

УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ТРУБ С ПОВЕРХНОСТНОЙ ТРЕЩИНОЙ

А.А. Остсеин, П.Б. Уткин

Рассматривается задача о разрушающем кольцевом напряжении для относительно тонкостенных труб с осевой поверхностной трещиной. При решении материал считаем упругим, за исключением деформированных зон в нетто-сечении и концах трещины, которые заменяются эквивалентными напряжениями, являющимися граничными условиями для задачи при упруго-пластическом разрушении. Используя аппарат комплексной переменной, данная задача была аналитически решена при использовании некоторых предположений на граничные условия. Полученное решение дает возможность вычислить кольцевое напряжение в трубе. В качестве критериев разрушения берутся два условия. Во-первых, раскрытие трещины достигает критического значения для материала, во-вторых, напряжение в нетто-сечении трещины достигает напряжения разрушения для данного материала. По формулам были проведены вычисления для сравнения с экспериментальными данными для нескольких типов труб с поверхностной осевой трещиной.

1. Введение

В последние годы на магистральных газопроводах РФ отмечен рост аварийности связанный с стресс-коррозией. При обследовании участков газопровода Уренгой-Петровск протяженностью 1453 м было выявлено 744 стресс-коррозионных дефекта. Отдельные дефекты имели глубину до 7 мм и длину до 4,5 м. Ресурс работоспособности трубопровода определяется временем его эксплуатации до момента сквозного разрушения стенки. Еще более неопределенным является время зарождения порогового дефекта, способность к стабильному росту при эксплуатации магистралей, трубопроводов, теплотрасс, водоводов и сосудов давления. Разрушение магистральных трубопроводов, изготовленных из трубной стали класса прочности К-52, явилось следствием зарождения на наружной поверхности трубы продольных коррозионно-механических трещин, расположенных в нижней части трубы вблизи продольного сварного шва. Работоспособность трубопроводов во многих случаях обуславливается наличием в них концентраторов напряжений - трещин, рисок, царапин, каверн. В настоящее время недостаточно изучено распределение напряжений и деформаций в трубах с поверхностной трещиной. В этом случае задача становится трехмерной и, при учете пластических деформаций, развивающихся в вершине трещины, трудноразрешимой и актуальной.

Рассмотрено напряженно-деформированное состояние трубы с поверхностной осевой трещиной при плоско-напряженном состоянии. Применяя модель Панасюка-Дагдейла и деформационные критерии разрушения (критическое раскрытие трещины) получены аналитические формулы, дающие связь между характеристиками материала и разрушающим кольцевым напряжением трубы.

2. Схематическое описание задачи

Труба считается бесконечной, с приложенным внутренним давлением перпендикулярным плоскости трещины. Трещина считается линейной, постоянной глубины. Из-за приложенного усилия трещина имеет тенденцию к раскрытию и деформации нетто-сечения, равно как и прилегающие зоны. Раскрытие трещины варьируется вдоль длины трещины и будет максимально в центре трещины. Предполагаем, что трещина вместе с некоторой окрестностью (пластической зоной) отсутствует, а силы, действующие в данной зоне, заменяются на граничные условия в соответствующей упруго-пластической задаче. Схема трещины дана на рис. 1. Разрез дан вдоль трещины, темно-серым показаны пластические зоны у концов трещины.

Математическую модель задачи можно описать в следующих терминах и предположениях.

1. Труба имеет поверхностную осевую трещину.
2. На трещину действуют растягивающие силы, которые при рассмотрении задачи заменяем напряжениями, действующие в нетто-сечении трещины.
3. На обоих концах трещины растягивающие силы заменены напряжениями, действующими в кончиках трещины (пластической зоне).

