

<http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140303>

УДК 622.692.4

Г 75

ON THE CHANGE OF CYCLIC CRACK GROWTH OF CONTINUALLY EXPLOITED METAL OF MOVABLE PIPELINE

ОБ ИЗМЕНЕНИИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРОВАННОГО МЕТАЛЛА ПОДВИЖНОГО ТРУБОПРОВОДА

Roman S. Hrabovskyi

hrabovskyi.r@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3169-7088

Р. С. Грабовский,

д-р техн. наук, проф. каф. строит. механики

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, г. Ивано-Франковск

Abstract. It is shown that the mechanical characteristics (σ_B , $\sigma_{0.2}$) of the new (archival) and exploited (30 years) 10H2FB steel, defined during the tensile testing of cylindrical models, are changing slightly. It is known that the parameters of the fracture mechanics are most sensitive to the operational degradation of the structural steel properties. The estimation of the fatigue cracks growth characteristics in air for archival and operated metal (10H2FB steel) of the main gas pipeline is performed. It is established that the characteristics of the cyclic crack growth characterize the operational degradation properties of the pipeline metal better. This fact must be taken into account during the design and further operation of the movable pipes.

Keywords: movable pipeline, gas pipeline, stress intensity factor, characteristics of the cyclic crack growth, metal strain (deformation) ageing.

Аннотация. Для архивного и эксплуатируемого металла (сталь 10Г2ФБ) магистрального газопровода выполнена оценка характеристик сопротивления распространению усталостных трещин на воздухе. Установлено, что характеристики циклической трещиностойкости более полно характеризуют эксплуатационную деградацию свойств металла газопровода. Это факт необходимо учитывать при проектировании и дальнейшей эксплуатации подвижных трубопроводов.

Ключевые слова: подвижный трубопровод, газопровод, коэффициент интенсивности напряжений, характеристики циклической трещиностойкости, деформационное старение (деградация) металла.

Анотація. Для архівного та експлуатованого металу (сталь 10Г2ФБ) магістрального газопроводу здійснено оцінку характеристик опору поширенню втомних тріщин на повітрі. Установлено, що характеристики циклічної тріщиностійкості більш повно характеризують експлуатаційну деградацію властивостей металу газопроводу. Цей факт необхідно враховувати при проектуванні та подальшій експлуатації рухомих трубопроводів.

Ключові слова: рухомий трубопровід, газопровід, коефіцієнт інтенсивності напружень, характеристики циклічної тріщиностійкості, деформаційне старіння (деградація) металу.

REFERENCES

- [1] Votintsev A.V. Transportirovka szhatogo prirodnogo gaza [Compressed natural gas transportation]. *Gazovaya promyshlennost – Gas industry*, 2002, no. 2, pp. 62–63.
- [2] Nykyforchyn H.M. Dehradatsiia vlastyvoitei stalei mahistralnykh hazoprovodiv uprodovzh yikh sorokarichnoi ekspluatatsii [Degradation of steel properties of gas transmission pipelines over the period of 40 years of their exploitation]. *Problemy mitsnosti – Strength Problems*, 2009, no. 5, pp. 66–72.
- [3] Paton B.Ye., Kryzhanivskiy Ye.I., Savytskyi M.M., Shchvydkyi E.A., Zaitsev V.V., Mandryk O.M. *Sposib transportuvannya stysnutoho pryrodnoho hazu rukhomym truboprovodom* [Transportation method of compressed natural gas by movable pipeline]. Declaration utility model patent UA, no. u 67664, 2012.
- [4] Zaitsev V.V., Korobanov Yu.N. *Suda-gazovozy* [Gas carrier vessel]. Leningrad, Sudostroenie, 1990. 304 p.
- [5] Kryzhanivskiy Ye.I., Nykyforchyn H.M. *Koroziino-vodneva dehradatsiia naftovykh i hazovykh truboprovodiv ta ii zapobihannia* [Corrosion-hydrogen degradation of oil and gas pipelines and its prevention]. *Dehradatsiia hazoprovodiv ta ii zapobihannia* [Degradation of gas pipelines and its prevention]. Ivano-Frankivsk – Lviv, Ivano-Frankivskiy natsionalnyi tekhnichnyi universytet nafty i hazu Publ., 2012, vol. 3, 433 p.

