

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПОВРЕЖДЕННОГО ТРОЙНИКА

П. С. ЮХИМЕЦ

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

На основе результатов расчетов методом конечных элементов и измерений деформаций с помощью метода электро-тензометрии исследовано напряженно-деформированное состояние тройников, в том числе при наличии объемных поверхностных дефектов, расположенных в зонах конструктивной концентрации напряжений по контуру примыкания патрубка. Рассмотрено НДС соединительных элементов в зависимости от их геометрических параметров и условий закрепления. Получены данные о концентрации напряжений в зоне повреждения, ее зависимость от геометрических параметров дефекта и места его расположения. Проведены циклические гидравлические испытания натурального образца равнопроходного тройникового соединения с искусственно нанесенными объемными поверхностными дефектами и выполнено сопоставление фактической и расчетной долговечности. Библиогр. 11, табл. 6, рис. 6.

Ключевые слова: трубопроводы, тройниковое соединение, объемный поверхностный дефект, малоцикловая прочность, концентрация напряжений

Основным силовым воздействием при определении толщины стенок тройникового соединения, также как и прямолинейного участка трубопровода, является внутреннее давление [1]. Однако напряженно-деформированное состояние (НДС) тройника и прямой трубы существенно отличается. Это относится и к НДС в зоне объемных поверхностных дефектов (ОПД) указанных элементов трубопровода. Поскольку в процессе перекачки транспортируемого продукта трубопроводы подвергаются повторным нагрузкам [2], указанные особенности НДС в области ОПД, расположенных в зонах II, IV и V (рис. 1) рассматриваются в настоящей работе в связи с расчетно-экспериментальной оценкой прочности поврежденных тройников при циклическом изменении внутреннего давления. Характеристики НДС и циклической прочности тройника при расположении дефекта в зонах I и III представлены в работе [3].

Результаты исследования НДС тройника методом конечных элементов. Проведенные численные расчеты показали, что при нагружении

тройников одного типоразмера (426×20–168×9), но различной конструкции, минимальные напряжения возникают в тройнике с накладками, максимальные – в тройнике с приварным штуцером (табл. 1). Конструктивная концентрация напряжений достигает достаточно высоких значений и составляет в зависимости от типа тройника $\alpha_\sigma = 3,6 \dots 4,5$. Во всех случаях максимальные напряжения возникают на внутренней поверхности области сопряжения штуцера и трубы вдоль продольной оси тройника – в зоне II (см. рис. 1).

Установлено, что увеличение максимальных напряжений в тройнике происходит с увеличением диаметра патрубка, уменьшением его толщины и радиуса сопряжения трубы и патрубка. Наибольший рост напряжений отмечен при одновременном пропорциональном снижении толщины трубы и патрубка. В качестве примера в табл. 2 приведены данные, иллюстрирующие рост конструктивной концентрации напряжений в тройнике при увеличении диаметра патрубка.

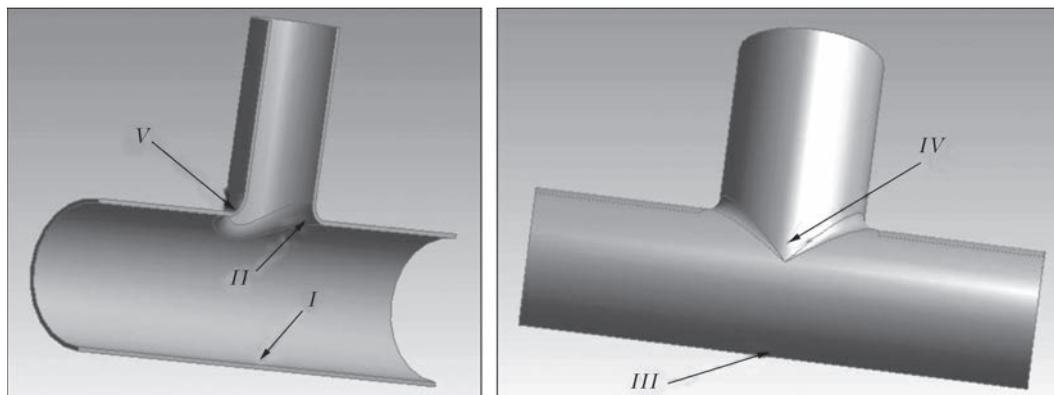


Рис. 1. Характерные зоны тройникового соединения (указаны стрелками)



