

# СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ПОДХОДОВ В ОПРЕДЕЛЕНИИ КРИТИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ДЕФЕКТОВ В ТРУБОПРОВОДАХ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

А.Е. Лукахин, С.Л. Лякишев

Наличие дефектов в трубопроводах и конструкциях традиционно ассоциируется с опасностью хрупкого разрушения. Инженерные методы линейной механики разрушения, основанные на использовании коэффициентов интенсивности напряжений, хорошо отработаны и используются в расчетах на сопротивление хрупкому разрушению конструкций и трубопроводов, изготовленных из сталей перлитного класса.

В реальности же разрушения, связанные с развитием трещин, чаще всего происходят по вязкому или квазихрупкому механизму, а в конструкциях, изготовленных из материалов аустенитного класса, вовсе не происходит хрупкого разрушения. Инженерные методы расчета предельных пластических (вязких) состояний по сравнению с хрупкими практически не разработаны.

Существует ряд отечественных нормативных документов, в которых изложены подходы к определению допускаемых размеров дефектов в конструкциях, последним из которых разработан РД ЭО 1.1.2.05.0330-2012. В соответствии с документом М-02-91 анализ допустимости дефектов в конструкциях, изготовленных из стали аустенитного класса, проводится только по предельным пластическим состояниям. Однако, в РД ЭО 1.1.2.05.0330-2012 методика определения допускаемых дефектов по предельным состояниям вовсе отсутствует, а нужные методики присутствуют в отечественных документах М-02-91 и МР 125-02-95.

В настоящей статье проводится сравнение методик определения допустимых дефектов, приведенных в отечественном документе МР 125-02-95 и зарубежном документе ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE. Section XI. Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components (код ASME). Сравнение проводится на примере расчета дефекта в трубопроводе соединительном 426×40 мм системы компенсации давления реакторной установки типа ВВЭР, изготовленном из хромоникелевой коррозионно-стойкой стали аустенитного класса - 08X18H10T. Трубопровод рассматривается в режиме нормальной эксплуатации (НЭ) при температуре 350 °С и при расчетном давлении 16,7 МПа. Для примера рассмотрены только дефекты, ориентированные в осевом направлении, как наиболее опасные с точки зрения подроста дефектов.

В качестве рассматриваемого постулируемого дефекта консервативно принята поверхностная полуэллиптическая трещина с геометрическими параметрами, представленными на рисунке 1.

Напряженно-деформированное состояние рассматриваемого трубопровода было получено ранее в расчетах статической прочности. Полученные в этих расчетах напряжения были использованы для определения допустимого дефекта.

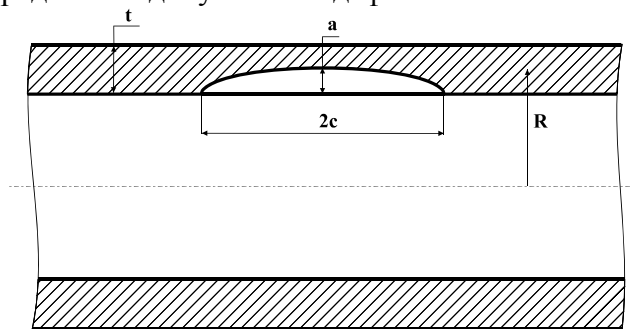


Рис. 1 Геометрические параметры рассматриваемого дефекта

Поиск критического размера  $a_{кр}$  для поверхностных трещин по каждой из двух рассматриваемых методик проводится в области варьируемых значений соотношения полуосей трещины  $a/c$ . Поиск значений  $a_{кр}$  ведется итеративно.

На каждой итерации алгоритм поиска можно разбить условно на следующие шаги.

1. Задается начальный размер малой полуоси трещины  $a_0$ . На первой итерации принимается  $a_0=0,1$  мм.

2. Определяются значения напряжений в стенке трубопровода с расчетной трещиной с учетом коэффициентов запаса, принятых на основе методики, по напряжениям для режимов НЭ.

3. Определяются допускаемые напряжения для расчетного трубопровода с трещиной, имеющей расчетные размеры ( $a$ ,  $c$ ), по предельному состоянию, принятому как потеря несущей способности (пластический коллапс) по механизму вязкого разрушения – для основного металла трубопроводов.

4. Проводится проверка условия прочности согласно рассматриваемой методике для основного металла в точке вершины трещины. Если условие прочности выполняется, то начальный размер трещины  $a_0$  увеличивается на 0,1 мм и процесс решения возвращается к шагу 1. Иначе критический размер трещины  $a_{кр}$  вычисляется по формуле:

$$a_{кр} = a_0 - 0,1 \text{ мм.} \quad (1)$$

В данном примере рассматривается общий случай и не учитывается циклический подрост дефекта, который в частном случае для конкретного оборудования определяется по уравнениям, приведенным в РД ЭО 1.1.2.05.0330-2012 исходя из режимов работы конкретного оборудования.