- [6] Krasovskiy A.Ya., Oryniak I.V., Lokhman I.V. *Otsinka zalyshkovoho resursu truboprovodu, ushkodzhenoho stress-koroziiu* [Evaluation of residual life of pipeline, damaged by stress-corrosion]. *Truboprovodnyi transport – Pipeline transport*, 2011, issue 2 (68), pp. 18–21.
- [7] Romaniv O.N., Yarema S.Ya., Nikiforhin G.N. *Mekhanika razrusheniya i prochnost materialov* [Fracture mechanics]. *Tom 4: Ustalost i tsiklicheskaya treshchinostoykost konstruksionnykh materialov* [Volume 4: Materials fatigue and cyclic crack resistance]. Kyiv, Nauk. dumka Publ., 1990. 680 p.
- [8] *Mekhanika ruinuвання i mitsnist materialiv* [Fracture mechanics and materials strength]. *Tom 7: Nadinist ta dovhovichnist elementiv konstruksii teploenerhetychnoho ustatkuvannya* [Volume 7: Reliability and durability of structures elements of heat-power equipment]. Kyiv, Akademperiodyka Publ., 2005. 378 p.
- [9] Tsyurulnyk O.T., Hredil M.I., Student O.Z. *Otsiniuvannya robotozdatnosti stali 17H1S pislia tryvaloї ekspluatatsii na hazohoni* [Evaluation of work capacity of the 17H1S steel after the durable exploitation on the gas pipe line] *Visnyk Ternopil'skoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu* [Bulletin of Ternopil National Technical University], 2008, vol. 13, no. 4, pp. 49–55.
- [10] Petryna Yu.D. *Vplyv ekspluatatsiynykh chynnykiv naftohazoprovodiv na tsyklichnu trishchynostiikist stali 17HS* [Influence of the exploitation factors of oil and gas pipelines on the cyclic crack resistance of the 17HS steel]. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch – Investigations and development of oil and gas fields*, 2009, no. 3, pp. 54–58.
- [11] Grabovskiy R.S., Dmytrakh I.N., Pukas Ya.N. *Ustanovka dlya ispytaniy konstruksionnykh materialov na tsiklicheskuyu korrozionnuyu treshchinostoykost* [Testing machine of construction materials on the cyclic corrosion crack]. *Ден. ВИНТИ – Dep. VINITI*, 1989, no. 67–68, 8 p.
- [12] Fridman Ya. B. *Mekhanicheskie svoystva metallov. Mekhanicheskie ispytaniya. Konstruksionnaya prochnost* [Metals mechanical properties. Mechanical tests. Structural strength]. Moscow, Mashinostroenie Publ., p. 368.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Диверсификация путей поставок природного газа является приоритетной для страны. Она реализуется, во-первых, путем реверсных поставок газа, во-вторых, транспортированием морским путем как сжиженного газа (LNG), так и сжатого природного газа (CNG) [1, 3]. Отметим, что каждый из перечисленных способов поставок имеет свои преимущества и недостатки. Учитывая близость Украины к внешним источникам этого энергоносителя (Кавказ, Ближний Восток и Северная Африка), вариант транспортирования морским путем сжатого природного газа (CNG) можно считать наиболее приемлемым. Он реализуется путем использования судов-газовозов, оснащенных CNG-модулями, соединенными в подвижный трубопровод [4].

Элементы подвижного трубопровода в процессе транспортирования морским путем подвержены не только внутреннему давлению сжатого газа, но и воздействию целого ряда асимметричных усталостных нагрузок, как образующихся в процессе погрузочно-разгрузочных работ, так и обусловленных суточным изменением температуры.

Однако длительная эксплуатация таких судов, как показала практика использования подземных газопроводов, вызывает изменение механических свойств металла подвижного трубопровода [2, 6].