Таблица 1. Максимальная интенсивность напряжения σ_i^{\max} на поверхности тройника при внутреннем давлении $P = 1$ МПа при локализации в зоне III

Тип тройника	σ_i^{\max} , МПа	α_σ	Примечание
ТУ 51-467-89 [4] (накладка)	31,4	3,6	–
ТУ 51-743-76 [5] (приварной штуцер)	39,4	4,5	Катет – 10 мм
ГОСТ 17376-2001 [6] (бесшовный)	36,5	4,2	Радиус сопряжения $R = 50$ мм

Примечание: α_σ – конструктивный коэффициент концентрации напряжений (ККН), определяемый как $\sigma_i^{\max}/\sigma_i^T$, где σ_i^T – интенсивность напряжений в трубе 426×20

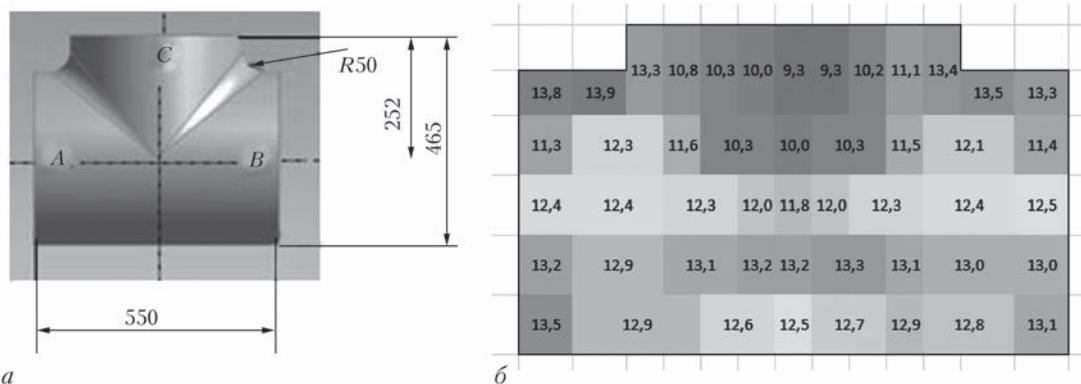


Рис. 2. Тройник 426×12–426×12: а – размеры; б – карта распределения толщин

Как следует из табл. 3, максимальные напряжения в дефекте, расположенном в зоне конструктивной концентрации напряжений тройника, возрастают с увеличением длины и глубины дефекта и уменьшением его ширины. Концентрация напряжений в дефектах, расположенных в указанных зонах равнопроходного тройника, в 2,5...3,7 раза превышает соответствующие значения для дефектов с теми же геометрическими параметрами в случае их расположения на прямой трубе.

Согласно полученным данным, схема закрепления концов тройника не оказывает значительного влияния на НДС зон конструктивной концентрации напряжений. Условия закрепления, реализованные в эксперименте (один из торцов трубы жестко защемлен), являются наиболее интенсивными – рост напряжений по сравнению с другими вариантами составляет $\approx 10\%$ как для зоны II, так и для зоны IV.

Экспериментальные исследования. Установленные зависимости ККН от геометрических параметров дефекта и места его расположения были использованы при изготовлении натурного образца для определения размеров искусственно нанесившихся ОПД, имитировавших коррозионные повреждения.

