трубопроводе.

Для определения жесткости стенки трубы с дефектом необходимо использовать зависимость [4], которая устанавливает связь между коэффициентом интенсивности напряжения, размерами дефекта и толщины стенки трубопровода:

$$K_0 = \frac{0,06 h^2 K_{1c}}{a \sqrt{a}} \cdot f, \quad (9)$$

$$f = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 < \frac{a}{h} < 0,1 \\ 1,4 \frac{a}{h} + 1,1, & \text{при } 0,1 \leq \frac{a}{h} \leq 0,4; \end{cases}$$

a – глубина трещины, h – высота стенки трубы.

Приращение размеров трещины ΔC_r определяется по формуле [5]:

$$\Delta C_r = \frac{4 K_0 E \cdot \Delta U_r \cdot K_1}{3 (K_0 + K_1)^2 \cdot K_{1c}^2}, \quad (10)$$

где $\Delta U_r = \frac{4}{\pi d^2} \cdot U_r \cdot \frac{d}{2} \cdot l \cdot \eta,$

l – полудлина трещины, η – начальная ширина полуэллиптической трещины.

$$\eta_0 = \frac{2(1-\mu^2) \cdot l \cdot \sigma}{E \cdot \phi}, \quad (11)$$

где ϕ – параметр, зависящий от формы образца и геометрии трещины, μ – коэффициент Пуассона, E – модуль упругости.

Для рассматриваемого случая исходя из параметров дефекта:

$$\eta = \frac{3 \cdot p \cdot d^3}{2 E \cdot h^3} \cdot \eta_0. \quad (12)$$

Величина удельной упругой энергии сжатого газа, которая концентрируется в зоне дефектов и способствует росту параметров трещины (l, a, η), приведена на рисунке 3 и определяется по формуле:

$$\Delta U_r = 0,75 d^4 \cdot P_a^2 \cdot \left(\frac{P}{P_a}\right)^2 \cdot l_n \frac{P}{P_a} \cdot \frac{l \cdot \eta}{E h^3}. \quad (13)$$

При известных K_1, K_0, K_{1c} и ΔC_r в [5] приведена зависимость:

$$T = \frac{a}{h} + 0,6 \frac{a}{l} - 0,4,$$

при $T < 0$ глубина трещины увеличивается на ΔC ; при $T > 0$ трещина более интенсивно развивается по поверхности.

Задачей первостепенной важности является создание принципиально новых типов образцов, позволяющих наиболее полно моделировать условия работы металла в трубах.

Образец должен обладать совокупностью конструктивно-технологических признаков реальной трубы, запасом упругой энергии сжатого газа, а при наличии сварных швов обеспечивать сохранение поля остаточных сварочных напряжений.

На рисунке 4 показан образец и испытательный стенд. Образец состоит из металла трубы и жесткой вставки. Для обеспечения равномерных растягивающих напряжений по толщине в сегменте испытываемого металла трубы в



Рис. 2. Модель влияния запаса упругой энергии сжатого газа на развитие повреждений в стенке газопровода

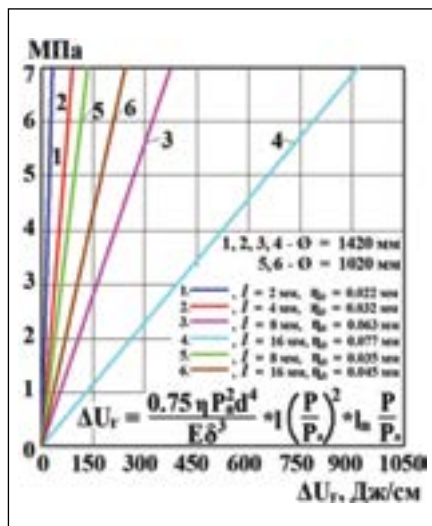


Рис. 3. Зависимость величины удельной упругой энергии сжатого газа, приходящейся на дефект, от давления газа в трубе

центральной части образца в жесткой вставке выполнена проточка. Длина проточки способствует выравниванию напряжений по толщине испытуемого металла трубы и определяется по расчетной схеме как для пластины, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой [6].

Изменение зазора в зоне проточки определялось с помощью индикатора часового типа в процессе нагружения образца. Выявленный эффект деформации части образца способствует выравниванию растягивающих напряжений по толщине сегмента.

На рисунке 5 приведены расчетно-экспериментальные зависимости величины напряжений по внутренней и наружной поверхностям сегмента образца в зависимости от величины проточки в жесткой вставке. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что в рабочей зоне разработанного образца моделируется двухосное напряженное

состояние однородное поле растягивающих напряжений по толщине.

Для оценки склонности трубных сталей к коррозионному и стресс-коррозионному разрушению используется разработанный образец из металла реальной трубы, при нагружении которого в рабочей зоне моделируется двухосное напряженное состояние и запас упругой энергии сжатого газа.

