

ЦИКЛИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ПОВРЕЖДЕННОГО ТРОЙНИКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ

П. С. ЮХИМЕЦ¹, С. В. КОБЕЛЬСКИЙ², В. В. ФИЛИПЕНКОВ³

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ИПП им. Г.С. Писаренко НАНУ. 01014, Киев-014, ул. Тимирязевская, 2. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

³Рижский техн. ун-т. LV-1048, г. Рига, ул. Азенес, 12/14. E-mail: info@rtu.lv

Рассмотрено влияние объемного поверхностного дефекта на напряженно-деформированное состояние тройникового соединения и его прочность при циклическом изменении внутреннего давления при расположении дефекта на поверхности трубы, противоположной ответвлению. Результаты расчетов показывают, что для оценки остаточного ресурса Т-соединения в этом случае может быть использована в качестве консервативной оценки предложенная ранее инженерная методика оценки циклической прочности прямолинейного трубопровода. Этот вывод был сделан на основе серии расчетов МКЭ. Достоверность полученных результатов проверена в ходе циклических испытаний полноразмерного тройника. Библиогр. 7, табл. 6, рис. 6.

Ключевые слова: тройниковое соединение, прочность, остаточный ресурс, коррозионный дефект, эрозионно-коррозионный износ

Основное внимание при выполнении этой работы направлено на исследование влияния объемного поверхностного дефекта (ОПД) на прочность тройникового соединения при циклическом внутреннем давлении. Согласно данным работы [1] имеются две основные зоны поражения Т-соединения эрозионно-коррозионным износом: внутренняя поверхность основной трубы, противоположная ответвлению (рис. 1, зона I) и внутренняя поверхность ответвления в области его сопряжения с основной трубой в направлении продольной оси основной трубы (зона II). Очевидно, что образование коррозионных повреждений при подземной прокладке трубопровода возможно на всех участках его наружной поверхности.

При определенных условиях коэффициент концентрации напряжений (ККН) в ОПД может превысить конструктивную концентрацию напряжения в области пересечения основной трубы и ответвления. В этом случае напряжения в ОПД приобретают особое значение.

Одним из возможных вариантов поиска остаточного ресурса поврежденного тройника является непосредственное использование инженерной методики, приведенной в работе [2]. Очевидно, что такой подход может быть оправданным, если он учитывает напряженно-деформированное состояние (НДС) соединения и, по крайней мере, исключает необоснованное продление его срока эксплуатации. Основные положения методики включают:

– определение ККН на основе геометрических параметров ОПД и трубопровода;

– построение усталостной кривой с использованием характеристик прочности и пластичности материала трубы;

– определение числа циклов за время эксплуатации трубопровода;

– расчет допускаемого числа циклов и остаточного ресурса на основании указанных выше данных.

В данной работе предпринята попытка оценить остаточный ресурс тройника с ОПД, расположенного в области, противоположной ответвлению, в случае: внутренней поверхности – в зоне I; наружной поверхности – в зоне III (см. рис. 1).

Серия расчетов НДС методом конечных элементов (МКЭ) [3] показала, что в качестве консервативной оценки остаточного ресурса Т-соединения может быть использована инженерная методика оценки циклической прочности поврежденного прямолинейного трубопровода [2]. Расчеты тройников были выполнены при воздействии внутреннего давления $P = 1$ МПа. Достоверность полученных результатов была проверена в ходе циклических испытаний полноразмерного тройника.