Таблица 2. Влияние диаметра патрубка на ККН

Тройник $R = 50$	α_σ		
	Зона II	Зона IV	Зона V
426×12-168×12	3,4	2,0	1,2
426×12-299×12	4,3	2,6	2,4
426×12-426×12	5,7	5,7	3,1

Примечание: α_σ – ККН, определяемый как $\sigma_i^{\max}/\sigma_i^T$, где σ_i^T – интенсивность напряжений в трубе 42×12

В качестве объекта исследования было использовано равнопроходное тройниковое соединение 426×12, размеры которого приведены в табл. 4 и на рис. 2, практически соответствуют требованиям нормативной документации. Как видим (рис. 2, б), формирование отвода при изготовлении тройника происходило за счет утонения его стенки.

Химический состав материала тройника, мас. %: 0,132 С; 0,188 Si; 0,40 Mn; 0,031 S; 0,024 P; 0,020 Cr; 0,039 Ni; 0,010 Cu.

Нанесение дефектов на поверхность тройника производилось электрохимическим методом. Геометрические параметры модельных дефектов приведены в табл. 5.

НДС натурного образца исследовали экспериментальным методом – с помощью тензометрирования и расчетным – с использованием МКЭ. При разработке схемы тензометрирования основное внимание было направлено на зоны дефектов и прилегающие области: монтаж тензорезисторов (измерительная база 3 мм) в зонах II, IV и V проводили в местах возникновения максимальных расчетных напряжений с учетом направления их действия, во всех случаях совпадавшего с направлением действия кольцевых напряжений в магистральной трубе (рис. 3).

На первом этапе давление создавалось посредством нагнетания внутрь образца сжатого воздуха. Таким образом обеспечивалось измерение деформаций с помощью тензорезисторов, находившихся на внутренней поверхности тройника – в зоне II. В дальнейшем статическое, а затем и циклическое нагружение в Лаборатории испытаний давлением ИЭС им. Е.О. Патона НАН Укра-

Таблица 3. НДС в зависимости от геометрических параметров ОПД в тройнике 426×12–426×12

Дефект, мм			Зона	σ_i , МПа	α_{σ} (МКЭ)	α_{σ}^T [7]	$\alpha_{\sigma}/\alpha_{\sigma}^T$
длина	ширина	глубина					
-	-	-	II	85,5	5,7	-	-
60	40	8	II	204,8	13,7	4,2	3,3
50	30	8	II	191,8	12,8	4,6	2,8
50	40	6	II	151,6	10,1	3,0	3,4
50	40	8	II	169,1	11,3	3,8	3,0
-	-	-	IV	84,6	5,7	-	-
40	50	8	IV	158,7	10,6	3,8	2,8
50	40	8	IV	167,3	11,2	3,8	2,9
50	30	8	IV	172,6	11,6	4,6	2,5
40	30	8	IV	170,3	11,4	4,1	2,8
40	50	6	IV	136,8	9,2	2,5	3,7
-	-	-	V	46,3	3,1	-	-
50	40	8	V	164,9	11,0	3,8	2,9
50	30	8	V	193,9	13,0	4,6	2,8
60	40	8	V	183,8	12,3	4,2	2,9
50	40	6	V	128,8	8,6	3,0	2,9

Примечания: 1. Длина дефекта в зонах II, V определяется его протяженностью вдоль дуги сопряжения трубы и патрубка, в зоне IV – вдоль оси трубы; 2. α_{σ}^T – значение ККН в ОПД на прямой трубе