Образец и методика испытания позволяет исследовать кинетику роста усталостных и коррозионных несквозных трещин полуэллиптической формы.

Наиболее частыми причинами образования усталостных и коррозионных трещин являются поверхностные несквозные дефекты. Закономерности указанных трещин (дефектов) изучены не в полной мере вследствие трудностей, связанных с экспериментальными и теоретическими исследованиями. Поэтому исследование кинетики развития поверхностных трещин представляет теоретический и практический интерес. Поверхностные трещины полуэллиптической формы определяются параметрами a и $2l$, a – глубина трещины, $2l$ – длина трещины по поверхности. Кинетика развития поверхностной трещины зависит от начальных размеров трещины, вида напряженного состояния и условий эксплуатации (наличие коррозионной среды). Неглубокие и вытянутые по поверхности полуэллиптические трещины при циклическом растяжении в начальном этапе своего развития стремятся к полукруглой форме, и при достижении определенной глубины по толщине образца наблюдается тенденция к сплющиванию контура трещины и уменьшению отношения a/l .

Одной из причин сплющивания полуэллиптической трещины является изгибающий момент, возникающий вследствие

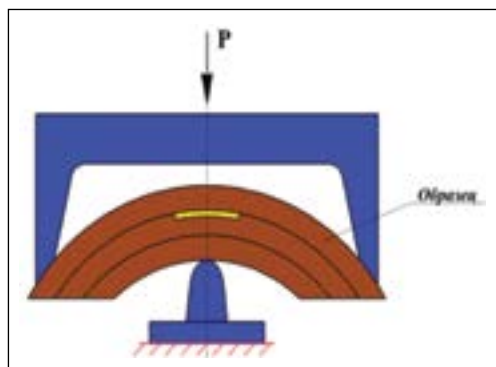
несимметричности сечения, ослабленного развивающейся трещиной. Величина изгибающей составляющей определяется через деформации с помощью тензодатчиков и размерами раскрытия берегов трещины.

Образец с начальными размерами трещины подвергали циклическому нагружению. Периодически испытания приостанавливали и измеряли размеры развивающейся трещины по толщине и поверхности образца, а также определяли величину раскрытия трещины. Глубину трещины определяли с помощью ультразвукового преобразователя «УСД-50» с точностью 0,05 мм, а размер трещины по поверхности – с помощью оптического микроскопа BAUSCH & LOMB Rochester N.Y. USA с точностью 0,01 мм, раскрытие трещины фиксировали цифровым микроскопом KS-is Digi Score II v3 с точностью 0,03 мм. На рисунке 6 приведена кинетика развития одиночной трещины.

Первая стадия развития трещины при циклических испытаниях стали X70 характерна интенсивным ростом трещины по толщине образца (составляет 20–25% толщины) и отсутствием изменений размера по поверхности (рис. 6). На второй стадии наблюдается замедленный рост трещины по толщине и поверхности, при достижении отношения $a/l \approx 1$ вторая стадия развития полуэллиптической трещины переходит в завершающую стадию. С увеличением размеров наведенных трещин по поверхности от 4 до 32 мм наблюдается интенсивное их развитие по толщине, поверхности и рост раскрытия трещины – η

$$\text{где } \eta = \frac{2(l-\mu^2) \cdot l_{\sigma}}{E \cdot \varphi} \quad (14),$$

l – длина трещины по поверхности; E – модуль упругости; φ – параметр, за-



а)



б)



Рис. 4. Образец с жесткой вставкой: а) образец и нагружающее устройство, б) испытательный стенд

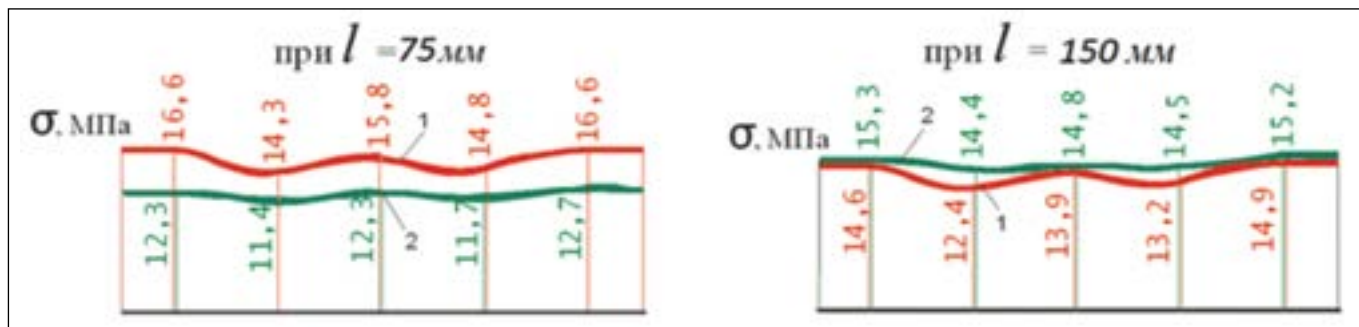


Рис. 5. Эпюра распределения напряжений по толщине образца: 1 – по наружной поверхности, 2 – по внутренней поверхности

висящий от формы образца и геометрии трещины.