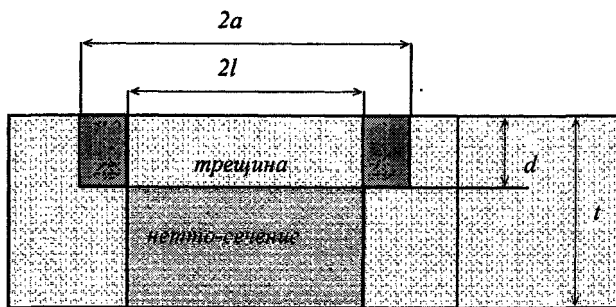


Рис. 1

Если глубина трещины постоянна и материал идеально упругий, то силы, передающиеся через нетто-сечение трещины постоянны. С другой стороны если материал подвержен деформационному упрочнению, то эти силы есть функция от деформации и таким образом зависят от раскрытия трещины, достигая максимума в центре.

3. Критерий разрушения нетто-сечения поверхностной трещины

Для описания разрушения необходимо определить критерий разрушения нетто-сечения поверхностной трещины трубы. По аналогии с критерием разрушения, мы предположим, что разрушение (распространение трещины) возникает когда:

- 1) напряжение в центре трещины достигло критического значения для материала;
- 2) раскрытие трещины в центре трещины достигло критического значения δ_c определенного для каждого материала.

4. Аналитическое решение

На основании схематического описания задачи возможно теоретическое определение напряженно-деформированного состояния трубы с поверхностной трещиной (d - глубина, $2l$ - длина трещины, t - толщина стенки трубы).

Для эллиптических трещин при решении задачи используется конформное преобразование плоскости [7] $z = \omega(\zeta) = n \left(\zeta + \frac{m}{\zeta} \right)$ где параметры $n = \frac{a+b}{2}, m = \frac{a-b}{a-b}$ определяются через параметры эллипса a (большая полуось) и b (малая полуось). В нашем случае для трещины считается, что малая полуось равна нулю. Это означает равенство $m = 1, n = a/2\omega$.

Мы предполагаем, что длина пластической зоны равна действительной длине трещины $2l$ тогда как длина трещины включая зоны пластичности у концов трещины равны $2a$. Эти два параметра связаны соотношением $l = a \cos(\alpha)$, где α - есть вспомогательный параметр.

Граничные условия определяем так: напряжение на бесконечности равно кольцевому напряжению σ_θ , функцию распределения напряжения в нетто-сечении поверхностной трещины, которая зависит от расстояния x от вершины до центра трещины, предела текучести σ_T , предела прочности σ_B , напряжения пластического течения $\bar{\sigma} = k_1 \sigma_B$ предполагаем равной:

$$P(x) = (d-t) \left(\bar{\sigma} - (\bar{\sigma} - k_2 \sigma_T) \left(\sum_{i=1}^k a_i (x/l)^{2i} \right) \right), \quad (1)$$

где k_1 характеризует момент потери устойчивости (напряжение пластического течения $\bar{\sigma}$) пластического деформирования участка около вершины трещины, учитывает коэффициент двухосности нагружения стенки трубы m_0 и показатель деформационного упрочнения n степенной аппроксимации диаграммы деформирования k_2 определяет границу локализованной пластической зоны и зависит от коэффициента поперечной деформации μ . Исходя из условий аналитического решения задачи предполагаем симметричность функции напряжений (1), которая является полиномом четной степени (например, 2 и 4). На рис. 2 показаны распределения напряжения в нетто-сечении для случая полинома 2 степени (вариант 1) и четвертой степени (вариант 2). Предполагаем также, что эти силы распределены независимо от глубины листа. Соответствующее распре-

деление напряжения, которое будет использовано как граничные условия соответствующей плоской задачи упругости, равно $\sigma(x) = P(x)/(d-t)$, в добавлении предполагаем, что напряжение на концах трещины равно $k_2\sigma_T$, что означает равенство $\sum_{i=1}^k a_i = 1$.

