

КИНЕТИКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН В КОНСТРУКЦИОННЫХ  
ЭЛЕМЕНТАХ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫНарине Виликовна Пирумян<sup>1</sup>, Мигран Григорьевич Стакян<sup>2\*</sup>, Ангин Викторовна Мартиросян<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный университет архитектуры и строительства Армении, г. Ереван, РА<sup>2</sup>Национальный политехнический университет Армении, г. Ереван, РА

\*stakyan.mihran@yandex.ru

Рассмотрена кинетика возникновения и развития коррозионно-усталостных повреждений элементов конструкций газотранспортной системы (ГТС) работающей под комплексным воздействием внешних факторов с их различным числом и сочетаниями. Учитывая расположение ГТС на открытой местности и цикличность действия внешних факторов, преобладающим видом суммарного нагружения трубопроводов является односторонний переменный изгиб, который вызывает коррозионно-усталостные повреждения по периметру поперечного кольцевого сечения труб. При этом значительный срок службы и круглосуточный режим работы трубопроводов, помимо обеспечения их усталостной прочности, также требует выполнения расчетов на трещиностойкость труб. Изучены расчетные схемы трещиностойкости и выбрано уравнение коэффициента интенсивности напряжений  $K_{fc}$ . Показано, что данная функция дает достоверные результаты при статическом и малоцикловом нагружении трубопроводов, а при многоцикловом нагружении с учетом кинетики развития усталостных трещин, приводящей к изменению параметров, форм и расположения площади долома, использование данного уравнения становится условным, требующим его коррекции с учетом вариаций максимальных напряжений  $\sigma_{pmax}$ , глубины распространения трещины  $a_{fc}$ , а также геометрических параметров и форм усталостного долома. Получена новая функция, позволяющая уточнить значения  $K_{fc}$  и определить эквивалентную долговечность  $N_3$  конструкции с учетом наличия усталостной трещины  $a_{fc}$  и дать количественную оценку процесса усталостного разрушения элементов конструкции ГТС.

**Ключевые слова:** газотранспортная система (ГТС), магистральный газопровод, сварной шов трубопровода, коэффициент интенсивности напряжений, фрактографический анализ, трещиностойкость шва, кольцевая трещина

**Введение**

Одной из актуальных проблем разработки и эксплуатации современных газотранспортных систем (ГТС) является повышение долговечности элементов конструкций по критериям прочности при одновременном снижении их металлоемкости. Непрерывное увеличение объемов подачи газа, производительности и других параметров ГТС, а также роста напряженности элементов приводят к тому, что указанную проблему можно решить лишь при использовании в расчетно-конструкторских разработках ГТС достижений науки о прочности и трещиностойкости [1, 2]. Для элементов и конструкций ГТС в экстремальных условиях нагружения традиционно применяемые в инженерной практике расчеты на прочность для определения номинальных и местных напряжений оказываются

недостаточными. Поэтому запасы прочности и долговечности в рамках проверочных расчетов устанавливаются на базе деформационных критериев разрушения, т.е. по предельным нагрузкам, местным упруго-пластическим деформациям, коэффициентам интенсивности напряжений (КИН) и деформаций (КИД), а также по размерам дефектов типа трещин. Это позволяет проводить количественный анализ эффективности применения конструкционных материалов с различными статическими свойствами для конструкций, работающих в широком диапазоне нагрузок, температур и скоростей деформирования [3-6]. При этом используют характеристики механических свойств, в которых учтено влияние основных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, а также дефектов типа трещин [3, 4]. При наличии резкой концентрации напряжений и дефектов на ранних стадиях эксплуатации могут возникнуть усталостные трещины, поэтому большое значение имеет проблема оценки долговечности элементов в условиях эксплуатации на стадии развития трещины, т.е. от момента появления первой макроскопической трещины длиной 0,2...0,5 мм до окончательного разрушения.

Целью работы является классификация усталостных отказов тонкостенных стальных труб большого диаметра и совершенствование расчетов на несущую способность трубопроводов ГТС, используя принцип трещиностойкости элементов конструкции, который уточняет остаточную циклическую долговечность с повреждениями. Для достижения этой цели необходимо: классифицировать действующие на ГТС внешние факторы; выявить вид и характер циклического нагружения конструкции ГТС, исходя из расположения трубопроводов на открытой местности, а также от природного и антропогенного воздействий; разработать расчетную схему для определения реальной несущей способности ГТС, включая метод трещиностойкости элементов конструкций трубопроводов.