Наведенные трещины с начальными размерами $2l=16; 32$ мм достигают критических размеров при $180 \cdot 10^3$ циклах нагружений, а трещины с размерами $2l=4; 8$ мм – при $250 \cdot 10^3$ циклах. Оценка критических размеров трещины в трубной стали Х70 для конкретных эксплуатационных условий позволяет определить критическое значение K_{1C} . Темп роста K_{1C} зависит от размеров развивающейся трещины (рис. 7). Полученные зависимости

$$K_{1C} \text{ от } V = \frac{d_a}{d_n}$$

позволяют прогнозировать кинетику развития трещин.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что они могут быть использованы при определении опасности дефекта и поведения его в эксплуатационных условиях. Сопоставление критической трещины с размерами развивающейся трещины при циклических испытаниях позволит определить запас дефектной трубы по уровню давления и принять обоснованное решение о последующих действиях [7].

Опасность трещин основывается на сведениях об их размерах, возможной скорости роста и взаимодействии двух или более трещин в процессе их развития. Разработанная методика позволяет прогнозировать степень опасности трещин, оказывающих взаимное влияние друг на друга.

В монографии [8] изложена постановка и решение задачи о напряженно-деформированном состоянии пластины, ослабленной двумя равными коллинеарными трещинами при одноосном растяжении пластины.

Коллинеарные трещины растут друг другу навстречу, после их слияния в

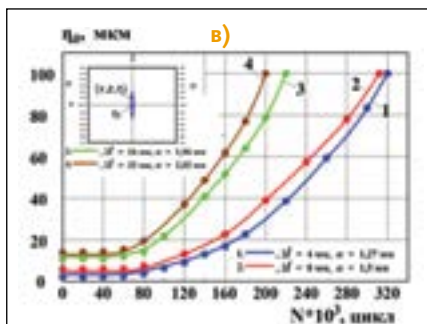
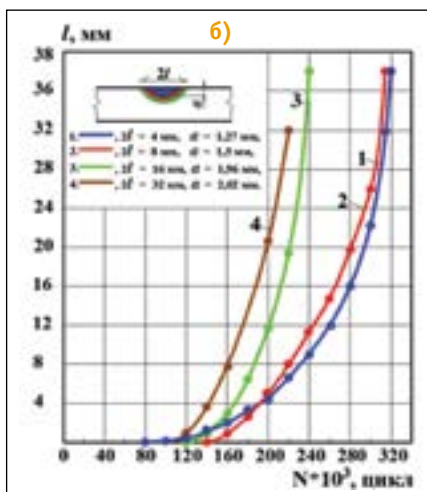
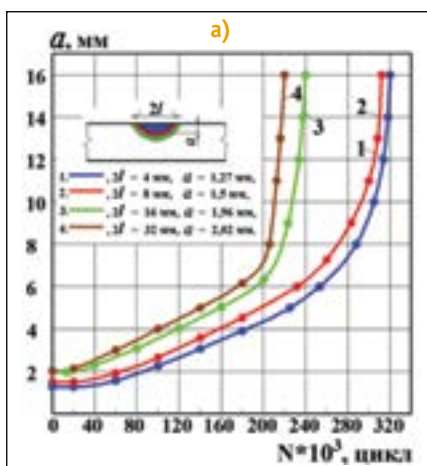


Рис. 6. Развитие наведенных трещин эллиптической формы на образцах из трубной ст. Х70, $\varnothing 1420$ мм, $\delta=16,5$ мм по толщине (а), по поверхности (б) и раскрытие берегов трещины (в) при циклическом нагружении: $\sigma_{max}=0,8\sigma_T$, $f=330$ ц/м, $R=0,6$

действие вступает одна трещина удвоенной длины.

Критические напряжения зависят от расстояния между центрами трещин (перемычки)

$$d, \lambda = \frac{2l}{d};$$

$2l$ – длина трещины по поверхности. При $\lambda \geq 0,9$, размер перемычки незначительный по сравнению с длиной трещины, что приводит к разрушению перемычки и слиянию двух трещин в одну удвоенной длины.

Критическое напряжение равно:

$$\sigma^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sigma^0, \tag{15}$$

где σ^* – критическое напряжение при взаимодействии двух коллинеарных трещин; σ^0 – критическое напряжение при развитии одиночной трещины.

При $\lambda \geq 0,9$ разрушающая нагрузка превосходит нагрузку, которая необходима для роста трещины удвоенной длины и может привести к развитию трещины по всей ширине пластины.