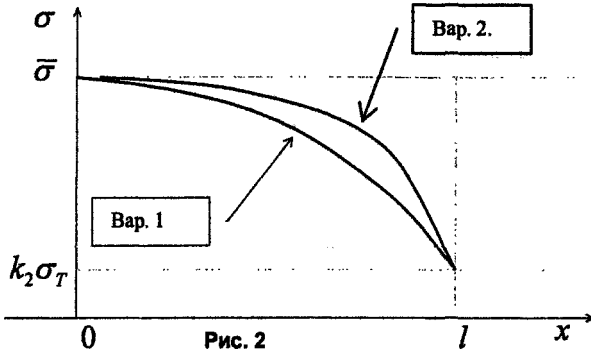


Рис. 2

Используя аппарат функций комплексного переменного Колосова-Мухелишвили [1-2] и разбив задачу на три подзадачи - первая задача состоит в вычислении комплексных потенциалов $\Phi(\zeta)$ и $\Psi(\zeta)$ для напряженного состояния в окрестности трещины (напряжение на границе трещины равно нулю) и напряжение на бесконечности равно σ_θ , вторая задача учитывает напряжение, передаваемое через нетто-сечение трещины, и последняя задача учитывает напряжение на кончиках трещины (в пластической зоне).

В завершении для суммирования этих задач предполагаем, что результирующий комплексный потенциал может быть получен как сумма решений выше перечисленных задач с определенными весами, а именно мерой зоны действия соответствующих сил по принципу суперпозиции. Аналитические решения некоторых выше перечисленных задач можно взять из [1,2].

В качестве результата теоретического анализа получаются следующие два комплексных потенциала $\Phi(\zeta), \Psi(\zeta)$ (громоздкие выкладки не приводятся):

$$\Phi = \frac{a}{\zeta} \left[\frac{\cos(\alpha)}{2} \left(1 - \frac{d}{t}\right) \left(k_1\sigma_B - (k_1\sigma_B - k_2\sigma_T) \sum_{i=1}^k \frac{a_i C_{2i}^i}{2^{2i}} \right) - \frac{\sigma_\theta}{2} \left(\frac{d}{t} + \left(1 - \frac{d}{t}\right) \cos(\alpha) \right) + \frac{\alpha\sigma_T d}{\pi t} \right] +$$

$$+ a \cos(\alpha) \left(1 - \frac{d}{t}\right) \frac{k_1\sigma_B - k_2\sigma_T}{2} \sum_{i=1}^k \frac{a_i}{2^{2i}} \sum_{m=0}^{i-1} C_{2i}^m \left(\frac{\zeta^{2i-2m+1}}{2i-2m+1} - \frac{\zeta^{2i-2m-1}}{2i-2m-1} \right) -$$

$$- \frac{\alpha\sigma_T d}{2\pi i t} \left[\frac{z}{a} \ln \left(\frac{\zeta^2 - e^{2i\alpha}}{\zeta^2 - e^{-2i\alpha}} \right) - \cos(\alpha) \ln \left(\frac{1 - \zeta^2 + 2i\zeta \sin(\alpha)}{1 - \zeta^2 - 2i\zeta \sin(\alpha)} \right) \right], \quad (2)$$

$$\Psi = \frac{2a\zeta}{\zeta^2 - 1} \left[\frac{\cos(\alpha)}{2} \left(1 - \frac{d}{t}\right) \left(k_1\sigma_B - (k_1\sigma_B - k_2\sigma_T) \sum_{i=1}^k \frac{a_i C_{2i}^i}{2^{2i}} \right) - \frac{\sigma_\theta}{2} \left(\frac{d}{t} + \left(1 - \frac{d}{t}\right) \cos(\alpha) \right) + \frac{\alpha\sigma_T d}{\pi t} \right] +$$

$$+ a \cos(\alpha) \left(1 - \frac{d}{t}\right) \frac{k_1\sigma_B - k_2\sigma_T}{2} \sum_{i=1}^k \frac{a_i}{2^{2i}} \sum_{m=0}^{i-1} C_{2i}^m (2i - 2m) \left(\frac{\zeta^{2i-2m+1}}{2i-2m+1} + \frac{\zeta^{2i-2m-1}}{2i-2m-1} \right) -$$

$$- \frac{\alpha\sigma_T d}{2\pi i t} \left[\cos(\alpha) \ln \left(\frac{1 - \zeta^2 + 2i\zeta \sin(\alpha)}{1 - \zeta^2 - 2i\zeta \sin(\alpha)} \right) \right]. \quad (3)$$