Влияние ряда факторов (частоты и асимметрии повторно-переменной нагруженности, рабочей среды, температурных напряжений и т. д.) на прочность газопроводных сталей изучается в трудах исследователей [5, 9, 10].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В работах [5, 6] рассматривался вопрос изменения механических характеристик (σ_r , σ_b), ударной вязкости (KCV), критических – раскрытия трещины (δ_c), J_c -интеграл и статической трещиностойкости (K_{Ic}) в процессе длительной эксплуатации. Отметим [6], что параметры механики разрушения (ΔK_{Ic} , ΔK_{Ih} , ΔK_{fc} , ΔK_{Ic}) наиболее чувствительны к эксплуатационной деградации металла газопроводных труб. Однако проблема влияния деформационного старения (деградации) металла на характеристики его циклической трещиностойкости (ΔK_r , ΔK_{Ih} , ΔK_{fc}) в этих публикациях не рассмотрены.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ – определение влияния механических характеристик прочности (σ_b , $\sigma_{0.2}$) и эксплуатационных асимметричных усталостных нагрузок на характеристики циклической трещиностойкости нового и эксплуатируемого металлов газопроводных труб, которые определяют уровень их деформационного старения.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В работе исследовали металл (сталь 10Г2ФБ) газопроводной трубы, эксплуатируемой при максимальном рабочем давлении газа $P = 7,5$ МПа. Механические характеристики новой (архивной) и эксплуатируемой (30 лет) стали 10Г2ФБ определялись по стандартной процедуре [12] испытаний цилиндрических образцов на растяжение. Их значения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Механические характеристики стали 10Г2ФБ

Сталь	σ_b , МПа	Δ , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	Δ	δ	Δ	ψ	Δ
				%				
Новая (архивная)	608,4	2,5	529,1	3,1	22,5	9,8	62,3	7,9
Эксплуатируемая	623,5		545,4		20,3		57,4	

При испытании конструкционных материалов в условиях влияния асимметричных напряжений с заданным коэффициентом асимметрии цикла R для построения базовых диаграмм циклической трещиностойкости использовали предложенную авторами [7] зависимость типа Пэриса

$$V_{\Delta K_I}^c = dc/dN = C \cdot (\Delta K_I / \sqrt{1-R})^n, \quad (1)$$

Максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений K_I в границах цикла нагружения запишем в виде $K_{I\max} = \Delta K_I / \sqrt{1-R}$.

Испытания металла газопроводных труб, изготовленных из стали 10Г2ФБ, на циклическую трещиностойкость проводили на специальном экспериментальном оборудовании [11]. Испытывали балочные образцы прямоугольного поперечного сечения с начальной краевой трещиной $C = 1,2 \dots 2,0$ мм в условиях консольного изгиба. Образцы вырезались из фрагментов газопроводных труб. Длина образца – 200 мм. Частота циклического нагружения синусоидальной формы – 1 Гц при асимметрии цикла нагружения $R \approx 0,8$. Испытания проводили в воздухе при постоянной температуре $T = 20$ °С.

Результаты испытаний были представлены в виде диаграмм циклической трещиностойкости (рис. 1) – графических зависимостей скорости роста усталостной трещины dc/dN от размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK_I в окрестности вершины трещины и построены в двойной системе координат [7]. Такие диаграммы размещены между двумя его граничными значениями. Нижнее, пороговое, значение ΔK_{th} соответствует значению ΔK_r , при котором не происходит рост усталостной трещины на протяжении заданного числа циклов нагружения. Верхнее значение ΔK_{fc} соответствует значению ΔK_r , при котором наступает спонтанный (катастрофический) рост трещины. Величина ΔK_I является локальной характеристикой [7] напряженно-деформированного состоя-

ния в окрестности вершины трещины, что зависит от приложенного к телу циклического нагружения ΔP , его геометрических размеров H_i и глубины (длины) трещины C .

Диаграмму циклической трещиностойкости металла трубопровода аналитически представляют степенной зависимостью

$$\frac{dc}{dN} = C \cdot (\Delta K_I)^n,$$

где C и n – константы системы «материал–среда»; ΔK_I – размах коэффициента интенсивности напряжений, $\Delta K_I = \Delta K_{I\max} - \Delta K_{I\min}$.