В работе проведены исследования образцов из ст. Х70 с двумя трещинами при циклическом нагружении при

$$\sigma_{max}=0,8\sigma_m; R=0,6; f=330 \text{ цик/мин.}$$

Анализ полученных результатов (рис. 8) свидетельствует о том, что максимальные размеры трещины – $a=15$ мм, $l=27$ мм достигаются для одной трещине при $260 \cdot 10^3$ циклах нагружений, а для двух наведенных трещин – при $170 \cdot 10^3$ циклах. Значительный рост двух трещин происходит в результате их взаимного влияния и слияния в одну трещину.

Развитие двух трещин зависит от расстояния между трещинами, при $d > 5l_{max}$ взаимное влияние не проявляется, где d – расстояние между двумя трещинами.

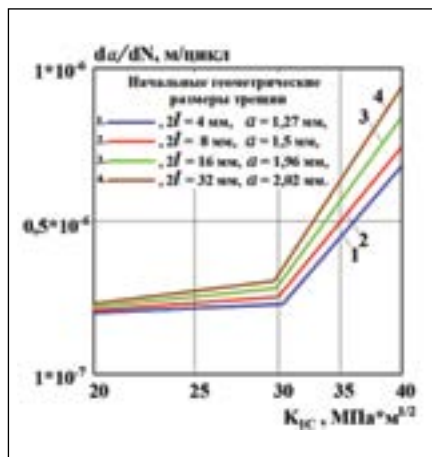


Рис. 7. Зависимость K_{IC} от скорости развивающейся трещины по толщине образца

ми; l_{max} – максимальная длина одной из трещин по поверхности. Рост наведенных трещин в ст. Х70 возрастает при действии коррозионно-активной водородосодержащей среды. На рисунке 9 приведены экспериментально полученные результаты для

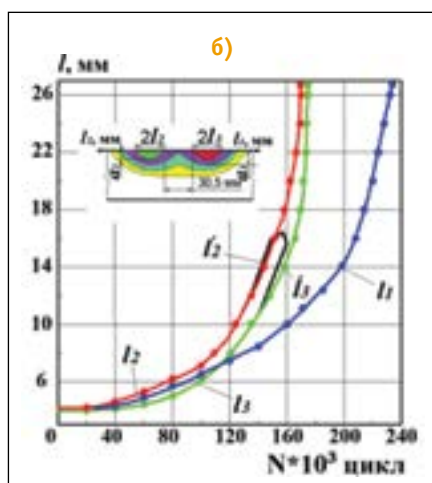
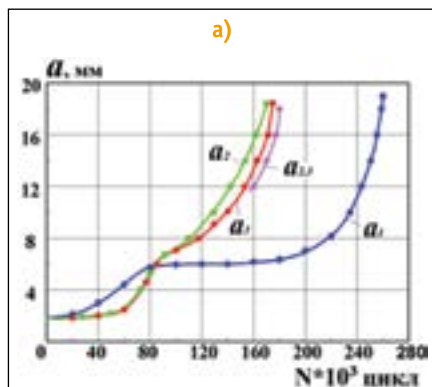


Рис. 8. Развитие одиночной (1) и двух (2, 3) наведенных трещин эллиптической формы на образцах из трубной ст. Х70, $\varnothing 1420$ мм, $\delta=18,5$ мм, по толщине (а) и поверхности (б) при циклическом нагружении $\sigma_{max}=0,8\sigma_T$, $R=0,6$

двух наведенных трещин и одиночной трещины после выдержки в коррозионно-активной среде. Коррозионная среда ускоряет рост трещин по сравнению с образцами, испытанными без среды. Максимальные размеры двух наведенных трещин достигаются при циклическом нагружении исходных образцов при 170 т. циклах, а после выдержки в коррозионной среде – при 130 т. циклах.

Кинетика развития двух наведенных трещин эллиптической формы в коррозионной среде по поверхности и толщине образца приведена на рисунке 10. Одной из главных причин резкого снижения трещиностойкости конструкционных материалов во многих коррозионных средах является влияние атомарного водорода. Установлено, что диффундирующий в металл водород ухудшает исходные механические свойства, активизирует процессы замедленного разрушения, существенно ускоряет развитие усталостных трещин. Согласно физико-механической модели роста трещин в металлах под воздействием водорода, развитие магистральной трещины представляется многостадийным процессом. При достижении коэффициентом интенсивности напряжений K_I у фронта трещины своего критического значения K_{IC} устойчивость дислокационных скоплений в зоне предразрушения нарушается и происходит образование дислокационной микротрещины, которая движется навстречу магистральной трещине.

