КОЭФФИЦИЕНТЫ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ТРУБ С НЕСКВОЗНЫМИ ТРЕЩИНАМИ

© 2008 С.Н. Перов¹, Ю.В. Скворцов¹, К.А. Цапурин²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет ² ООО "КМГ"

В настоящей статье приводятся результаты МКЭ-расчета коэффициентов интенсивности напряжений для различных труб с несквозными поверхностными трещинами. Дефекты имеют полуэллиптическую форму, располагаются на наружной или внутренней поверхности трубы и ориентированы в осевом или окружном направлении.

Современные требования к конструкциям в отношении минимизации их металлоемкости и повышения эффективности не позволяют гарантировать отсутствие местных повреждений в течение полного срока эксплуатации. Они могут содержать различного рода дефекты, в том числе трещины той или иной длины.

Опыт эксплуатации машин и механизмов показал, что даже разработанная самым тщательным образом программа контроля качества элементов конструкций не может исключить источники образования трещин и их появление в процессе эксплуатации. Наличие трещин вовсе не означает, что конструкция не может работать в данных конкретных условиях. Если металл вязкий, то трещины даже сравнительно большой длины не вызывают его разрушения. И, наоборот, в хрупких металлах малые трещины могут привести к катастрофическому их распространению при средних уровнях напряжений, остающихся существенно ниже предела текучести.

Расчеты на прочность элементов конструкций при однократном (статическом или динамическом) нагружении основаны на номинальных разрушающих напряжениях, назначаемых по таким характеристикам, как предел прочности, предел текучести и т.д. Наличие технологических и других дефектов существенно снижает величину разрушающих напряжений. В таких условиях стандартные характеристики механических свойств (у_в, у_{0,2} и др.) не определяют в полной мере поведение материала в реальных условиях эксплуатации, а оценка несущей способности элементов конструкций традиционными методами в случае возникновения хрупких состояний оказывается недостаточно обоснованной.

Поэтому для анализа сопротивления элементов конструкций хрупкому разрушению необходимо использовать энергетические (интенсивность освобождения энергии G), силовые (коэффициенты интенсивности напряжений K_1 , K_{11} и K_{111}) или деформационные (раскрытие в вершине трещины д) критерии механики разрушения, основанные на рассмотрении напряженного и деформированного состояния в зонах возникновения, распространения и остановки трещин.

Следует отметить, что в магистральных трубопроводных системах наиболее часто встречаются несквозные поверхностные трещиноподобные дефекты, форма которых близка к полуэллиптической. Они могут быть ориентированы в осевом или окружном направлении, располагаться на наружной или внутренней поверхности трубы (рис. 1). Данные дефекты имеют трехмерный характер, что в значительной степени затрудняет вычисление параметров механики разрушения.

Настоящая работа посвящена вычислению коэффициентов интенсивности напряжений для различных несквозных трещин полуэллиптической формы с использованием МКЭ-пакета ANSYS. При этом расчеты проводятся для наиболее применяемых на территории Российской Федерации типоразмеров труб (наружный диаметр – 530, 720, 820, 1020 и 1220 мм; толщина стенки от 8 до 16 мм).

При моделировании осевой наружной полуэллиптической трещины рассматривает-



а) осевая наружная трещина



в) окружная наружная трещина



б) осевая внутренняя трещина



г) окружная внутренняя трещина



ся трубопровод, находящийся под действием внутреннего давления p. Учитывая трехмерный характер данного дефекта, здесь необходимо построить объемную модель фрагмента стенки трубы, в центре которого располагается трещина. Благодаря двойной симметрии можно ограничиться рассмотрением лишь четверти этого фрагмента (рис. 2, t – толщина стенки трубы; a – половина длины трещины; l – ее глубина). Моделируемая часть стенки трубы должна быть такой, чтобы граничные условия не оказывали какого-либо значительного влияния на критическую область вблизи дефекта. В нашем случае размер фрагмента *s* определяется по формуле

$$s = 2\max(a, l). \tag{1}$$

Следует отметить, что увеличение данного размера практически не приводит к изменению результатов расчета.

Для идеализации рассматриваемого фрагмента используются объемные элементы SOLID45. При этом для моделирования сингулярности напряжений и деформаций вблизи фронта дефекта применяются специальные квадратичные конечные элементы SOLID95 с промежуточными узлами, смещенными на четверть длины стороны к вершине трещины. Методика конечно-элементного моделирования трещин подробно описана в работе [1], где приведен полный текст макроса, предназначенного для построения объемных сингулярных элементов SOLID95 вокруг фронта трещины из элементов SOLID45.

Нагружение здесь осуществляется давлением p, которое прикладывается к внутренней поверхности трубы. В качестве граничных условий по всем боковым граням (за исключением узлов, расположенных на поверхности трещины) задаются условия симметрии. Параметры, характеризующие физические свойства материала трубы, приняты следующими: модуль упругости $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Для автоматизации процесса генерации конечно-элементной модели составлен макрос, позволяющий строить фрагменты стенки для разных труб и размеров трещины.