### Материалы и методы

В работе рассмотрены характерные случаи отказов конструкций ГТС и дан фрактографический анализ усталостных разрушений на разных уровнях перенапряжений.

Большой интерес представляют изучение и систематизация особенностей строения изломов, присущих основным видам циклического нагружения при различных случаях напряженного состояния [6, 7]. Введение значений КИН  $K_{fc}$  позволяет количественно и качественно судить о закономерностях роста трещины при циклическом нагружении, т.к. рост трещин усталости происходит на фоне упруго-пластических деформаций, когда справедливы критерии механики разрушения. Для элементов цилиндрической формы вязкость разрушения определяется согласно зависимости Париса [8], которая является общей в механике разрушения

$$K_{fc} = A\sigma^{b_p} \sqrt{\pi a_{fc}}, \quad (1)$$

где  $\sigma^{b_p}$  - амплитуда действующих напряжений для сечения "брутто";  $a_{fc}$  - критическая глубина кольцевой трещины, определяемая фрактографическим анализом;  $A \approx 1,12$  - коэффициент, зависящий от формы трещины.

При испытаниях на малоцикловую или ограниченную усталость ( $N = 10^3 \dots 10^5$  циклов), характеризующихся меньшими значениями  $a_f$  и практически не меняющимся моментом сопротивления опасного сечения элемента, использование зависимости (1) в методическом плане оправдано. Однако особенности развития усталостной трещины на разных уровнях циклических перенапряжений  $\sigma_{P \max}$ ,

сложная конфигурация и вариация расположения зоны долома приводят к изменению значений  $\sigma^{br}$  и  $a_f$ , следовательно, к приближенному определению величины  $K_{fc}$ . Для неподвижных надземных трубопроводов, установленных на опорах, характер и вид нагружения разнообразны – периодическое изменение давления газа, воздействия разнотипных вибраций и весовых нагрузок, изменения опорных реакций от человеческой деятельности и геологических явлений, а также солнечное излучение, влажность, атмосферные осадки и сезонные изменения температуры окружающей среды, которые в стенках труб вызывают плоское напряженное состояние от переменного одностороннего изгиба, растяжения и сжатия, в итоге создают нестационарный режим нагружения.

Используя данные [7], можно считать, что при одностороннем циклическом изгибе деталей со сплошным поперечным сечением, развитие усталостной трещины при высоких перенапряжениях приводит к концентричному сужению “живого” сечения и образованию почти симметричной зоны долома (рис. 1а), а при низких перенапряжениях - к несимметричному сужению и образованию эллиптической зоны долома (рис. 1б) [9], а также для тонкостенных трубопроводов ГТС (рис. 1в).