Таким образом, рост микротрещины будет происходить последовательными скачками в момент достижения критической комбинации $\sigma_{кр}+C_{кр}$ [9], где $\sigma_{кр}$ – критическое напряжение, $C_{кр}$ – критическая концентрация водорода. Продолжительность скачка трещины Δt и его протяженность L определяет среднюю микроскопическую скорость роста

$$V = \frac{L}{\Delta t}$$

Современные способы диагностики магистральных газопроводов позволяют осуществлять ранжировку обнаруженных дефектов на опасные и безопасные. К безопасным дефектам (трещинам) относятся дефекты с максимальной глубиной до 20–25% толщины стенки трубы, это подтверждается экспериментальными результатами при проведении циклических нагружений образцов из

ст. Х70 с одной наведенной поверхностной трещиной. Контроль за поведением безопасных дефектов в действующем газопроводе осуществляется путем повторной диагностики с учетом географических особенностей трассы и показателей грунтового электролита. На основании повторной диагностики в случае выявления растущих трещин с большой вероятностью делается прогноз, заключающийся в том, что протяженные трещины могут перерасти в магистральную и привести к разрушению газопровода.

Коррозионное растрескивание под напряжением наблюдается в газопроводах большого диаметра. Использование

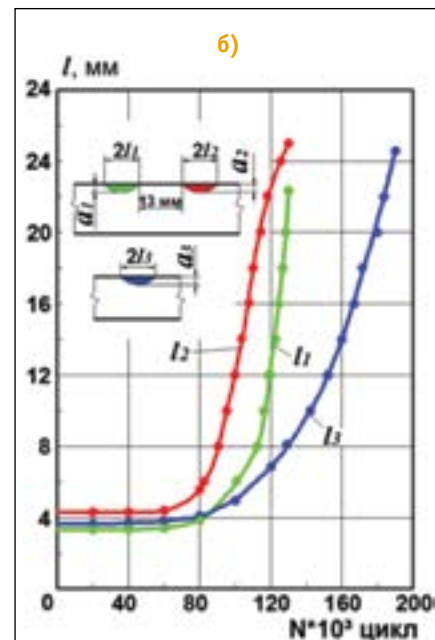
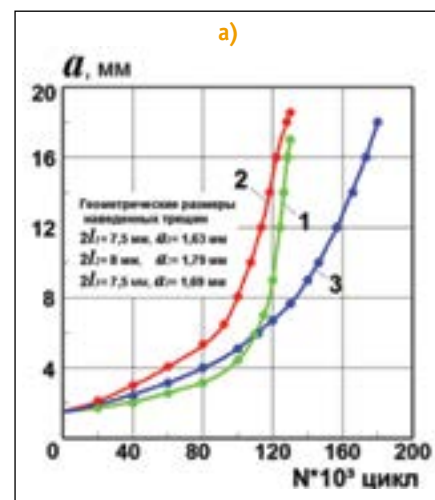


Рис. 9. Влияние коррозионной среды на развитие двух (1, 2) и одиночной (3) трещин эллиптической формы по толщине (а) и поверхности (б) образцов из трубы ст. Х70, $\varnothing 1420$ мм, $\delta=18,5$ мм при циклическом нагружении

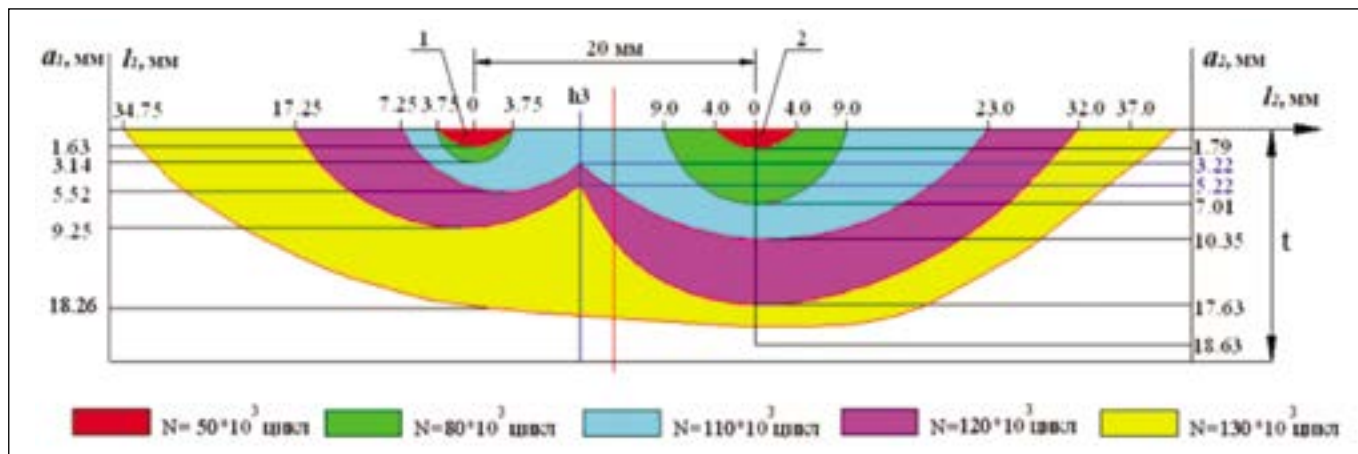


Рис. 10. Кинетика развития наведенных дефектов (1, 2) по поверхности и толщине образца из ст. X70 трубы $\varnothing 1420$ мм $\delta=18,5$ мм с учетом их взаимного влияния при циклическом нагружении $\sigma_{max}=0,8\sigma_T$, $R=0,6$, действии коррозионной среды. t – толщина образца, l_1, l_2 – размеры развивающихся трещин по поверхности, a_1, a_2 – по толщине