Вычисление коэффициента интенсивности напряжений K_1 осуществляется в двух точках вдоль фронта трещины: внутри стенки, в точке A, и на свободной поверхности, в точке B (рис. 2). Для этих целей используется встроенная в программу команда *KCALC*. Для правильной работы данной команды предварительно требуется определить локальную систему координат, связанную с трещиной, а также задать путь вдоль поверхности дефекта [1]. При этом в точке A принимается допущение о плоской деформации, а



Рис. 2. Часть стенки трубы с осевой наружной трещиной

в точке *B* – допущение о плоском напряженном состоянии.

Расчеты проводились для труб с различными геометрическими размерами поперечного сечения при действии единичного давления *p*. Анализ полученных результатов показывает, что безразмерный коэффициент, вычисляемый по формуле

$$M_{p} = \frac{K_{1}t}{pR_{m}\sqrt{\pi l}},$$
 (2)

с достаточно высокой точностью является инвариантным как по отношению к диаметру трубы D, так и к толщине стенки t. Здесь $R_{cp} = (D - t)/2$ – средний радиус трубы.

В табл. 1 приведены осредненные значения безразмерного коэффициента M_p , а в табл. 2 представлены максимальные отклонения значений этой величины, вычисленных для разных труб, от средних.

Моделируемая часть фрагмента с осевой внутренней полуэллиптической трещиной представлена на рис. 3. Здесь также нагружение осуществляется внутренним давлением р. Однако в отличие от предыдущего случая его необходимо прикладывать не только к внутренней поверхности трубы, но и к поверхности трещины. Учет этого обстоятельства приводит к некоторому увеличению значений коэффициента интенсивности напряжений. В табл. 3 и 4 приведены осредненные значения безразмерного коэффициента (см. формулу (2)) и максимальные отклонения от этих значений соответственно. Незначительные отклонения свидетельствуют о том, что и в случае внутренней трещины коэффициент М_п практически не зависит от геометрических размеров поперечного сечения трубы.

Для трубы с окружной трещиной определяющими являются осевые (продольные) напряжения у. Рассматриваемые части стенки трубы с наружной и внутренней полуэллиптическими трещинами изображены на рис. 4 и 5 соответственно.

Точка		В						
l/t l/a	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8
0,2	1,076	1,271	1,558	1,938	0,486	0,575	0,737	1,068
0,4	0,934	1,030	1,153	1,262	0,621	0,710	0,856	1,056
0,6	0,815	0,870	0,939	1,001	0,665	0,728	0,843	0,993
0,8	0,715	0,751	0,800	0,844	0,675	0,721	0,808	0,920
1,0	0,631	0,661	0,699	0,734	0,664	0,700	0,766	0,853
2,0	0,400	0,410	0,415	0,424	0,565	0,580	0,597	0,624

Таблица 1. Безразмерный коэффициент М, для осевой наружной трещины

Таблица 2. Максимальные отклонения для осевой наружной трещины

Точка		A			В			
l/t l/a	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8
0,2	1,15%	0,91%	0,81%	2,31%	0,76%	0,92%	1,17%	1,27%
0,4	0,93%	0,71%	0,51%	0,75%	1,09%	1,07%	1,45%	0,75%
0,6	0,96%	0,93%	0,51%	0,16%	0,92%	1,14%	0,91%	0,69%
0,8	0,93%	0,72%	0,49%	0,43%	0,94%	1,20%	0,90%	0,43%
1,0	1,18%	0,74%	0,85%	0,43%	1,05%	1,09%	0,95%	0,85%
2.0	1.36%	1.06%	0.76%	0.80%	2.21%	2.62%	2.53%	2.07%



Рис. 3. Часть стенки трубы с осевой внутренней трещиной



Рис. 5. Часть стенки трубы с окружной внутренней трещиной



Рис. 4. Часть стенки трубы с окружной наружной трещиной

Расчеты здесь проводились при осевом растяжении различных труб единичными напряжениями у. При этом анализ результатов показывает, что не зависящим от диаметра и толщины стенки трубы в обоих случаях (за исключением двух значений в точке *B*, соответствующих трещинам очень большой длины) является следующий безразмерный коэффициент:

$$M_{\sigma} = \frac{K_{\rm I}}{\sigma \sqrt{\pi l}}.$$
 (3)

В табл. 5 и 7 приведены осредненные

Точка		A			В			
l/t	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8
0,2	1,121	1,295	1,528	1,824	0,518	0,609	0,764	1,062
0,4	0,974	1,059	1,164	1,252	0,655	0,743	0,887	1,076
0,6	0,851	0,898	0,959	1,011	0,700	0,764	0,879	1,015
0,8	0,746	0,778	0,820	0,858	0,710	0,755	0,842	0,948
1,0	0,658	0,685	0,716	0,749	0,698	0,735	0,798	0,885
2,0	0,419	0,425	0,428	0,432	0,610	0,623	0,641	0,664

Таблица 3. Безразмерный коэффициент	M,	для осевой	внутренней	трещины
-------------------------------------	----	------------	------------	---------