Аналогично подходу Дагдейла для исключения разрыва напряжений в концах трещины ($\zeta = \pm 1$), необходимо, чтобы коэффициент $(\zeta^2 - 1)^{-1}$ в выражении (3) функции Ψ был равен нулю. Это приводит к следующему условию:

$$\left[\frac{\cos(\alpha)}{2} \left(1 - \frac{d}{t}\right) \left(k_1\sigma_B - (k_1\sigma_B - k_2\sigma_T) \sum_{i=1}^k \frac{a_i C_{2i}^i}{2^{2i}} \right) - \frac{\sigma_\theta}{2} \left(\frac{d}{t} + \left(1 - \frac{d}{t}\right) \cos(\alpha) \right) + \frac{\alpha\sigma_T d}{\pi t} \right] = 0. \quad (4)$$

Преобразовывая уравнение (4), получим:

$$\left(1 - \frac{d}{t}\right) \left(k_1 \frac{\sigma_B}{\sigma_T} \left(1 - \sum_{i=1}^k \frac{a_i C_{2i}^i}{2^{2i}}\right) + k_2 \sum_{i=1}^k \frac{a_i C_{2i}^i}{2^{2i}} - \frac{\sigma_\theta}{\sigma_T} \right) \cos(\alpha) + \frac{2\alpha d}{\pi t} = \frac{\sigma_\theta d}{\sigma_T t}. \quad (5)$$

Из данного уравнения можно найти параметр a и далее размер пластических зон согласно модели Панасюка-Дагдейла

$$a - l = a(1 - \cos(\alpha)).$$

Далее через комплексный потенциал $\Phi(\zeta)$ из уравнения (2) можно определить раскрытие трещины δ :

$$v = -\frac{4}{E} \operatorname{Re}(i\Phi) = \frac{\delta}{2},$$

$$\delta = \frac{4l\sigma_T}{\pi E} \left[\pi \left(1 - \frac{d}{t}\right) \left(k_1 \frac{\sigma_B}{\sigma_T} - k_2 \right) \sum_{i=1}^k \frac{a_i}{2^{2i}} \sum_{m=0}^{i-1} C_{2i}^m \left(\frac{\sin((2i-2m+1)\theta)}{2i-2m+1} - \frac{\sin((2i-2m-1)\theta)}{2i-2m-1} \right) + \right. \\ \left. + \frac{d}{t} \left(\frac{\cos(\theta)}{\cos(\alpha)} \ln \left| \frac{\sin(\theta-\alpha)}{\sin(\theta+\alpha)} \right| - \ln \left| \frac{\sin \theta - \sin \alpha}{\sin \theta + \sin \alpha} \right| \right) \right]. \quad (6)$$

Уравнение на перемещение v легко получим из следующих соображений: учитывая, что рассматривается случай плоско-напряженного состояния и интересующая точка есть $z = 0$, можно, пользуясь уравнением для v , из [1] получить его в данном виде. Действительно, согласно [1, с. 149]:

$$2\mu(u(x, y) + iv(x, y)) = \kappa\varphi(z) - z\overline{\varphi'(z)} - \overline{\psi(z)}, \quad (7)$$

$$\varphi(\sigma) + \sigma\overline{\varphi'(\sigma)} + \overline{\psi(\sigma)} = f_1 + if_2, \quad (8)$$

где $\kappa = \frac{\lambda+3\mu}{\lambda+\mu}$ и $f_1 + if_2 = i \int_0^\sigma (X_n + iY_n) ds$. Если нам нужно раскрытие трещины в центре, то вы-

числим значение функции v в точке $z = 0$. Складывая формулы (7) и (8) получим:

$$2\mu(u + iv) = (\kappa + 1)\varphi(\sigma) - (f_1 + if_2). \quad (9)$$

Из формулы (9) сравнивая мнимые части, получаем:

$$v = (1/2\mu)((\kappa + 1)\operatorname{Im}(\varphi(\sigma)) - f_2). \quad (10)$$