в газопроводах большого диаметра стали повышенной прочности позволили увеличить давление перекачиваемого газа. Однако это, в свою очередь, привело к значительному увеличению запаса упругой энергии сжатого газа в трубе. Статистика свидетельствует о существовании явной корреляции между динамикой изменения прочности трубных сталей, увеличением запаса упругой энергии и временем до растрескивания труб магистральных газопроводов

[10]. Авторы [11] полагают, что в не подгружаемой системе единственным источником энергии, требуемой для протекания локальной пластической деформации и роста трещин, может быть упругая энергия, запасенная в самой системе. Следовательно, локализация (с течением времени) деформации и разрушения в наиболее напряженных объемах материала является необходимым условием для последующего перераспределения упругой энергии.

Вероятно, на поверхности металла ненапряженной трубы существуют активные участки (границы зерен, скопления дислокаций и т.д.), на которых в процессе нагружения протекают локальные микропластические деформации. Зарождение изолированных микротрещин происходит преимущественно в местах выхода неметаллических включений на внешнюю поверхность трубы вследствие локального анодного растворения. Металл в вершине анод-



ГРУППА КОМПАНИЙ



- Разработка и промышленное производство высокотехнологичных стальных опор новых типов для ЛЭП напряжением 6-10, 35, 110 и 220 кВ (аттестовано в ФСК)
- Комплексное обслуживание объектов электроснабжения (проектирование, комплектация, строительство ЛЭП и подстанций, пусконаладка)
- Услуги горячего цинкования
- На наших опорах построено более 15 000 км ЛЭП
- Наши заказчики: Газпром, НК Роснефть, Транснефть, Тоталь, Лукойл, ТНК-ВР, НОВАТЭК, Сибур, АЛРОСА, Холдинг МРСК, РАО Энергетические системы Востока, Российские железные дороги



на правах рекламы



Рис. 11. Стресс-коррозионные трещины, полученные в лабораторных условиях на стали X-46

ного растворения более отрицательный, поэтому происходит дальнейшее растворение по границам зерен и рост концентрации напряжений в вершине дефекта.

По мере коррозионного углубления дефекта начинает интенсивно реализовываться «щелевой» эффект, т.е. гидролиз продуктов коррозии и подкисление среды [9] приводит в области максимальных напряжений к наводороживанию металла.

После длительной выдержки в коррозионной среде образцы из труб малой кривизны были покрыты сетью многочисленных коррозионных повреждений (рис. 11).

Стресс-коррозионные повреждения образуют питтингоподобные дефекты на поверхности трубы. Зародившиеся стресс-коррозионные трещины характеризуются значительным превышением поверхностного размера над поперечным и ориентированы нормально к действующим растягивающим напряжениям. В процессе развития трещин отношение полуосей эллипса меняется в зависимости от размера начального дефекта, поэтому важной задачей исследования

является изучение скорости распространения и кинетики формоизменения трещины.

Возрастание уровня действующих в вершине трещины напряжений является причиной того, что на дне концентратора зарождаются другие микротрещины. Процесс роста стресс-коррозионных трещин сопровождается объединением близко расположенных трещин до тех пор, пока размер лидирующей трещины не достигнет критической величины. Это приводит к остановке роста части стресс-коррозионных трещин и уменьшению количества развивающихся трещин.

Для ускорения процесса развития зародившихся стресс-коррозионных трещин используется циклическое нагружение. Анализ фактического материала свидетельствует о том, что возбуждение слабых колебаний в рыхлых водонасыщенных грунтах усиливает механохимические реакции и ускоряет процессы развития стресс-коррозионных трещин. Центральным узлом вибрационных колебаний от долей до сотен герц являются компрессорные станции (КС), представляющие собой мощные гене-

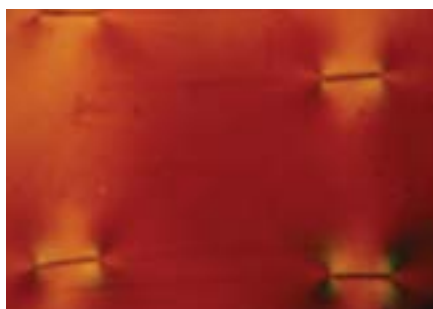
раторы вибрации для магистральных газопроводов.