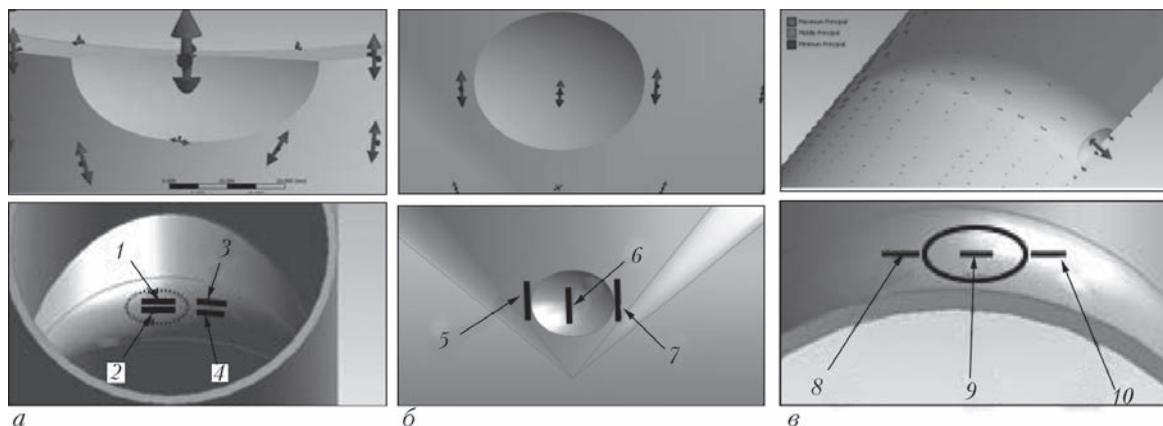


Рис. 3. Направление максимальных главных деформаций, а также расположение и нумерация тензорезисторов в дефектах (указаны стрелками): а – зона II; б – IV; в – V

ины, аккредитованной в системе УкрСЕПРО на техническую компетенцию (аттестат аккредитации UA 6.001 T306), проводили с использованием гидравлического оборудования.

Образец был подвергнут нагружению пульсирующим внутренним давлением 0,2...7,0 МПа с частотой 4–5 циклов в минуту. После наработки 3060 циклов произошла разгерметизация образца вследствие возникновения усталостной трещины в зоне II (рис. 4) и испытания были завершены.

Анализ результатов. Расчетные и измеренные величины максимальных деформаций в дефектах при давлении $P = 1$ МПа даны в табл. 5. Видно, что деформации в ОПД зоны II наибольшие. Расчетные деформации (МКЭ) превосходили экспериментальные величины: в ОПД зоны II – в 1,13 раза, в дефектах IV и V зоны – в 1,36 и 1,78 раза

соответственно. Указанные различия между расчетными и измеренными величинами являются, по-видимому, следствием упрощений, введенных при построении геометрической модели тройника.

Как следует из табл. 6, в случае расположения дефекта тех же размеров, что и модельный, на поверхности прямой трубы 426×12 концентрация напряжений α_{σ} , определявшаяся с помощью полуэмпирической зависимости [8]:

$$\alpha_{\sigma} = 1,4 \left[1 + \frac{2 \frac{b}{d} [1,12 - 0,48 \frac{b}{c} + 0,13 \frac{b}{c} (3 \frac{b}{c} - 2 - \frac{b}{h})]}{1 - \frac{b}{h} (1 - 0,75 \frac{b}{c})} \times \sqrt{1 + \frac{5\pi\lambda^2}{32}} \right], \quad (1)$$



Таблица 4. Геометрические параметры тройника

DN400x12	t , мм	t_0 , мм	D_A , мм	D_B , мм	D_C , мм
ГОСТ 17376	10,2...15,6		426±3,0		
Фактические значения	9,6...13,8	9,8...13,2	426...427	426	429

Примечание: D_A-D_C – наружные диаметры торцов тройника (см. рис. 2); t – толщина стенки на торцах тройника; t_0 – толщина стенки тройника в зоне сопряжения магистрали и отвода

Таблица 5. Размеры дефектов и максимальные деформации в них

Место расположения	Длина, мм	Ширина, мм	Глубина, мм	$\epsilon_{i \max} \cdot 10^4$ (эксперимент)	$\epsilon_{i \max} \cdot 10^4$ (МКЭ)	$\frac{\epsilon_{i \max} \text{ (МКЭ)}}{\epsilon_{i \max} \text{ (эксперимент)}}$
Зона II	43	27	7,10	7,7	8,7	1,13
Зона IV	48	39	7,07	5,8	7,9	1,36
Зона V	35	55	8,70	4,0	7,1	1,78

где b, c, d – размер полуосей эллипсоида, описывающего дефект; h – толщина стенки; λ – функция, учитывающая кривизну поверхности:

$$\lambda^2 = \frac{c^2}{Rh} [12(1 - \mu^2)]^{1/2}$$

(R – радиус трубы; μ – коэффициент Пуассона) оказалась существенно ниже как экспериментальных $\alpha_{\sigma \epsilon}$ (в 2,2...2,9 раза), так и расчетных $\alpha_{\sigma \text{МКЭ}}$ значений ККН в дефектах на поверхности тройника. Коэффициенты концентрации напряжений $\alpha_{\sigma \epsilon}$, полученные экспериментально, во всех случаях оказались ниже, чем рассчитанные МКЭ.