Далее заметим, что в случае линейной трещины и одноосного напряжения $f_2 = 0$. Данное замечание можно обобщить на случай симметричной трещины и симметричного распределения напряжения. Итого (10) превращается:

$$v = \frac{\kappa+1}{2\mu} \operatorname{Im}(\varphi(\sigma)) = -\frac{\kappa+1}{2\mu} \operatorname{Re}(i\varphi(\sigma)). \quad (11)$$

Осталось учесть, что в плоском случае надо провести замену $\lambda \rightarrow \lambda^* = 2\lambda\mu/(\lambda+2\mu)$ после чего, преобразовывая $\frac{\kappa+1}{2\mu} = 4 \frac{\lambda+\mu}{\mu(3\lambda+2\mu)} = \frac{4}{E}$ из уравнения (11), получаем первую формулу (6).

Использование данной формулы возможно только на границе отверстия.

В уравнении (6) также учтено что $\zeta = e^{i\theta}$. Далее подставляя значение $\theta = \pi/2$ (что характеризует центр трещины) получаем:

$$\delta_c = \frac{4l\sigma_T}{\pi E} \left(\pi \left(1 - \frac{d}{t}\right) \left(k_1 \frac{\sigma_B}{\sigma_T} - k_2 \right) \sum_{i=1}^k a_i A_i + \frac{2d}{t} \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right), \quad (12)$$

где

$$A_i = \frac{1}{2^{2i}} \sum_{m=0}^{i-1} C_{2i}^m (-1)^{i-m} \left(\frac{1}{2i-2m+1} + \frac{1}{2i-2m-1} \right).$$

Критическое раскрытие трещины δ_c есть характеристика материала [6]. Таким образом, формулы (4) и (12) устанавливают связь между геометрическими характеристиками трещины (длина и глубина), характеристиками материала (пределы текучести и прочности σ_T, σ_B) и разрушающим кольцевым напряжением σ_θ .

Из формулы (12) можно определить параметр α по формуле:

$$\alpha = 2 \operatorname{tg}^{-1} \left(\exp \left(\frac{t}{d} \left(\frac{\delta_c \pi E}{8 l \sigma_T} - \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{d}{t} \right) \left(k_1 \frac{\sigma_B}{\sigma_T} - k_2 \sum_{i=1}^k a_i A_i \right) \right) \right) \right) - \frac{\pi}{2}. \quad (13)$$

Далее воспользовавшись выражением (5) определяем отношение σ_θ / σ_T :

$$\frac{\sigma_\theta}{\sigma_T} = \frac{\frac{2\alpha d}{\pi t} + \cos(\alpha) \left(1 - \frac{d}{t} \right) \left(k_1 \frac{\sigma_B}{\sigma_T} \left(1 - \sum_{i=1}^k a_i \frac{C_{2i}^i}{2^{2i}} \right) + k_2 \sum_{i=1}^k a_i \frac{C_{2i}^i}{2^{2i}} \right)}{\left(\frac{d}{t} \right) + \left(1 - \frac{d}{t} \right) \cos \alpha}. \quad (14)$$

Для проверки теоретического анализа были взяты экспериментальные данные, после чего проведено сравнение экспериментальных и аналитических результатов, вычисленных по формулам (13) и (14). В качестве примера приведены табл. 1, 2. Экспериментальные данные табл. 1 взяты из работ Даффи А., проведенных в США [4], для стали X-52 и из [5] - для российских труб большого диаметра, испытанных в ООО «ВНИИСТ» (Москва) (см. табл. 2). Критическое раскрытие трещины δ_c трубных сталей приведено в [6]. Средняя погрешность полученных результатов составила менее 6% (см. табл. 1) и 5,5% (см. табл. 2).

Данные для труб из табл. 1: $R = 380$ мм, $t = 9,5$ мм, $\delta_c = 0,27$ мм.