Напряженно-деформированное состояние тройникового соединения. *Бездефектные зоны I и III.* При изложении были использованы следующие обозначения образующих на поверхности тройника (см. рис. 1). Индексы « p » и « b » относятся к поверхностной образующей трубы или ответвления, индексы « i » и « o » – к внутренней или наружной поверхности соответственно. Закрепление концов тройника при воздействии внутреннего давления, как это было установлено на основании расчетов МКЭ, не оказывает существенного влияния на

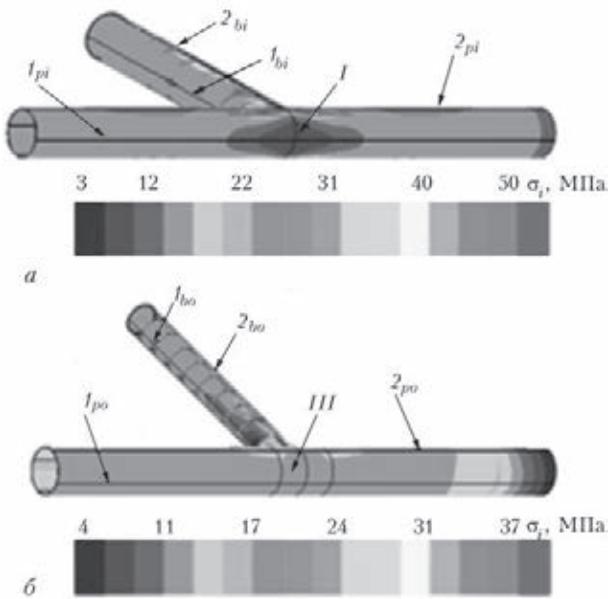


Рис. 1. Обозначение образующих и распределение напряжений на поверхности Т-соединения: а – внутренняя; б – наружная поверхность

его НДС. Поэтому далее в тексте закрепление концов тройникового соединения, если это специально не оговаривается, соответствует условиям эксперимента: один торец трубы является фиксированным, другой ее торец и торец ответвления – свободными.

Некоторые отличительные особенности НДС в зонах I и III рассматриваются на примере:

- неравнопроходного тройника (диаметр трубы и ответвления неравны) $159 \times 4,8 - 108 \times 4$ ($159 \times 4,8$ – диаметр \times толщина стенки трубы, мм; 108×4 – диаметр \times толщина стенки ответвления, мм);
- равнопроходного тройника $159 \times 4,8 - 159 \times 4,8$.

В случае тройника $159 \times 4,8 - 108 \times 4$ неравномерность НДС в зонах I, III незначительная – повышение напряжений в зоне I составляет $\approx 9\%$, а в зоне III их понижение $\approx 6\%$. Данная тенденция становится более выраженной по мере приближения диаметра ответвления к размеру основной трубы (рис. 2). В случае равнопроходного соединения повышение напряжений в зоне I достигает $\approx 75\%$, а понижение в зоне III $\approx 40\%$.

Данные оценки влияния толщины стенки основной трубы и ответвления на НДС зоны I тройникового соединения, полученные на основании расчетов МКЭ [3], представлены на рис.3. Как следует из рисунка, при увеличении толщины основной трубы в два раза (кривые 1, 2) ККН в зоне I возрастает от 1,09 до 1,27; при таком же увеличении толщины ответвления (кривые 2 и 3) концентрация снижается с 1,27 до 1,15. В случае равнопроходного тройника при увеличении толщины в два раза значение ККН снижается на 6...7%.

Тройник с дефектом. Зависимость напряжений в дефекте от месторасположения (внутрен-

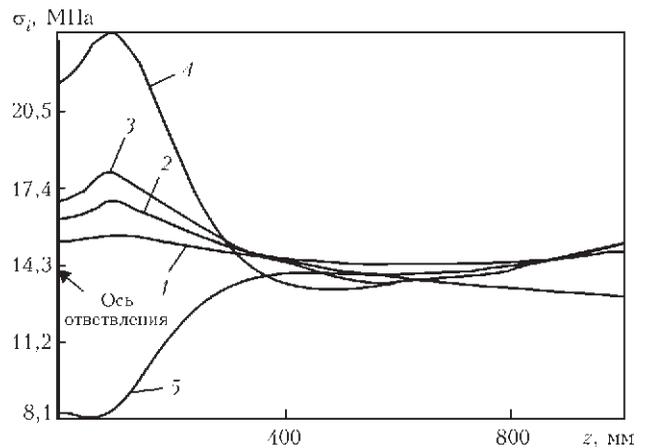


Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений вдоль образующей 1_{pi} (см. рис. 1) тройника: 1 – $159 \times 4,8 - 108 \times 4$; 2 – $159 \times 4,8 - 130 \times 4$; 3 – $159 \times 4,8 - 140 \times 4$; 4 – $159 \times 4,8 - 159 \times 4,8$; 5 – вдоль образующей 1_{po} тройника $159 \times 4,8 - 159 \times 4,8$