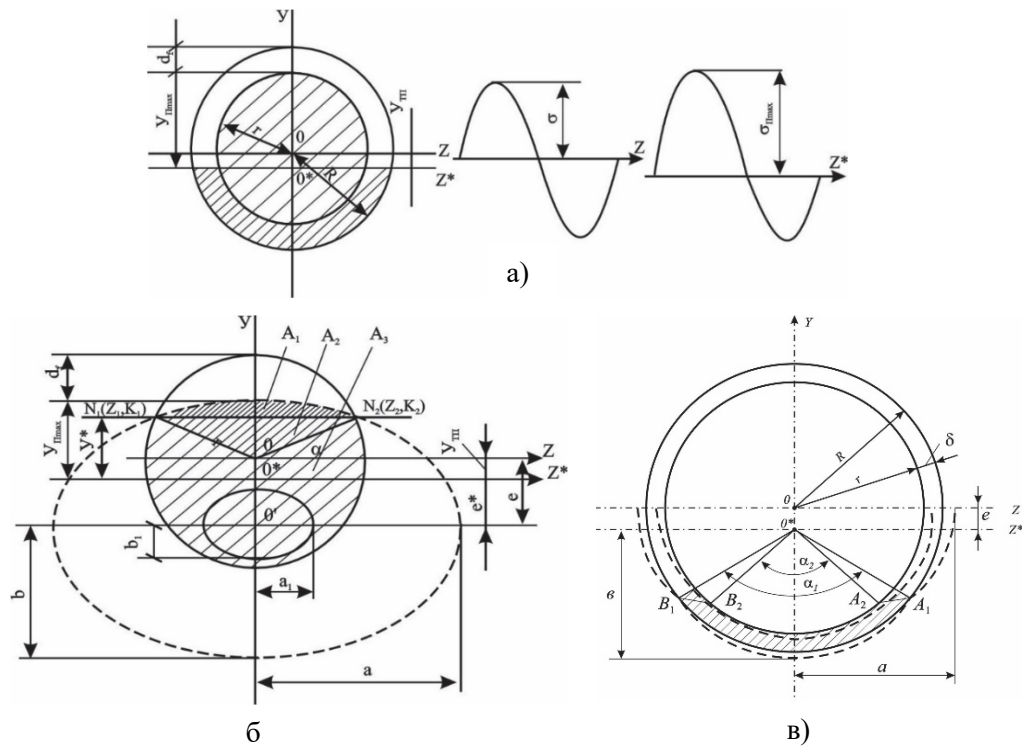


Рис. 1. Расчетная схема развития кольцевой трещины: а - при симметричном доломе; б, в - при несимметричном доломе

Напряженно-деформированное состояние зоны сварных швов при воздействии указанных факторов в условиях многоциклового усталости приводит к нарушению начального расположения труб, вызывая смещение центров тяжести начального и деформированного поперечных сечений, появление эксцентриситета, изменения геометрических форм и параметров кольцевого сечения труб от цилиндрического к эллиптическому. Этим же обусловлено преимущественное возникновение и развитие усталостных трещин в нижнем сегменте поперечного сечения труб (рис. 1в) [9], приводящих к усталостному разрушению сварных швов при определенных значениях максимальных циклических напряжений  $\sigma_{Pmax}$ , предельными значениями которых согласно уравнению усталости  $\sigma_{Pmax}^m N_{max} = C$

можно определить циклическую долговечность  $N_{\max}$ , следовательно уточнить срок службы элемента конструкции. Усталостный излом тонкостенной кольцевой трубы имеет вид, представленной на рис. 1в (заштрихованная часть соответствует разрушенному сегменту сечения), а максимальное растягивающее напряжение в незамкнутом тонкостенном кольце определяется согласно [10]

$$\sigma_{P_{\max}} = My_{p_{\max}}/I_z, \quad (2)$$

где  $M$  - суммарный изгибающий момент;  $y_{p_{\max}} = R + e$ , а остаточный момент инерции -

$$I_z = \frac{\delta \bar{r}^3}{2} \left( \bar{\beta} + \sin \bar{\beta} - \frac{4 \sin^2 \bar{\beta}/2}{\bar{\beta}} \right) = \frac{(R^2 - r^2)(R + r)^2}{32} \left( \bar{\beta} + \sin \bar{\beta} - \frac{2 \sin^2 \bar{\beta}/2}{\bar{\beta}} \right),$$

$$\bar{\beta} = (\beta_1 + \beta_2)/2, \quad \beta_1 = 360^\circ - \alpha_1, \quad \beta_2 = 360^\circ - \alpha_2.$$

Значения  $y_{p_{\max}}$ ,  $I_z$  и, следовательно,  $\sigma_{P_{\max}}$  с момента появления микротрещины до окончательного разрушения непрерывно варьируют, т.е.  $y_{p_{\max}}$ ,  $I_z$ ,  $\sigma_{P_{\max}} = f_{1,2,3}(a_f)$  [11, 12]. Эллиптическое расположение трещины относительно круглого сечения, характеризуемое точками  $A_1(z_1; y_1)$ ,  $A_2(z_2; y_2)$  и  $B_1(z_3; y_1)$ ,  $B_2(z_4; y_2)$  (рис. 1в), можно определить путем совместного решения уравнения системы

$$\begin{cases} z^2 + (y - e)^2 = R^2, \\ (z/a)^2 + (y/b)^2 = 1, \end{cases} \quad (3)$$

где  $e$  - эксцентриситет, а значения полуосей эллипса  $a, b$  долома можно выразить, исходя из условия подобия концентрично сужающейся эллиптической трещины. Для выполнения вычислительных процедур согласно (1)-(3) использованы результаты испытаний на усталость (образцы с  $d = 20$  мм из стали 45 в нормализованном состоянии:  $\sigma_B = 670$  МПа,  $\sigma_T = 420$  МПа,  $\sigma_{-1K} = 152$  МПа) [11]. Согласно результатам фрактографического анализа [11], расчетно-аналитическим методом скорректированы значения коэффициента  $A$  в (1). Затем шаговым методом, начиная со значения  $a_f = 0$ , через каждые  $\Delta a_f = 10^{-1}$  мм определены значения  $y_{p_{\max}}$ ,  $I_z$  и  $\sigma_{P_{\max}}$  до окончательного разрушения и построены графики кривых  $y_{p_{\max}}$ ,  $I_z$ ,  $\sigma_{P_{\max}} = f_{1,2,3}(a_f)$  (рис. 2).