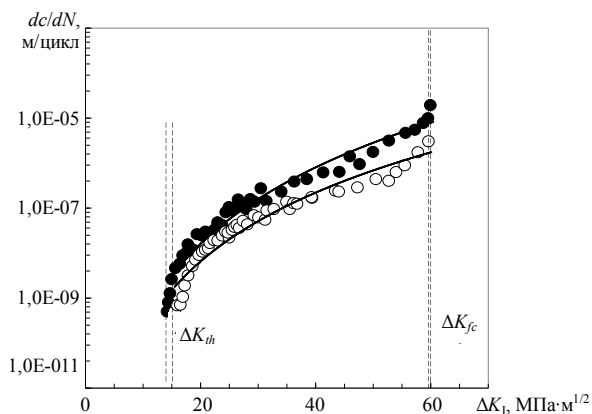


Рис. 1. Влияние воздуха на характеристики циклической трещиностойкости для нового и эксплуатируемого металлов (сталь 10Г2ФБ) газопровода ($T = 20$ °С): ● – новый металл; ○ – эксплуатируемый металл

Для изложенных условий испытаний стали 10Г2ФБ в табл. 2 приведены значения констант в степенной зависимости [7], что аналитически описывает среднеамплитудный участок полученных диаграмм циклической трещиностойкости металла газопровода. Также представлены соответствующие значения порогового (ΔK) и критического (ΔK_{th}) коэффициентов интенсивности напряжений.

Таблица 2. Характеристики циклической трещиностойкости стали 10Г2ФБ

Сталь	n	C , м/цикл · (МПа $\sqrt{м}$) $^{-n}$	ΔK_{th}	ΔK_{fc}
			МПа $\sqrt{м}$	
Новая (архивная)	4,43	$1,80 \cdot 10^{-14}$	15,02	59,91
Эксплуатируемая	4,80	$1,28 \cdot 10^{-14}$	13,93	60,04

Сравнение полученных результатов показывает незначительное отличие характеристик циклической

трещиностойкости нового и эксплуатируемого металлов газопроводных труб (см. табл. 2). Пороговые

коэффициенты интенсивности напряжений ΔK_{th} не существенно различаются, а критические коэффициенты интенсивности напряжений ΔK_{fc} практически совпадают. Влияние срока эксплуатации металла газопровода наблюдается только на стадии распространения усталостной трещины, о чем свидетельствует большее значение параметра n в степенной зависимости Пэриса [7].

Количественно влияние длительности эксплуатации (степени деградации) на циклическую трещиностойкость исследуемых металлов газопровода (сталь 10Г2ФБ) оценивали [8], сравнивая значения размаха коэффициентов интенсивности напряжений, которые соответствуют скорости роста трещины $dc/dN = 10^{-7}$ м/цикл на воздухе в эксплуатируемом (ΔK_c^*) и неэксплуатируемом (ΔK_n^*) металлах, используя формулу

$$k_d = \frac{\Delta K_c^*}{\Delta K_n^*}.$$

Представленные в табл. 3 значения коэффициента деградации k_d свидетельствуют, что длительно эксплуатируемый металл газопровода обладает меньшим сопротивлением развитию усталостной трещины, поскольку коэффициент деградации $k_d = 0,80$.

Поскольку металл подвижного трубопровода кроме асимметричных нагружений, вызванных суточными изменениями температуры, будет также испыты-

вать влияние от нулевых нагружений, возникающих при закачке и выгрузке газа, а также подвержен более существенным рабочим нагрузкам ($P = 20,0$ МПа), процесс его деформационного старения будет более существенным.

Таблица 3. Значения ΔK^* и коэффициента k_d для стали 10Г2ФБ

Сталь	ΔK^* , МПа $\sqrt{м}$	k_d
Новая (архивная)	34,39	1,00
Эксплуатируемая	27,58	0,80

ВЫВОДЫ

1. Механические характеристики ($\sigma_b, \sigma_{0.2}$) нового и эксплуатируемого металлов газопровода (сталь 10Г2ФБ), определенные по стандартной процедуре, менее чувствительны к деформационному старению.