няя (зона I) или внешняя (зона III) поверхность Т-соединения) была исследована на основе расчета МКЭ тройника $159 \times 6,2 - 108 \times 5,5$. Геометрические параметры соединения, в том числе размеры дефекта (глубина $b = 3,8$ мм, длина $2c = 70$ мм, ширина $2d = 28$ мм) соответствовали геометрическим параметрам натурального образца.

В случае расположения повреждения на внешней поверхности трубы максимальное напряжение $\sigma_{i\max} = 72,3$ МПа наблюдается в самой глубокой точке дефекта – так называемой вершине. В случае внутреннего расположения максимум $\sigma_{i\max} = 60,1$ МПа сдвигается вдоль продольной оси симметрии дефекта и позиционируется на промежуточной глубине. Более высокие напряжения на поверхности наружного дефекта, а также смещение максимального напряжения из вершины дефекта в случае внутреннего расположения может, по-видимому, объясняться двумя основными причинами: дополнительным изгибом стенки трубы; неравномерностью распределения напряжений по толщине стенки.

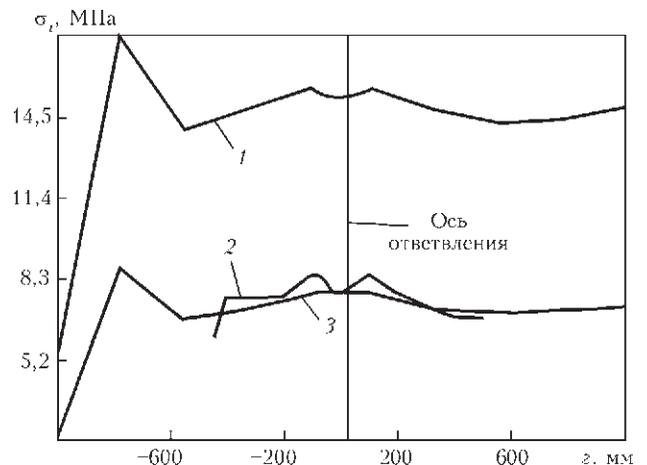


Рис. 3. Распределение интенсивности напряжений вдоль образующей 1_{pi} тройника: 1 – $159 \times 4,8 - 108 \times 4$; 2 – $159 \times 10 - 108 \times 4$; 3 – $159 \times 10 - 108 \times 8$

В случае расположения дефекта в зоне III его вершина – точка наибольшей концентрации напряжений – вследствие геометрической неоднородности совпадает с более напряженными по толщине стенки слоями металла. Напротив, для дефекта зоны I характерно наложение вершины на менее напряженные слои. Очевидно, что максимальное напряжение представляет собой комбинацию геометрической концентрации и номинальных напряжений соответствующего слоя.

Основные закономерности влияния геометрических параметров дефекта на напряжения на его поверхности даны на примере повреждения в зоне I. Достаточно быстрый рост напряжений наблюдается при увеличении глубины дефекта b (рис. 4). Так, в случае постоянной длины и ширины дефекта ($2c = 60$ мм; $2d = 28$ мм) ККН для глубины 2; 2,5 и 3 мм, составляет 1,93; 2,45 и 2,97 соответственно. К подобному росту напряжений приводит и увеличение длины дефекта.