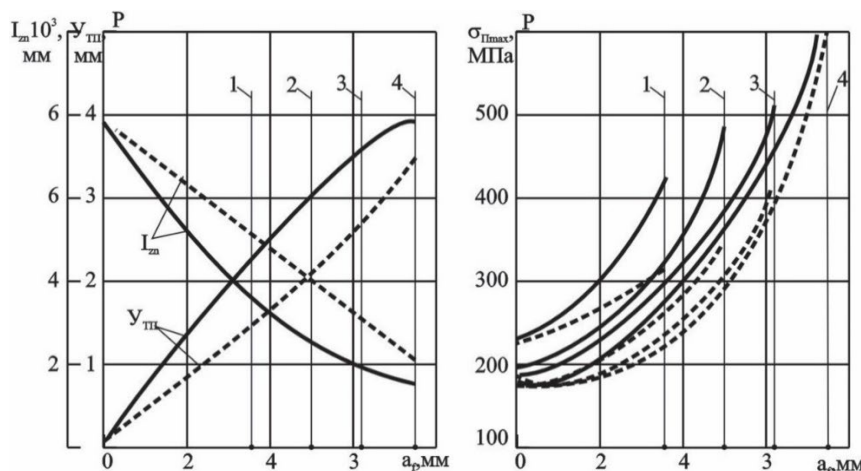


Рис. 2. Зависимости  $y_p = f_1(a_f)$ ,  $I_z = f_2(a_f)$  и  $\sigma_{P_{\max}} = f_3(a_f)$ : — - симметричный долом, - - - - асимметричный долом. Уровни 1, 2, 3 и 4 соответствуют критической глубине кольцевой трещины  $a_{fc}$  при  $\sigma^{op} = 240, 180$  и  $160$  МПа

Изменения геометрических характеристик сечения менее благоприятны для случая симметричного долома, где эффект смыкания трещины проявляется в меньшей степени, чем для второго случая. При асимметричном доломе закон изменения  $y_{p\max}$  и  $I_z$  близок к прямолинейному и лишь при больших значениях  $a_f$  наблюдается сближение рассмотренных величин. Это и предопределяет характер изменения напряжений  $\sigma_{P\max}$  в зависимости от глубины кольцевой трещины.

### Результаты и обсуждение

Экспериментальные исследования, посвященные изучению возникновения и роста трещин при различных режимах нагружения [12, 13] позволили весь процесс разделить на этапы:

- I. *Инкубационный* – за счет роста плотности дислокаций, неблагоприятно соориентированных к нагрузке, происходит накопление микропластичных деформаций, что приводит к внутрикристаллическому упрочнению и повышению напряженности в микрообъемах;
- II. *Нарушение сплошности материала* – усиливается процесс накопления дислокаций и образования вакансий, появляются первые микронадрывы и субмикротрещины, перераспределяющие остаточные напряжения. Начинается процесс разупрочнения материала;
- III. *Стабильный рост микротрещин* – происходит интенсивное накопление вакансий в субмикротрещинах и появляются первые микротрещины;
- IV. *Окончательное разрушение* – протекает очень быстро, появляются макротрещины, что приводит к хрупкому разрушению оставшегося “живого” сечения.

Поверхностные слои изломов из-за контактного смыкания берегов микро- и макротрещин в процессе периодического нагружения подвергаются поверхностному упруго-пластическому упрочнению, степень которого зависит от уровня циклических перенапряжений  $\sigma_p$ , длительностью циклов нагружения  $N$ , а также расположения исследуемого участка в зонах вязкого и хрупкого разрушений. На микроуровне аналогичные явления происходят также на вершине микротрещины от воздействия микропластических деформаций.

Развитие экспериментальных методов оценки циклической трещиностойкости и выявления закономерностей развития усталостных трещин позволяют разработать критерии выбора материалов и конструктивно-технологических вариантов, обеспечивающих наибольшую надежность и долговечность при наименьшей металлоемкости [4, 6].

В случае растяжения плоскости со сквозной трещиной длины  $2\ell$  КИН определяется по формуле [1]

$$K_\ell = \sigma\sqrt{\pi\ell}. \quad (4)$$

В общем случае КИН зависит не только от приложенных к телу напряжений  $\sigma$  и длины трещины, но также является функцией геометрии тела и схемы его нагружения [3]:

$$K_\ell = \sigma\sqrt{\pi\ell}Y(\ell/B), \quad (5)$$

где  $Y(\ell/B)$  – поправка на геометрию и схему нагружения,  $B$  – характерный размер поперечного сечения тела.