Значение полного коэффициента концентрации напряжений в дефекте тройника α_p , определявшегося как произведение ККН в прямой трубе $\alpha_{\sigma t}$ и конструктивного ККН в тройнике (МКЭ), превышают экспериментальные значения ККН в дефектах в 1,4...2,2 раза (см. табл. 6). В то же время величина полного коэффициента концентрации α_p , определявшегося с использованием конструктивного ККН $\alpha_{\sigma k2}$, находившегося согласно [9], имеет более близкое к экспериментальным значениям ККН – превышение составляет 1,2...1,5 раза. Отметим, что при расчете α_p величина конструктивного ККН во всех рассматриваемых зонах в запас прочности принималась такой же, как и в зоне II.

Максимальные экспериментальные деформации на поверхности дефектов в упругой области нагружения возникали в порядке убывания в зонах II, IV и V. Этот же порядок соответствует

расчету МКЭ (рис. 5). В пластической области деформирования (при давлении свыше 3,5 МПа) экспериментальные деформации в вершине дефекта зоны V превысили максимальные деформации зоны IV.

На рис. 6 приведены расчетные [10] и экспериментальные усталостные кривые материала характерных зон тройника (данные механических испытаний материала тройника, а также испытаний стандартных образцов при жестком нагружении предоставлены А.П.Гопкало, Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАНУ). Как видно, кривые зоны IV расположены достаточно близко, при этом в области числа циклов до разрушения $N_f < 2 \cdot 10^3$ более консервативной является экспериментальная кривая, в области $N_f > 2 \cdot 10^3$ – расчетная. Расчетные кривые зон II, V в диапазоне $N_f = 10^3 \dots 10^4$ занижают значение чисел циклов до разрушения по сравнению с экспериментальными данными приблизительно в 5 раз. Числа циклов N_p опре-