На рис. 5 представлены результаты расчета прямой трубы $159 \times 4,8$ и тройников $159 \times 4,8 - 108 \times 4$ и $159 \times 4,8 - 159 \times 4,8$, имеющих дефект на внутренней поверхности одинакового размера ($b = 3$ мм, $2c = 60$ мм, $2d = 28$ мм). Здесь для сравнения приведены напряжения в бездефектных тройниках $159 \times 4,8 - 108 \times 4$ и $159 \times 4,8 - 159 \times 4,8$. Сопоставление указанных вариантов показывает, что максимальные напряжения возникают в дефекте, расположенном на внутренней поверхности прямолинейного трубопровода (кривая 1). Концентрация напряжений в этом случае в 1,5 раза выше, чем в тройнике с таким же повреждением в зоне I. Важно, что диаметр ответвления не оказывает существенного влияния на напряжения в дефекте (кривые 3, 4). Таким образом, применение метода оценки остаточного ре-

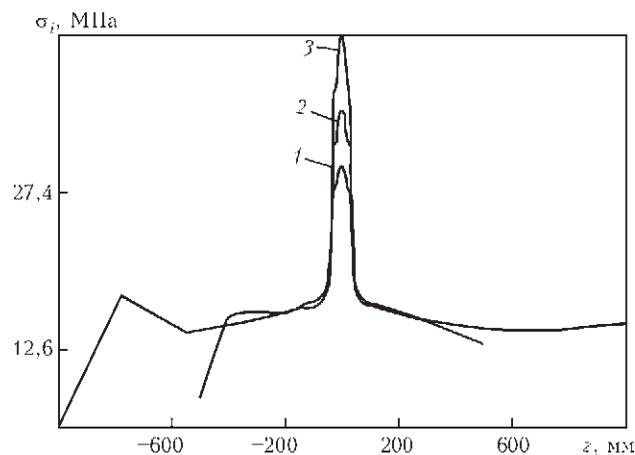


Рис. 4. Влияние глубины дефекта b : 1 – 2 мм; 2 – 2,5; 3 – 3 на максимальные напряжения в зоне I тройника $159 \times 4,8 - 108 \times 4$

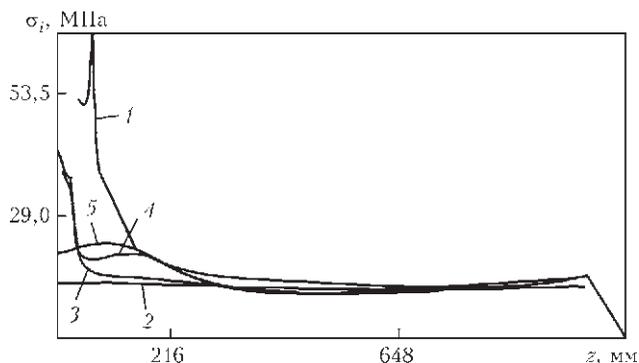


Рис. 5. Распределение интенсивности напряжений вдоль образующей l_{pi} (совпадает с продольной осью симметрии): 1 – прямой трубопровод $159 \times 4,8$ с ОПД; 2 – бездефектный тройник $159 \times 4,8 - 108 \times 4$; 3 – тройник $159 \times 4,8 - 108 \times 4$ с ОПД; 4 – тройник $159 \times 4,8 - 159 \times 4,8$ с ОПД; 5 – бездефектный тройник $159 \times 4,8 - 159 \times 4,8$ (величина ОПД: $b = 3$ мм, $2c = 60$ мм, $2d = 28$ мм)

сурса прямолинейного трубопровода с ОПД [2] для расчета циклической прочности тройника с повреждением в области, противоположной ответвлению, оправдано, поскольку с учетом изложенного выше, такой подход дает консервативный результат.

Эксперимент. Натурный образец. Для экспериментального исследования циклической прочности использовалось бесшовное тройниковое соединение $159 \times 6,0 - 108 \times 5,0$ (номинальный размер), изготовленное в соответствии с ГОСТ 17376–2001 [4] из трубной заготовки по ГОСТ 8731–74 [5]. Материал тройника – сталь 20 ГОСТ 1050–88 [6]. Химический состав материала следующий, мас. %: 0,17 – 0,24 С; 0,17 – 0,37 Si; 0,35 – 0,65 Mn; $\leq 0,040$ S; $\leq 0,035$ P; $\leq 0,25$ Cr; $\leq 0,30$ Ni; $\leq 0,08$ As; $\leq 0,008$ N; $\leq 0,30$ Cu.