При сближении растущих трещин взаимное влияние усиливается, и при достижении коэффициента интенсивности напряжений критического значения в зоне предразрушения происходит образование дислокационной микротрещины, которая движется навстречу развивающейся стресс-коррозионной трещине последовательными скачками. Степень взаимного влияния трещиноподобных дефектов, нанесенных на оптически чувствительном материале, в зависимости от расстояния между дефектами, в условиях двухосного напряженного состояния –

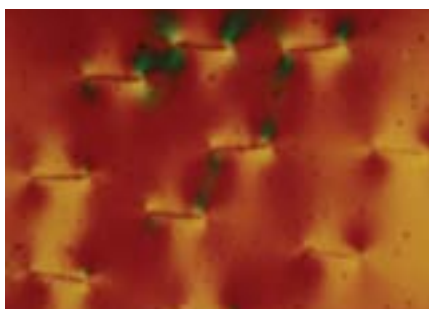
$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 2$$

приведена на рисунке 12.

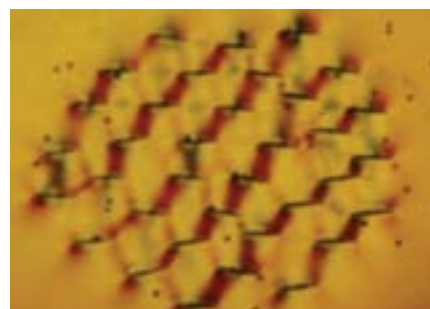
Число зародившихся трещин в стали X70 на единицу площади значительно превосходит число трещин в стали X46. Зародившиеся стресс-коррозионные трещины расположены на близком расстоянии друг от друга и достигают значений от 0,3 до 1 мм, т.е. взаимное влияние растущих трещин способствует



а)



б)



в)

Рис. 12. Степень взаимного влияния нанесенных дефектов в зависимости от их расположения: а) влияния нет вследствие удаленности дефектов; б) частичное взаимное влияние дефектов; в) влияние полное, расстояние между дефектами менее 4 мм

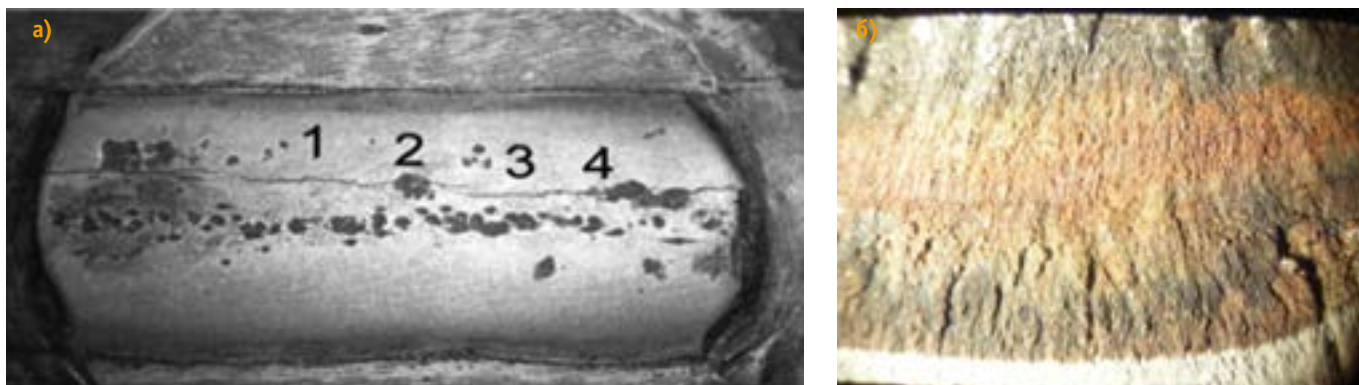


Рис. 13. Фрагмент развития стресс-коррозионных трещин в сварном соединении ст. Х70:
 а) сварной шов со стресс-коррозионными трещинами, б) зона роста трещин при циклическом нагружении

ускорению их слияния и образования трещин-лидеров.

Таким образом, близко расположенные стресс-коррозионные трещины в сталях Х46 и Х70 при циклическом нагружении способствуют образованию магистральных трещин и развитию их до критических размеров.

Стресс-коррозионные трещины более интенсивно проявляются в сварных швах (рис. 13).

В сварном шве скорость трещин по поверхности и толщине превосходит развитие их по основному металлу.

Анализ полученных стресс-коррозионных трещин в лабораторных условиях на сталях Х46, Х70 позволяет исследовать процесс их зарождения, определить оптимальные технологии, повышающие качество трубного листового проката и оценить опасность коррозионной среды.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что при оценке коррозионно-циклической трещиностойкости металла и сварных соединений труб необходимо учитывать двухосность нагружения, влияние коррозионной среды и наличие остаточных сварочных напряжений. Разработанная методика предусматривает проведение испытаний образцов моделей труб в условиях двухосного напряженного состояния, действия коррозионной среды, влияния упругой энергии сжатого газа, что способствует обоснованному подходу к выбору стали и технологии сварки труб ответственного назначения.