Рис. 4. Разрушение натурального образца в зоне II

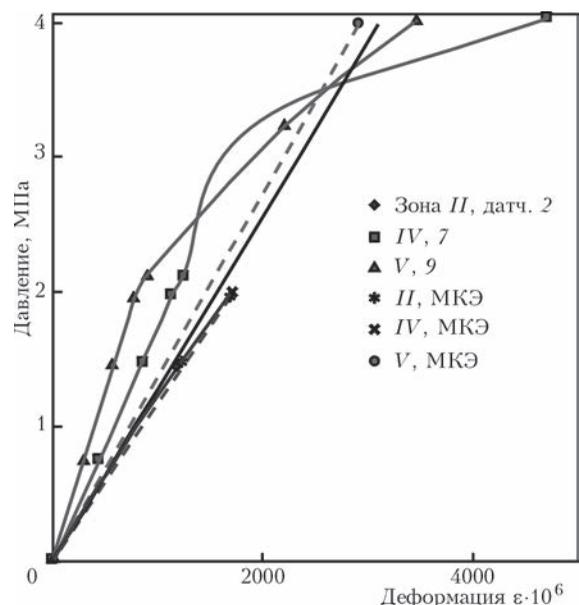


Рис. 5. Сопоставление расчетных и экспериментальных деформаций в дефектах

Таблица 6. Концентрация напряжений в дефектах

Место расположения дефекта	$\alpha_{\sigma t}$	$\alpha_{\sigma e}^*$	$\alpha_{\sigma MKO}^*$	$\frac{\alpha_{\sigma e}}{\alpha_{\sigma t}}$	$\alpha_{\sigma k}$	$\alpha_{\sigma k2}$	$\alpha_{\Gamma} = \alpha_{\sigma \Gamma} \cdot \alpha_{\sigma k}$	$\alpha_{\Gamma 2} = \alpha_{\sigma t} \alpha_{\sigma k2}$	$\frac{\alpha_{\sigma f}}{\alpha_{\sigma e}}$	$\frac{\alpha_{\sigma f/2}}{\alpha_{\sigma e}}$
Зона II	4,1	11,8	13,4	2,9	5,7	3,4	23,4	13,9	2,0	1,2
Зона IV	3,4	8,9	12,2	2,6	5,7		19,4	11,6	2,2	1,3
Зона V	2,8	6,2	10,9	2,2	3,1		8,7	9,5	1,4	1,5

Примечания: * концентрация напряжений по отношению к интенсивности деформаций в прямой трубе 426×12; $\alpha_{\sigma k}$ – коэффициент конструктивной концентрации напряжений (см. табл. 3); $\alpha_{\sigma k2}$ – коэффициент конструктивной концентрации напряжений согласно [9]

делённые по экспериментальной кривой зон I, III почти в 3 раза ниже расчетных. Возможной причиной того, что в данной зоне более консервативной оказалась экспериментальная кривая, может быть развитие в процессе циклического нагружения микротрещин, выявленных в Институте проблем прочности при металлографическом анализе образцов материала из этой зоны и является, как можно предположить, следствием нарушения технологии термообработки тройника.

Для построения расчетных усталостных кривых использовано выражение

$$\epsilon_a = \left[\frac{\ln\left(\frac{1}{1-\Psi}\right)}{4e_t N_f^n} + \frac{\sigma_1}{\sigma_t} \right] e_{ii}$$

где ϵ_a – интенсивность амплитуды деформаций в цикле нагружения; Ψ – относительное сужение шейки при разрыве; e_t – деформация предела текучести; n – число циклов до разрушения; σ_1 – предел усталости материала; σ_t – предел текучести; e_{ii} – интенсивность деформаций, соответствующая пределу текучести; n – показатель степени, $n = 0,5$.

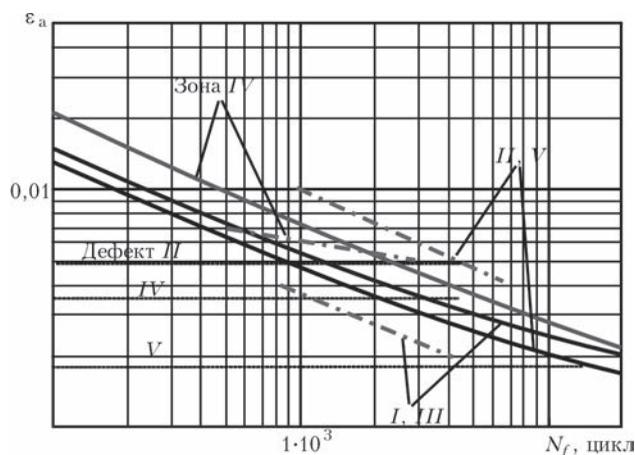


Рис. 6. Усталостные кривые: штрихпунктирные линии – экспериментальные (по данным, предоставленным А.П. Гопкало); линиями в виде точек отмечены уровни максимальных деформаций в дефекте; сплошными линиями – расчетные

С использованием полученных экспериментальных данных была выполнена оценка воздействия модельных дефектов на долговечность натурного образца. Расчет амплитуды максимальной деформации в дефекте проводили на основании максимальных экспериментальных деформации и ККН в упругой области нагружения, а также механических свойств соответствующей зоны тройникового соединения с использованием интерполяционного соотношения для коэффициента уругопластических деформаций [11]:

$$K_e = \frac{\alpha_{\sigma}^{2/(1+m)} (\bar{\sigma}_n)^{(1-m)/(1+m)}}{(\alpha_{\sigma} \bar{\sigma}_n)^{n/(1+m)} \left[1 - \left(\bar{\sigma}_n - 1/\alpha_{\sigma} \right) \right]}$$

где $\bar{\sigma}_n$ – относительные номинальные напряжения в цикле нагружения; $\bar{\sigma}_n = \frac{\Delta\sigma_n}{\sigma_y}$; n – постоянная материала, $n = 0,5$; m – коэффициент упрочнения материала в уругопластической области.