В механике усталостного разрушения параметрами разрушения, характеризующими напряженно-деформированное состояние у вершины трещины упругого тела и контролирующими закономерности ее роста, служат КИН и коэффициент асимметрии цикла нагружения  $R = K_{\min}/K_{\max}$ . Параметр

механики разрушения  $K$  учитывает величину и способ приложения нагрузки, форму и размеры образца и трещины. Для анализа закономерностей усталостного разрушения на стадии роста трещины вполне достаточно использовать зависимость ее скорости  $d\ell/dN$  от размаха  $\Delta K = (1-R)K_{\max}$  (или максимального значения  $K_{\max}$ ) КИН

$$\frac{d\ell}{dN} = V = f(K_{\max}, K_{\min}/K_{\max}, C, m), \tag{6}$$

где  $C$  и  $m$  - некоторые константы.

Графически уравнение (6) представляется кинетической диаграммой усталостного разрушения (КДУР). Типичная базовая КДУР (рис. 3), построенная в логарифмических координатах, ограничивается пороговым КИН ( $K_{th}$  или  $\Delta K_{th}$ ), ниже которого трещина не растет, и критическим  $K_{fc}$  КИН цикла, при достижении которого наступает долом образца. На практике определяют условное значение порогового КИН  $K_{th}$ , соответствующее базисной скорости роста усталостной трещины  $V_{th}$ , равной  $10^{-10}$  м/цикл. Условно КДУР можно представить в виде: среднего участка 2, аппроксимируемого прямой, и крайних криволинейных участков низких (обычно меньше  $10^{-8}$  м/цикл – участок 1) и высоких (обычно больше  $10^{-6}$  м/цикл - участок 3) скоростей роста усталостной трещины [3].

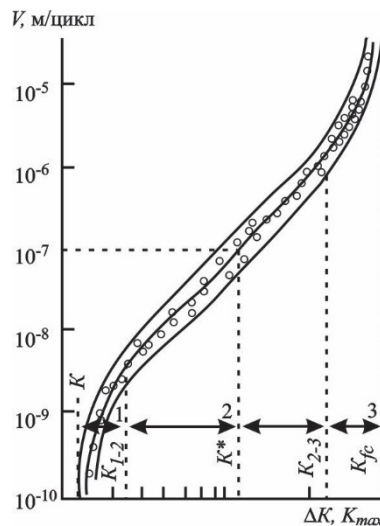


Рис. 3. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения

Аналитическую зависимость (6) можно представить в виде различных вариантов элементарных и специальных функций, которые будут хорошо описывать КДУР в диапазоне  $K_{th} \leq K_{1\max} \leq K_{fc}$ . Средний участок КДУР может быть аппроксимирован уравнением

$$V = V^* \left( \frac{K_{\max}}{K^*} \right) = V^* \left( \frac{\Delta K}{\Delta K^*} \right)^m, \tag{7}$$

где  $K^*(\Delta K^*)$ ,  $m$  - параметры аппроксимации,  $V = 10^{-7}$  м/цикл. Формулу (7) обычно представляют в виде

$$V = CK_{\max}^m = C'\Delta K^m, \tag{8}$$

где характеристики  $K^*(\Delta K^*)$  определяются через коэффициент  $C, C'$  по формулам

$$K^* = (V^*/C)^{1/m}, \quad \Delta K^* = (V^*/C')^{1/m}.$$

Для учета влияния характеристик циклической трещиностойкости  $K_{th}$  и  $K_{fc}$  на закономерности распространения усталостной трещины на всех трех участках КДУР можно использовать уравнение Прандтля [1, 2 ]:

$$\frac{d\ell}{dN} = C \left( \frac{\Delta K - \Delta K_{th}}{K_{fc} - K_{max}} \right)^m \quad (9)$$

Расчет циклической долговечности конструкций при наличии распространяющихся усталостных трещин, т.е. число циклов  $N$  до разрушения, рассчитывают посредством интегрирования уравнения роста трещины по длине трещины [3]:

$$N = \int_{\ell_0}^{\ell_c} \frac{d\ell}{f(K_{max}, K_{min}/K_{max}, C, m)}, \quad (10)$$

где  $\ell_0$  и  $\ell_c$  - соответственно, начальная и критическая длины трещины. В частности, для среднеамплитудного участка интегрирование уравнения (8) дает следующее выражение для долговечности:

$$N = \frac{2}{(m-2)C'M^{m/2}\Delta\sigma^m} \left[ \frac{1}{\ell_0^{(m-2)/2}} - \frac{1}{\ell_c^{(m-2)/2}} \right], \quad (11)$$

где  $M$  - поправочная функция на геометрию тела и форму трещины в обобщенном соотношении для размаха КИН вида  $\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{M\ell}$ ,  $\Delta\sigma$  - размах приложенного напряжения за один цикл.