Механические свойства материала определяли на стандартных образцах, вырезанных из области тройника, противоположной ответвлению в кольцевом направлении после окончания циклических испытаний. Минимальные значения результатов испытаний приведены в табл. 1.

Для изготовления испытательного образца к торцам тройника были приварены отрезки труб. Концы образца герметизированы посредством толстостенных приварных плоских днищ (рис. 6). Для подачи воды, используемой в качестве рабочей жидкости, образец снабдили нагнетательным и выпускным штуцером.

Углубление в форме части эллипсоида, имитировавшее коррозионный дефект (глубина $b = 3,8$ мм; длина $2c = 70$ мм, ширина $2d = 28$ мм; ККН при упругом нагружении $\alpha_\sigma = 6,47$) было механически нанесено в зоне III. Размеры де-

Таблица 1. Механические свойства материала тройника

Источник данных	Предел текучести σ_y , МПа	Временное сопротивление σ_r , МПа	Удлинение δ , %	Сужение ψ , %
Механические испытания	253,1	428,8	22,7	50,3
Сертификат	270	480	28,0	-

фекта были приняты исходя из двух основных требований:

- ККН в дефекте должен превышать конструктивную концентрацию ($\alpha_\sigma \sim 3,8$, МКЭ) в зоне II;
- разрушение образца при испытании, учитывая особенности испытательного оборудования, должно произойти на базе $1...2 \cdot 10^4$ циклов.

Деформации в характерных зонах тройникового соединения измерялись с помощью тензодатчиков (см. рис. 6). Для измерения деформаций на поверхности дефекта использовали датчики с базой 5 мм, в других случаях – тензодатчики с базой 10 мм.

НДС натурального образца. Измерение деформаций проводили в первых циклах нагружения при ступенчатом подъеме давления. Экспериментальные зна-

чения кольцевых σ_ϕ и осевых σ_z напряжений в приваренных трубных секциях представлены в табл. 2. В табл. 3 представлены результаты измерения и расчета напряжений и деформаций в модельном дефекте на поверхности тройника и прямой трубы в упругой области нагружения, а также для сопоставления расчетных значений напряжений в зоне сопряжения трубы и ответвления тройника.

Циклические гидравлические испытания. В последующем натуральный образец был подвергнут циклическому гидравлическому нагружению, которое осуществлялось посредством подачи воды внутрь образца с помощью насоса через нагнетательный штуцер. Сброс давления производился через выпускной штуцер, соответственно. Нагружение выполнялось в автоматическом режиме с частотой 1,5...2,0 цикла в минуту.

История нагружения натурального образца приведена в табл. 4. После наработки общего числа циклов $\sum N_i = 17550$ произошла разгерметизация образца вследствие возникновения сквозной трещины, располагавшейся в дефекте вдоль образующей 1_{po} .

Как следует из табл. 2, значения деформаций, измеренных в трубных секциях, превышали расчетные величины, что могло быть следствием некоторой несоосности, наблюдавшейся между осями данных элементов натурального образца и соответствующей осью тройника.

В табл. 3 представлены расчетные и экспериментальные данные о НДС наиболее нагруженных зон тройника при упругом нагружении. Видно довольно близкое соответствие между окружными напряжениями ϵ_ϕ , измеренными с помощью тензодатчиков на поверхности дефекта ($3,5 \cdot 10^{-4}$), и деформациями ϵ_ϕ , рассчитанными МКЭ ($3,7 \cdot 10^{-4}$): относительная разница составляет $\Delta = 5,7\%$. Согласно результатам расчета МКЭ, максимальные окружные деформации на поверхности дефекта превышают их интенсивность в