Точка		_		В				
l/t l/a	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8
0,2	1,15%	0,87%	1,52%	3,04%	1,24%	1,22%	2,23%	3,00%
0,4	1,30%	1,19%	0,32%	1,11%	1,33%	1,71%	1,21%	1,13%
0,6	1,11%	0,88%	0,50%	0,68%	1,38%	1,61%	0,95%	0,91%
0,8	1,19%	0,75%	0,68%	0,50%	1,34%	1,61%	0,83%	1,08%
1,0	1,21%	1,13%	0,76%	0,50%	1,03%	1,27%	1,31%	0,99%
2,0	1,20%	1,22%	0,76%	0,50%	1,24%	1,38%	1,40%	3,11%

Таблица 4. Максимальные отклонения для осевой внутренней трещины

Точка		A	-		В			
l/t l/a	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8
0,2	1,121	1,309	1,529	1,764	0,509	0,558	0,649	0,752
0,4	1,000	1,109	1,222	1,293	0,674	0,789	0,964	1,191
0,6	0,890	0,957	1,016	1,036	0,740	0,843	1,002	1,191
0,8	0,796	0,834	0,866	0,867	0,771	0,847	0,978	1,125
1,0	0,715	0,739	0,753	0,746	0,785	0,835	0,939	1,051
2,0	0,419	0,428	0,427	0,425	0,608	0,644	0,672	0,699

Таблица 5. Безразмерный коэффициент М, для окружной наружной трещины

Таблица 6. Максимальные отклонения для окружной наружной трещины

Точка		A	_		В			
l/t l/a	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8
0,2	0,60%	0,74%	0,63%	0,72%	1,00%	2,49%	8,79%	8,86%
0,4	0,23%	0,12%	0,11%	0,24%	0,37%	0,31%	0,50%	1,48%
0,6	0,14%	0,09%	0,10%	0,22%	0,40%	0,29%	0,14%	0,67%
0,8	0,20%	0,12%	0,08%	0,13%	0,15%	0,31%	0,24%	0,67%
1,0	0,11%	0,13%	0,11%	0,13%	0,54%	0,24%	0,08%	0,33%
2,0	0,71%	0,12%	0,14%	0,27%	3,16%	0,40%	0,39%	0,37%

Таблица 7. Безразмерный коэффициент М, для окружной внутренней трещины

Точка		A			В			
l/t l/a	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8
0,2	1,123	1,314	1,529	1,771	0,505	0,598	0,724	0,920
0,4	0,999	1,106	1,212	1,280	0,658	0,764	0,921	1,100
0,6	0,886	0,950	1,007	1,026	0,717	0,813	0,953	1,105
0,8	0,793	0,831	0,860	0,860	0,753	0,823	0,938	1,060
1,0	0,712	0,735	0,750	0,742	0,772	0,814	0,909	1,005
2,0	0,420	0,425	0,425	0,423	0,609	0,632	0,654	0,677

Таблица 8. Максимальные отклонения для окружной внутренней трещины

Точка			В					
l/t l/a	0,2	0,4	0,6	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8
0,2	0,71%	0,61%	1,05%	0,69%	1,45%	0,29%	2,42%	3,47%
0,4	0,22%	0,52%	0,31%	0,24%	0,92%	0,39%	1,17%	2,26%
0,6	0,26%	0,17%	0,20%	0,10%	0,46%	0,33%	0,53%	1,27%
0,8	0,13%	0,15%	0,17%	0,09%	0,42%	0,67%	0,51%	0,88%
1,0	0,20%	0,09%	0,12%	0,16%	0,39%	0,17%	0,40%	0,59%
2,0	0,34%	0,11%	0,17%	0,04%	1,22%	0,34%	0,49%	0,36%

значения безразмерного коэффициента M_y , а в табл. 6 и 8 максимальные отклонения от этих значений соответственно для наружной и внутренней трещины.

Таким образом, зная величину рабочего давления *р* и локальных осевых напряжений

у, расчет коэффициентов интенсивности напряжений для труб с осевой и окружной трещиной можно выполнять соответственно по формулам

$$K_{\rm I} = M_{\rm p} \frac{pR_{\rm cp}}{t} \sqrt{\pi l} , \qquad (4)$$

$$K_{\rm I} = M_{\sigma} \,\sigma \sqrt{\pi l} \,. \tag{5}$$

При этом значения безразмерных коэффициентов M_p и M_y следует определять по табл. 1, 3, 5 и 7 в зависимости от размеров, расположения и ориентации трещины (при необходимости используя интерполяцию).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обеспечение надежности трубопроводных систем / С.Н. Перов, С.И. Аграфенин, Ю.В. Скворцов, Ю.Л. Тарасов. Самара: СамНЦ РАН, 2008.

STRESS INTENSITY FACTORS FOR THE PIPES WITH THE NONTHROUGH CRACKS

© 2008 S.N. Perov¹, Yu.V. Skvortsov¹, K.A. Tsapurin²

¹Samara State Aerospace University ²Capital Management Group

The results of stress intensity factors for different pipes with surface cracks definition using finite elements method are presented in this paper. The cracks of semi elliptical shape are located on outer or inner surface of the pipe and they are oriented in either axial or circumferential direction.