Литература:

1. Анучкин К.П., Горицкий В.Н., Мирошниченко Б.И. Трубы для магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1986.
2. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. – Л.: Машиностроение, 1969.

3. Гутер Р.С., Янпольский А.Р. Дифференциальные уравнения. – М.: Высшая школа, 1976.
4. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1970.
5. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1970.
6. Прочность, устойчивость, колебания / Под общ. ред. И.А. Бергера и Я.Г. Пановка. – М.: Машиностроение, 1968.
7. Алимов С.В., Долгов И.А., Горчаков В.А., Сурков А.Ю., Сурков Ю.П., Рыбалко В.Т. Диагностика коррозионного растрескивания. – Екатеринбург, 2004.
8. Панасюк В.В., Саврук М.П., Дацышин А.П. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках. – Киев: Наукова думка, 1976.
9. Маричев В.А. Современные представления о водородном охрупчивании при замедленном разрушении // Защита металлов. – 1980. – № 5.
10. Стеклов О.И. Мониторинг и защита конструкции повышенной опасности в условиях их старения и коррозии // Защита металлов. – 1999. – Т. 35. – № 4. – С. 1–5.
11. Бокштейн Б.С., Копецкий Ч.В. Термодинамика и кинетика границ зерен в металлах. – М.: Металлургия, 1986.

Anticorrosive protection

O.I. Steklov, Doctor of Engineering, professor of Gubkin Russian State University of Oil and Gas; **K.M. Dzioyev**, Vice President of Stroygazconsulting LLC; **K.D. Basiyev**, Doctor of Engineering, professor; **I.D. Muzayev**, Doctor of Engineering, professor, SpetsRemDagnostika LLC

Corrosion and stress-corrosion damage to main gas pipelines including the pumped gas elastic energy impact

The methodology to evaluate the tendency of pipe steels and welded joints for corrosion and stress-corrosion cracks initiation and propagation has been developed. Kinetics of single surface cracks propagation in the air and corrosive environment with cyclic load has been studied. Cracks hazard is based on information on their size, growth rate and interference of two and more cracks during their propagation process. The results obtained enable forecasting the cracks hazard level and determining the faulty pipe safety margin.

Keywords: corrosion, stress corrosion, main gas pipelines, stress state, welded joints, elastic energy, surface cracks.

References:

1. Anuchkin K.P., Goritskiy V.N., Miroshnichenko B.I. Truby dlya magistral'nykh truboprovodov (Pipes for main pipelines). – Moscow: Nedra, 1986.
2. Povkh I.L. Tekhnicheskaya gidromekhanika (Technical hydromechanics). – L.: Mashinostroyeniye, 1969.
3. Guter R.S., Yanpolskiy A.R. Differentsial'nye uravneniya (Differential equations). – Moscow: Vysshaya Shkola, 1976.
4. Cherepanov G.P. Mekhanika khрупкого razrusheniya (Mechanics of brittle fracture). – Moscow: Nauka, 1970.
5. Rabotnov Yu.V. Mekhanika deformiruемого tverdogo tela (Mechanics of the deformable solid body). – Moscow: Nauka, 1970.
6. Prochnost', ustoychivost', kolebaniya (Strength, stability, vibrations) / Under the general editorship of I.A. Berger and Ya.G. Panovk. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1968.
7. Alimov S.V., Dolgov I.A., Gorchakov V.A., Surkov A.Yu., Surkov Yu.P., Rybalko V.T. Diagnostika korrozionnogo rastreskivaniya (Diagnostics of corrosion cracking). – Yekaterinburg, 2004.
8. Panasyuk V.V., Savruk M.P., Datsyshin A.P. Raspredelenie napryazheniy okolo tretshin v plastinakh i obolochkakh (Stress distribution near cracks in plates and enclosures). – Kiev: Naukova dumka, 1976.
9. Marichev V.A. Sovremennye predstavleniya o vodorodnom okhrupchivanii pri zamedlennom razrushenii (Contemporary perceptions of hydrogen embrittlement during the delayed fracture) // Metals protection. – 1980. – No. 5.
10. Steklov O.I. Monitoring i zatshita konstruksii povyshennoi opasnosti v usloviyakh ikh stareniya i korrozii (Monitoring and protection of hazardous structures in condition of their ageing and corrosion) // Metals protection. – 1999. – Т. 35. – No. 4. – P. 1–5.
11. Bokshstein B.S., Kopetskiy Ch.V. Termodinamika i kinetika granits zeren v metallakh (Thermodynamics and kinetics of grain boundaries in metals). – Moscow: Metallurgiya, 1986.