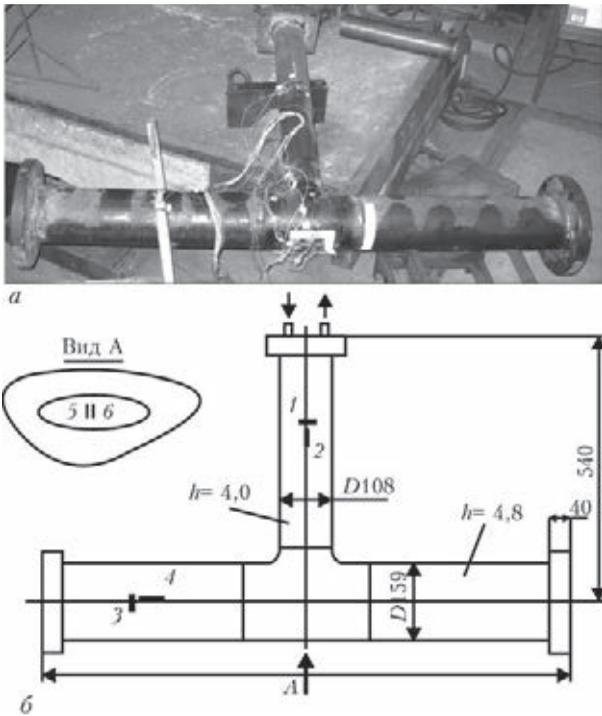


Рис. 6. Натурный образец перед испытанием (а) и схема расположения тензодатчиков 1–6 (б)

Таблица 2. Напряжения на наружной поверхности приварных труб (внутреннее давление 1 МПа)

D_o , мм	σ_ϕ , МПа		Величина отношения напряжений Эксперимент/Расчет	σ_z , МПа		Величина отношения напряжений Эксперимент/Расчет
	Эксперимент (среднее)	Расчет		Эксперимент (среднее)	Расчет	
159	19,4	15,1	1,28	9,8	7,6	1,29
108	12,1	12,0	≈ 1	7,1	6,0	1,18

Таблица 3. Деформации и напряжения на поверхности тройника

Дефект					Поверхность сопряжения труба–ответвление		
в тройнике				в прямой трубе		внутренняя	наружная
$\epsilon_\phi \cdot 10^{-4}$		$\epsilon_i \cdot 10^{-4}$		σ_p , МПа	$\epsilon_i \cdot 10^{-4}$	σ_p , МПа	σ_p , МПа
Показания датчиков (среднее)	МКЭ	МКЭ	Данные работы [2]	МКЭ	МКЭ	МКЭ	МКЭ
3,5	3,7	3,6	3,3	7,3	3,7	4,4	1,2 – 1,3

Примечание: расчет согласно работы [2] был выполнен для прямой трубы D159×5,5 с дефектом такого же размера, что и на натурном образце (толщина стенки трубы 5,5 мм соответствует толщине тройника в месте расположения дефекта)



Таблица 4. История циклического нагружения

P_{\min} , МПа	P_{\max} , МПа	N_p , цикл	Эксперимент			Данные работы [2]			
			$\varepsilon_{ia} \cdot 10^{-3}$	N_p , цикл	d_i	$\varepsilon_{ia} \cdot 10^{-3}$	N_p , цикл	d_i	
1,5	7,5	9200	0,88	$1,2 \cdot 10^6$	0,01	1,63	29510	0,31	
1,5	9,0	2600	1,24	93000	0,03	2,27	9812	0,26	
1,5	10,0	3080	1,64	28540	0,11	2,77	5608	0,55	
1,5	11,0	2670	2,63	6446	0,41	3,02	3470	0,77	
Суммарная повреждаемость						0,56			1,89

Примечания: P_{\min} , P_{\max} – минимальное, максимальное давление в цикле нагружения соответственно; ε_{ia} – амплитуда интенсивности деформаций; N_i – число циклов данного i -типа; N_{fi} – число циклов до разрушения данного i -типа; d_i – доля повреждаемости, накопленная в дефекте в циклах нагружения данного i -типа