2. Более чувствительны к деформационному старению характеристики циклической трещиностойкости эксплуатируемого металла газопровода (сталь 10Г2ФБ), которые существенно изменяются (20 %) под влиянием длительных эксплуатационных асимметричных усталостных нагрузок.

3. Полученные данные необходимо учитывать при проектировании и в дальнейшей эксплуатации подвижных трубопроводов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Вотинцев, А. В.** Транспортировка сжатого природного газа [Текст] / А. В. Вотинцев // Газовая промышленность. – 2002. – № 2. – С. 62–63.
- [2] Деградація властивостей сталей магістральних газопроводів упродовж їх сорокарічної експлуатації [Текст] / Г. М. Никифорчин, О. Т. Цирульник, Д. Ю. Петрина [та ін.] // Проблеми міцності. – 2009. – № 5. – С. 66–72.
- [3] **Деклар. пат. на корисну модель 67664 Україна, МПК F17C 5/00.** Спосіб транспортування стиснутого природного газу рухомим трубопроводом [Текст] / Патон Б. Є., Крижанівський Є. І., Савицький М. М., Швидкий Е. А., Зайцев Вал. В., Мандрик О. М.; заявник і патентотримач Івано-Франківський нац. техн. ун-т нафти і газу. – № u201114580; заявл. 08.12.11; опубл. 27.02.12 // Промислова власність. – 2012. – Бюл. № 4.
- [4] **Зайцев, В. В.** Суда-газовозы [Текст] / В. В. Зайцев, Ю. Н. Коробанов. – Л. : Судостроение, 1990. – 304 с.
- [5] **Крижанівський, Є. І.** Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання [Текст] : наук.-техн. посіб. : у 3 т. / Є. І. Крижанівський, Г. М. Никифорчин; під заг. ред. В. В. Панасюка. – Івано-Франківськ; Л. : Вид-во Івано-Франків. нац. техн. ун-ту нафти і газу, 2012. – Т. 3. Деградація газопроводів та її запобігання. – 433 с.
- [6] **Красовський, А. Я.** Оцінка залишкового ресурсу трубопроводу, ушкодженого стресс-корозією [Текст] / А. Я. Красовський, І. В. Ориняк, І. В. Лохман // Трубопровідний транспорт. – 2011. – № 2 (68). – С. 18–21.
- [7] Механика разрушения и прочность материалов [Текст] : справ. пособие : в 4 т. / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин [и др.]; под общ. ред. В. В. Панасюка. – К. : Наук. думка, 1990. – Т. 4 : Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. – 680 с.
- [8] Механіка руйнування і міцність матеріалів [Текст] : довідн. посібник / під заг. ред. В. В. Панасюка. – К. : ВД «Академперіодика», 2005. – Т. 7 : Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування. – 378 с.

- [9] Оцінювання роботоздатності сталі 17Г1С після тривалої експлуатації на газогоні [Текст] / О. Т. Цирульник, М. І. Греділь, О. З. Студент [та ін.] // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2008. – Т. 13, № 4. – С. 49–55.
- [10] **Петрина, Ю. Д.** Вплив експлуатаційних чинників нафтогазопроводів на циклічну тріщиностійкість сталі 17ГС [Текст] / Ю. Д. Петрина, Д. Ю. Петрина, С. С. Вуйцік // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2009. – № 3 (32). – С. 54–58.
- [11] Установка для испытаний конструкционных материалов на циклическую коррозионную трещиностойкость / Р. С. Грабовский, И. Н. Дмытрах, Я. Н. Пукас [и др.]. Деп. в ВИНТИ от 10.11.1989, № 6768 – В 89. – С. 8.
- [12] **Фридман, Я. Б.** Механические свойства металлов. Механические испытания. Конструкционная прочность [Текст] : в 2 т. / Я. Б. Фридман. – М. : Машиностроение, 1974. – Т. 2. – С. 368.

© Р. С. Грабовський

Надійшла до редколегії 04.04.2014

Статтю рекомендує до друку
д-р техн. наук, доц. *Вал. В. Зайцев*