Фактическое число циклов до разрушения дефекта натурного образца в зоне II $N_{f,ex} = 3060$ удовлетворительно соотносится с результатами прогноза с использованием экспериментальной усталостной кривой (рис. 6) $N_{f,pr} \approx 4400$ циклов – накопленное повреждение $d = N_{f,ex}/N_{f,pr} \approx 0,70$. Ожидаемое число циклов до разрушения согласно экспериментальным кривым в дефектах IV и II – $N_f \approx 10^4$ и $N_f \approx (3...4) \cdot 10^4$ соответственно.

Выводы

Экспериментально установлено, что деформации, возникающие в объемных поверхностных дефектах, расположенных в зонах конструктивной концентрации напряжений тройникового соединения под действием внутреннего давления в 2-3 раза выше деформации в дефектах с такими же геометрическими параметрами на поверхности прямой трубы.

Число циклов до разрушения натурного образца согласуется с оценкой его долговечности, основанной на экспериментальном и расчетном



исследовании НДС и циклических свойствах конструкционного материала.

1. СНиП 2.05.06–85. Магистральные трубопроводы. – 2000.
2. Прочность труб магистральных нефте- и продуктопроводов при статическом и малоцикловом нагружении / М.И. Волский, А.С. Аистов, А.П. Гусенков, Л.К. Гуменный // Обзорная информация. Сер. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1979. – С. 56–58.
3. Юхимец П. С., Кобельский С. В., Филипенков В. В. Циклическая прочность поврежденного тройникового соединения // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2015. – № 2. – С. 34–38.
4. ТУ 51-467–89. Детали трубопроводов стальные приварные. Технические условия.
5. ТУ 51-743–76. Тройники сварные из труб на давление P_y 16 МПа.
6. ГОСТ 17376–2001. Тройники бесшовные приварные.
7. Гарф Э. Ф., Кобельский С. В., Юхимец П. С. Концентрация напряжений на участках коррозионных повреждений трубопроводов // Автомат. сварка. – 2000. – № 6. – С. 3–6.
8. Фокин М. Ф., Трубицын В. А., Никитина Е. А. Оценка эксплуатационной долговечности магистрального нефтепровода в зоне дефекта / Обзорная информация. Сер. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1986. – С. 52–54.
9. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
10. Серенсен С. В. Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению. – М.: Атомиздат, 1975. – 192 с.
11. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.

Results of finite element calculation and deformation measurement by the method of electrotenometry were used to study the stress-strain state of T-joints, in particular in the presence of volume surface defects, located in the zones of structural stress concentration around the contour of branch pipe attachment. Connecting element SSS is considered, depending on their geometrical parameters and fastening conditions. Data were obtained on stress concentration in the damage zone, its dependence on defect geometrical parameters and location. Cyclic hydraulic testing of full-scale sample of flush T-joint with artificially introduced surface defects was performed, and actual and design fatigue lives were compared.

Keywords: pipelines, T-joint, volume surface effect, low-cycle fatigue strength, stress concentration

Поступила в редакцию
14.05.2015

Международная конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ»
13–15 июня 2016 г.
Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины

Тематика конференции:

- ◆ электронно-лучевая сварка
- ◆ лазерная сварка
- ◆ гибридные процессы сварки
- ◆ сварка трением с перемешиванием
- ◆ контактно-стыковая сварка высокопрочных сталей
- ◆ сварка дугой, вращающейся в магнитном поле
- ◆ 3D аддитивные технологии, базирующиеся на сварочных процессах

Организационный комитет:
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
03680, г. Киев, ул. Боженко 11, тел./факс: +38(044) 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua, patonpublishinghouse@gmail.com
www.pwi-scientists.com/rus/modernweld2016
www.patonpublishinghouse.com