При оценке долговечности и кривой распространения усталостной трещины  $\ell(N)$  целесообразна следующая последовательность расчета:

- методами дефектоскопического контроля установить ориентацию и размеры дефекта  $\ell_0$ , выбрать расчетную схему, для которой подобрать приемлемую формулу КИН;
- установить эксплуатационные режимы нагружения  $\sigma_{max}$ ,  $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ ,  $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ , по которым для принятой расчетной схемы рассчитать параметры цикла нагружения  $K_{max}$ ,  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ ,  $R = K_{min}/K_{max}$ ;
- для данного конструкционного материала, асимметрии цикла и частоты нагружения экспериментально определить (или воспользоваться справочной литературой) параметры КДУР  $\Delta K_{th}(K_{th})$ ,  $\Delta K_{fc}(K_{fc})$ ,  $C$ ,  $m$  и уравнение роста усталостной трещины;
- для принятой расчетной схемы и эксплуатационного режима нагружения по пороговому КИН  $\Delta K_{th}(K_{th})$  и циклической трещиностойкости  $K_{fc}$  установить размеры нераспространяющейся  $\ell_{th}$  и критической  $\ell_c$  трещин, соответственно;
- подставляя установленное выражение для КИН при заданном эксплуатационном режиме нагружения в уравнение скорости роста трещины и интегрируя его, определить зависимость размера распространяющейся усталостной трещины  $\ell$  от числа нагружения  $N$ ;
- рассчитать циклическую долговечность по формуле (10).

### Заключение

Предложенные расчетные схемы позволяют, учитывая реальные условия нагружения, вид напряженно-деформированного состояния, кинетику развития трещин и вероятностные представления процесса усталостного разрушения, рассчитать и прогнозировать остаточный ресурс деталей с эксплуатационными трещинами. Совмещение расчетов с фрактографическим анализом позволит решить обратную задачу - воссоздать предысторию периодического нагружения, что весьма важно при экспертизе случаев поломок ответственных деталей и узлов машин. Результаты работы могут быть использованы по следующим направлениям: а) вводом в процессах техобслуживания обязательного мониторинга технического состояния тяжелонагруженных элементов конструкции, а при необходимости – проведения текущего ремонта или замены поврежденной детали; б) в случае состоявшегося разрушения – проведение технической диагностики причин разрушения и количественная оценка действующих факторов с использованием базы данных указанных регрессионных уравнений. Второе направление представляет практический интерес для работников производственной сферы и также для специалистов структур по чрезвычайным ситуациям.

### Список литературы

- [1] **С.В. Серенсен**, Квазистатическое и усталостное разрушение материалов и элементов конструкций, Избр.тр.; Т.3, Наукова думка, Киев, 1985, 232с.
- [2] **В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков**, Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: справочник, Машиностроение, Москва, 1985, 224 с.
- [3] **Ю.Г. Матвиенко**, Модели и критерии механики разрушения, Физматлит, Москва, 2006, 328 с.
- [4] **В.В. Селиванов**, Механика разрушения деформированного тела, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2006, 424 с.
- [5] **С.А. Куркин**, Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением, Машиностроение, Москва, 1986, 184 с.
- [6] **В.К. Согомонян**, Классификация и диагностика усталостных изломов при переменном сложном нагружении, Сб. науч. тр.: Вестник НПУА, Ч.II, Изд-во НПУА, Ереван, 2015, 311-318.
- [7] **М.Г. Стакян, С.А. Гаспарян**, О строении типичных усталостных изломов деталей машин, Изв. АНАрм ССР. Сер. ТН 27(6) (1974) 10-14.
- [8] **В.Т. Трощенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко**, Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении, Наукова думка, Киев, 1997, 256 с.
- [9] **М.Г. Стакян, Н.В. Пирумян, А.В. Мартиросян**, Фрактографический анализ тяжелонагруженных элементов конструкций газотранспортных систем, Научные труды НУАСА 1(85) (2023) 144-152.
- [10] **Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев**, Справочник по сопротивлению материалов, Наукова думка, Киев, 1995, 704с.
- [11] **М.Г. Стакян, А.К. Погосян**, Расчетная оценка трещиностойкости валов на основе физических методов возникновения и роста усталостных трещин, ФХММ 7 (6) (1991) 45-54.
- [12] **Н.С. Исаханян, Ю.П. Шагаев**, Об измерениях микротвердости в зоне усталостного излома, Заводская лаборатория 11 (1990) 91-94.
- [13] **В.К. Согомонян**, Диагностика усталостных повреждений валов измерениями микротвердостей поверхностных слоев изломов, Сб. Междунар. н.-т. конф. Моск. автомоб.-дор. техн. ун-та (МАДИ): “Детали машин и теория механизмов”, 3 февр. 2015г., Москва –Уфа, Аэтерна, 2015, 43-47.