Таблица 1

№ п/п	Марка стали	σ_T , МПа	σ_B , МПа	d/t	l , мм	Разрушающее давление (МПа) и погрешности вычисления (в %)				
						$\sigma_\theta^{\text{экс}}$	σ_θ^{B1}	σ_θ^{B2}	погр. вар.1	погр. вар.2
1	X-52	449,3	586,4	0,3895	180	372	363,03	370,56	2,41025	0,3867
2	-----	449,3	593,5	0,3895	111	406	383,5	390,16	5,54095	3,9014
3	-----	428,9	574,4	0,6	179	249	265,32	270,48	6,55605	8,6261
4	-----	428,9	574,4	0,6	103,5	287	298,83	303,39	4,12269	5,7107
5	-----	448,6	564,6	0,8105	36	390	350,97	351,83	10,007	9,7866
	Среднее								5,72748	5,6823

Данные для труб из табл. 2: $\delta_c = 0,27$ мм; 08Г2ФБТ ($R = 710$ мм, $t = 15,7$ мм); X-70 ($R = 710$ мм, $t = 16,0$ мм); 13Г1С ($R = 610$ мм, $t = 12,0$ мм).

Таблица 2

№ п/п	Марка стали	σ_T , МПа	σ_B , МПа	d/t	l , мм	Разрушающее давление (МПа) и погрешности вычисления (в %)				
						$\sigma_\theta^{\text{экс}}$	σ_θ^{B1}	σ_θ^{B2}	погр. вар.1	погр. вар.2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	AISI 304	150,92	426,3	0,5	75	161,7	157,3	169,2	2,73754	4,6406
2	-----	147	416,5	0,77	75	95,2	89,98	95,4	5,53663	0,1488
3	-----	140,14	408,66	0,9	50	52,7	54,8	57,1	3,95382	8,2372
4	-----	146,02	414,54	0,914	20	86	77,9	79,53	9,48442	7,5698
5	Среднее								5,4281	5,1491

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	X-70	435,4	622	0,6	225	317	286,95	293,37	9,48053	7,4556
7	13Г1С	402,2	519	0,5417	150	274	241,66	246,64	11,8046	9,9841
8	08Г2ФБТ	535,5	653	0,5172	260	328	333,07	338,41	1,54592	3,1734
9	08Г2ФБТ	546,9	667	0,5414	260	323	322,94	328,11	0,01797	1,5822
10	08Г2БТ	483	600	0,694	222,5	232	223,11	226,36	3,83149	2,4327
11	Среднее								5,33611	4,9256

В табл. 1, 2 приведены расчеты по двум различным вариантам для функции $P(x)$. В первом варианте функция взята равной $P(x) = x^2$, во втором - равной $P(x) = x^4$. Используя такие таблицы для различных параметров трещины, можно решить обратную задачу, а именно найти критические параметры (глубину и длину) трещины для заданного кольцевого напряжения. Такая трактовка задачи даст возможность нормировать поверхностные трещины из соображений безопасной эксплуатации трубопроводов.

5. Практическое применение полученных результатов

Для широко распространенной низколегированной марки стали 17Г1С-У $\sigma_T = 360$ МПа, $\sigma_B = 520$ МПа, $\sigma_\theta = \sigma_T(\sigma_B)/n$, где $n = 2$ - коэффициент запаса, с помощью предложенного теоретического аппарата при решении данной задачи построены ниже приведенные табл. 3, 4 с раскрытием $\delta_c = 0,12$ мм и $\delta_c = 0,09$ мм по двум вышеописанным вариантам.

Если трубопровод подвергался внешним неблагоприятным воздействиям (старение, температура, длительный эксплуатация), то процесс разрушения характеризуется снижением раскрытия трещины с $\delta_c = 0,12$ мм до $\delta_c = 0,09$ мм. Поэтому получаются другие размеры поверхностного дефекта (длина трещины уменьшается).