$\approx 1,028$ раза. Используя данное соотношение для пересчета максимального значения интенсивности деформаций на поверхности дефекта согласно данным работы [2] в деформацию ε_p , находим, что ее относительная разница по отношению к экспериментальному значению составляет $\Delta \approx -3,1\%$. В свою очередь, расчетное (МКЭ) значение интенсивности деформации в ОПД в зоне III ($\varepsilon_i = 3,6 \cdot 10^{-4}$) практически достигло величины соответствующей характеристики в дефекте такого же размера, расположенном на поверхности прямой трубы $\varepsilon_i = 3,7 \cdot 10^{-4}$.

Измерение деформаций во время первых 10...20 циклов каждого заданного уровня изменения давления показали, что амплитуда циклических деформаций стабилизировалась. Величины стабилизированных значений были на 15...20 % ниже, чем деформации в «нулевом» полцикле, вследствие чего накопленная остаточная деформация была пренебрежимо малой и могла не учитываться при оценке повреждаемости. Таким образом, деформирование в дефекте происходило в условиях жесткого нагружения.

Согласно табл. 4, усталостное повреждение, накопленное металлом в дефекте к моменту разрушения, составляло $\sum d_{fi} = 0,56$. Следует отметить, что усталостное повреждение, накапливаемое при малоцикловом нагружении, обычно находится в диапазоне $d = 0,5...1,5$ [7].

Относительно невысокое значение накопленного повреждения может быть результатом использования при построении расчетной усталостной кривой заниженных механических свойств средних по толщине стенки слоев металла тройника. В то же время расчет остаточного ресурса согласно [2] представляется надежной консервативной оценкой, $d = 1,89$. Оценку усталостного повреждения в ОПД в эксперименте осуществляли с использованием линейного правила суммирования повреждаемости:

$$d_f = \sum d_{fi} = \sum \frac{N_i}{N_{fi}}$$

где N_{fi} – число циклов до разрушения в циклах i -го типа.

Выводы

Для оценки малоцикловой прочности бесшовного тройникового соединения с объемным поверхностным дефектом может быть использован расчет циклической прочности поврежденного прямолинейного трубопровода. Если дефект имеет одинаковые размеры и расположен в области тройника, противоположной ответвлению, такой расчет дает надежный консервативный результат.

В случае расположения дефекта на наружной поверхности тройника в области, противоположной ответвлению, напряжения в дефекте в зависимости от его геометрических параметров могут достигать значения напряжения в дефекте таких же размеров на поверхности прямолинейного трубопровода и превышать напряжения в области сопряжения труба–ответвление. Повреждение такого же размера на внутренней поверхности упомянутой области тройника по критериям малоцикловой прочности является менее опасным.

Работа выполнена при поддержке со стороны проекта INNOPES GA-2012-318874.

1. Hiromi Shiihara. Research Institute Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK), “Current wall thinning measured on piping system of main & aux. boiler plant in ships”, ASME-PVP 2008, USA (2008).
2. Юхимец П. С. Оценка остаточного ресурса трубопровода с коррозионным повреждением с учетом изменения параметров дефекта в процессе эксплуатации // Цільова комплексна програма НАНУ «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». – Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2009. – С. 404–411.
3. Програмне забезпечення «Тривимірне скінчено елементне моделювання теплового і теплонапруженого стану елементів машинобудівних конструкцій (SPACE)» / Система сертифікації УкрСЕПРО. – Сертифікат відповідності № UA1.017.0054634-04. – 2004.
4. ГОСТ 17376–2001. Детали трубопроводов бесшовные приварные из углеродистой и низколегированной стали. Тройники. Конструкция. – Введ. 01.11.2001.
5. ГОСТ 8731–74. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Технические требования. – Введ. 01.01.1976.
6. ГОСТ 1050–88. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия. – Введ. 01.01.1991.
7. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. – М.: Машиностроение, 1985. – С. 224.

Поступила в редакцию
21.04.2015