ՃԱՔԱԳՈՅԱՑՄԱՆ ԵՎ ԶԱՐԳԱՑՄԱՆ ԿԻՆԵՏԻԿԱՆ ԳԱԶԱՏՐԱՆՍՊՈՐՏԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ  
ԿՈՆՍՏՐՈՒԿՑԻՈՆ ՏԱՐԲԵՐՈՒՄ

Նարինե Վիլիկի Փիրույան<sup>1</sup>, Միհրան Գրիգորի Ստակյան<sup>2</sup>, Անգին Վիկտորի Մարտիրոսյան<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ճարտարապետության և շինարարության Հայաստանի ազգային համալսարան, ք. Երևան, ՀՀ

<sup>2</sup>Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան, ք. Երևան, ՀՀ

\*stakyan.mihran@yandex.ru

Դիտարկված է կոռոզիոն-հոգնածային վնասվածքների առաջացման և զարգացման կինե-տիկան գազատրանսպորտային համակարգի (ԳՏՀ) կոնստրուկցիայի տարրերում, որն աշխատում է արտաքին գործոնների տարբեր քանակի և զուգորդմամբ ազդեցության պայմաններում: Հաշվի առնելով ԳՏՀ-ի տեղակայումը բաց տեղանքում և արտաքին գործոնների ցիկլային ազդեցությունը՝ խողովակաշարերում գումարային բեռնվածության առավելագույն տեսակը միակողմ փոփոխական ծռումն է, որն առաջացնում է կոռոզիոն-հոգնածային վնասվածքներ խողովակների լայնական կտրվածքի եզրագծով: Խողովակաշարերի ծառայության զգալի ժամկետները և շուրջօրյա աշխատանքային ռեժիմը, բացի հոգնածային ամրության ապահովումից, պահանջում է նաև կատարել խողովակների ճաքակայունության հաշվարկներ: Ուսումնասիրված են ճաքակայունության հաշվարկային սխեմաները և ընտրված է լարումների ինտենսիվության  $K_{fc}$  գործակցի հավասարումը: Ցույց է տրված, որ սովյալ ֆունկցիան տալիս է հավաստի արդյունքներ խողովակաշարերի ստատիկական և սակավացիկլային բեռնվածությունների դեպքերում, իսկ բազմացիկլային բեռնվածքներում, հոգնածային ճաքերի զարգացման պայմաններում, որոնք հանգեցնում են վերջնակոտրվածքի պարամետրերի, ձևի և մակերևույթի տեղաբաշխման փոփոխությանը, սովյալ հավասարման օգտագործումը պայմանական է դառնում և պահանջում է դրա ճշտումը  $\sigma_{pmax}$  առավելագույն լարման փոփոխականության,  $a_{fc}$  ճաքերի խորքային դասավորվածության՝ հոգնածային վերջնակոտրվածքի երկրաչափական պարամետրերի և ձևի հաշվամամբ: Ստացվել է նոր ֆունկցիա, որը թույլ է տալիս ճշտել  $K_{fc}$ -ի արժեքները և որոշել կոնստրուկցիայի  $N$ , էկվիվալենտ երկարակեցությունը  $a_{fc}$  հոգնածային ճաքի առկայության դեպքում և սալ ԳՏՀ-ի կոնստրուկտիվ տարրերի հոգնածային քայքայման գործընթացի քանակական գնահատականը:

**Բանալի բառեր.** գազատրանսպորտային համակարգ (ԳՏՀ), մայրուղային գազատար, խողովակաշարի եռակցման կար, լարումների ինտենսիվության գործակցից, կոտրվածքաբանական վերլուծություն, կարի ճաքակայունություն, օղակաձև ճաք

## FRACTURE INITIATION AND GROWTH KINETICS IN STRUCTURE ELEMENTS OF GAS TRANSPORT SYSTEMS

**Narine Pirumyan<sup>1</sup>, Mihran Stakyan<sup>2\*</sup>, Angin Martirosyan<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>National University of Architecture and Construction of Armenia, Yerevan, RA,

<sup>2</sup>National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, RA

\*stakyan.mihran@yandex.ru

*The kinetics of the appearance and development of structural elements corrosion fatigue damages of Gas transmission system (GTS) operating under the complex influence of external factors with their various numbers and combinations, is considered. Taking into account the location of the GTS in an open area and the cyclical nature of the action of external factors, the dominant type of overall loading of pipelines is one-sided variable bending, which causes corrosion and fatigue damage along the perimeter of the transverse annular section of pipes. Herewith, a significant service life and round-the-clock operation of pipelines, in addition to ensuring their fatigue strength, also requires calculations for the crack resistance of pipes. The calculated schemes of crack resistance are studied and the equation of the  $K_{fc}$  stress intensity coefficient is chosen. It is demonstrated that this function gives reliable results with static and low-cycle loading of pipelines, but during multi-cycle loading, taking into account the kinetics of fatigue crack development, which leads to a change in the parameters, as well shapes and location of the break area, the application of this equation becomes conditional, requiring its correction taking into account variations in  $\sigma_{pmax}$  maximum stresses,  $a_{fc}$  the depth of crack propagation, as well as geometric parameters and forms of fatigue break. A new function has been obtained that makes it possible to clarify the  $K_{fc}$  values and determine the  $N_s$  equivalent durability of the structure, taking into account the presence of a  $a_{fc}$  fatigue crack and give quantitative assessment the process of fatigue failure of the elements of the GTS structure.*

**Keywords:** Gas transmission system (GTS), main gas pipeline, pipeline weld, stress intensity coefficient, fractographic analysis, seam crack resistance, annular crack

**Փիրումյան Նարինե Վիլիկի, տ.գ.թ.** (ՀՀ, ք. Երևան) - ՃՇՀԱՀ, ավագ գիտաշխատող, (+374)77700901, pirumyan@gmail.com, **Ստակյան Միհրան Գրիգորի, տ.գ.դ., պրոֆեսոր** (ՀՀ, ք. Երևան) - ՀԱՊՀ, Մեխանիկայի և մեքենագիտության ամբիոն, (+374)10554362, (+374)33554560, stakyan.mihran@yandex.ru, **Մարտիրոսյան Անգին Վիկտորի, տ.գ.թ., դոցենտ** (ՀՀ, ք. Երևան) - ՃՇՀԱՀ, Մաթեմատիկայի, շինարարական մեխանիկայի և ֆիզիկայի դեպարտամենտ, (+374)94762396, angin84@mail.ru

**Пирумян Нарине Виликовна, к.т.н.** (РА, г. Ереван) - НУАСА, с.н.с, (+374)77700901, pirumyan@gmail.com, **Стакян Мигран Григорьевич, д.т.н., профессор** (РА, г. Ереван) - НПУА, кафедра Механики и машиностроения, (+374)10554362, (+374)33554560, stakyan.mihran@yandex.ru, **Мартиросян Ангин Викторовна, к.т.н., доц.** (РА, г. Ереван) - НУАСА, департамент Математики, строительной механики и физики, (+374)94762396, angin84@mail.ru

**Pirumyan Narine, doctor of philosoph (Ph.D) in Engineering**, (RA, Yerevan) - NUACA, Senior scientific researcher, (+374)77700901, pirumyan@gmail.com, **Stakyan Mihran, Doctor of Science (engineering), professor** (RA, Yerevan) - NPUA, Chair of Mechanics and Engineering, (+374)10554362, (+374)33554560, stakyan.mihran@yandex.ru, **Martirosyan Angin, doctor of philosoph (Ph.D) in Engineering, Associate Professor** (RA, Yerevan) - NUACA, Department of Mathematics, Structural Mechanics and Physics, (+374)94762396, angin84@mail.ru

Ներկայացվել է՝ 27.02.2024թ.

Գրախոսվել է՝ 23.01.2024թ.

Ընդունվել է տպագրության՝ 30.04.2024թ.