Таблица 3

d/t	Длина трещины 2l									
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
0,5	31,56	28,28	26,83	26,002	25,464	25,085	24,805	24,588	24,416	24,276
0,6	29,08	24,84	23,01	21,994	21,346	20,897	20,567	20,314	20,115	19,953
0,7	26,29	21,1	18,96	17,787	17,052	16,548	16,181	15,902	15,683	15,506

Таблица 4

d/t	Длина трещины 2l									
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
0,5	31,97	28,93	27,54	26,734	26,205	25,831	25,552	25,337	25,165	25,025
0,6	29,45	25,36	23,58	22,572	21,929	21,482	21,152	20,9	20,701	20,539
0,7	26,58	21,5	19,38	18,214	17,482	16,98	16,614	16,335	16,116	15,939

С точки зрения новой теоретической модели согласно полученным табл. 3 и 4, задавшись внутренним статическим давлением и коэффициентом запаса 2, были вычислены предельная относительная глубина d/t и длина трещины $2l$ (мм) при $\delta_c = 0,12$ мм при различных кольцевых напряжениях σ_θ (180 МПа и 260 МПа).

Таблица 5

180 МПа	Вар. 1		Вар. 2	
	d/t	0,7	0,7	
	2l	250	275	

Таблица 6

260 МПа	Вар. 1		Вар. 2	
	d/t	0,5	0,5	
	2l	250	350	

при $\delta_c = 0,09$ мм

Таблица 7

180 МПа	Вар. 1	Вар.2
	d/t	0,7
$2l$	180	220

Таблица 8

260 МПа	Вар. 1	Вар.2
	d/t	0,5
$2l$	200	250

Таким образом, с увеличением разрушающего кольцевого напряжения σ_θ труб большого диаметра с 180 МПа до 260 МПа относительная глубина d/t поверхностного дефекта снижается с 0,7 до 0,5 для обоих вариантов и значений раскрытия трещины δ_c . Когда δ_c снижается с 0,12 мм до 0,09 мм длина поверхностной трещины уменьшается с 250 до 200 мм по первому варианту и с 350 до 250 мм по второму варианту.

6. Выводы

1. Проведен теоретический анализ методом теории функций комплексного переменного Мухелишвили по определению разрушающего кольцевого напряжения при вязком разрушении тонкостенных труб, сосудов давления с продольной поверхностной трещиной на основе раскрытия трещины. Показано хорошее соответствие новых теоретических формул и экспериментальных натуральных гидравлических испытаний А. Даффи и российских ученых. Погрешность составила не более 6 %.

2. Предложена новая математическая модель распределения напряжений в нетто-сечении поверхностной трещины трубы на основе напряжения пластического течения $\bar{\sigma}$; коэффициента определяющего границу локализованной пластической зоны с учетом коэффициента поперечной деформации и деформационного упрочнения трубной стали.

3. Получены нормы отбраковки поверхностных трещин трубопроводов, сосудов давления, теплотрасс, водоводов, которые полезны при их диагностике и капитальном ремонте. Максимальная относительная глубина трещины равна 70% от толщины стенки трубы, а максимальная длина трещины равна 180 мм при коэффициенте запаса равного 2.

Работа поддержана грантом РФФИ 05-08-18179а.

Литература

1. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. - М. 1966.-708 с.
2. Гудьер Дж. Математическая теория равновесных трещин - Разрушение. - М.: Мир, 1975. - Т.2.-С. 13-82.
3. Dugdale D.S. Yielding of steel sheets containing splits. //J. Mech. Phys. Solids. - 1960. - V. 8. - P. 100-104.
4. Duffy A.R., Eiber R.J., Maxey W.A. Recent work on flaw behavior in pressure vessels. // Symp. Frac. Toughness Concepts, UKAEA, England. - 1965.
5. Применение модели вязкого разрушения труб с осевым дефектом для анализа результатов натуральных экспериментов / И.В. Орыняк, С.В. Ляшенко, В.М. Тороп, В.Н. Горицкий // Проблемы прочности. - 1996. - № 6. - С. 5-15.
6. Красовский А.Я., Красику В.Н. Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов. - Киев: Наук, думка, 1990. - 176 с.
7. Шабат Б.В. Введение в комплексный анализ. 4.1. Функции одного переменного. - М: Лань, 2004.

Поступила в редакцию 17 июля 2006 г.