Для трубопроводов с поверхностными полуэллиптическими трещинами напряжения в соответствии с документом МР 125-02-95 не должны превышать значений:

$$\sigma_m = k_F \cdot \sigma_F \cdot \eta, \quad (2)$$

где  $k_F$  - коэффициент ослабления сечения с дефектом;

$\eta=1$  - для расчета на общую пластическую нестабильность.

$$k_F = \frac{G - a/t}{G + (a/t) \cdot (t/R) \cdot (1 - a/c)^4}, \quad (3)$$

где  $t$  - толщина стенки трубопровода, мм;

$\sigma_F = 0,5 \cdot (R_{p0,2}^T + R_m^T)$  - напряжения пластической нестабильности,

$\sigma_m$  - кольцевые мембранные напряжения в рассматриваемом режиме НЭ.

$$G = 1 + \frac{1}{\pi} \cdot \frac{a/c}{a/t} \cdot \left[ 1 - \frac{a}{t} \right]^{0,1}, \quad (4)$$

Для определения допускаемого осевого дефекта в коде ASME используются следующая аналитическая зависимость:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_F}{SF_m} \left( \frac{1 - a/t}{1 - \frac{a/t}{M_2}} \right), \quad (5)$$

где  $M_2 = [1 + (1,61/4 \cdot R \cdot t) \cdot c^2]^{0,5}$  - параметр формы трещины,

структурный фактор  $SF_m = 2,7$  - для режимов НЭ,

$\sigma_F = 0,5 \cdot (R_{p0,2}^T + R_m^T)$  - напряжения пластической нестабильности,

$\sigma_m$  - кольцевые мембранные напряжения в рассматриваемом режиме НЭ.

В обоих случаях для постулируемых трещин рассматривались трещины с соотношением  $a/c$  от 0,3 до 0,7, так как в отечественной и международной практике наиболее опасными считаются трещины с таким соотношением. В таблице приведены результаты определе-

ния критических размеров постулируемого осевого дефекта в рассматриваемом трубопроводе по методикам МР 125-02-95 и кода ASME для наиболее опасных соотношений а/с.

### Результаты определения критических размеров постулируемого дефекта

а/с	а <sub>кр</sub> , мм	
	МР-125-02-95	код ASME
0,3	31,8	27,6
0,4	32,8	30,2
0,5	33,7	32,1
0,6	34,5	33,5
0,7	35,2	34,6

Выводы:

В наиболее новом отечественном документе РД ЭО 1.1.2.05.0330-2012 отсутствует методика определения допускаемых размеров дефектов по предельным пластическим состояниям, необходимая для определения таких дефектов в трубопроводах, изготовленных из аустенитной стали.

В рассмотренном в данной статье отечественном документе МР 125-02-95 присутствует необходимая нам методика, но сам документ был выпущен более 20 лет назад. Код ASME имеет современные подходы к определению допустимых дефектов в аустенитных трубопроводах и последняя на данный момент его редакция была выпущена в 2015 году.

Stress Ratio [Note (2)]	Nondimensional Flaw Length, $\ell_f / (R_m t)^{0.5}$ [Note (3)]										
	0.0	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	12.0 or Greater
≥ 1.00	0.75	[Note (4)]	[Note (4)]	[Note (4)]	[Note (4)]	[Note (4)]	[Note (4)]	[Note (4)]	[Note (4)]	[Note (4)]	[Note (4)]
0.90	0.75	0.70	0.42	0.23	0.17	0.15	0.14	0.13	0.12	0.12	0.11
0.80	0.75	0.75	0.62	0.40	0.32	0.28	0.26	0.25	0.24	0.23	0.22
0.70	0.75	0.75	0.73	0.53	0.44	0.40	0.38	0.36	0.35	0.34	0.33
0.60	0.75	0.75	0.75	0.64	0.55	0.51	0.49	0.47	0.45	0.44	0.43
0.50	0.75	0.75	0.75	0.72	0.65	0.61	0.59	0.57	0.55	0.54	0.53
0.40	0.75	0.75	0.75	0.75	0.74	0.70	0.68	0.67	0.65	0.64	0.63
0.30	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.74	0.73	0.73
≤ 0.20	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75

NOTES:  
(1) Flaw depth =  $a_{allow}$  for a surface flaw  
=  $2 a_{allow}$  for a subsurface flaw  
 $t$  = pipe wall thickness  
Linear interpolation is permissible.  
(2) Stress Ratio =  $SF_m \sigma_h / \sigma_f$  for limit load analysis  
=  $Z(SF_m) \sigma_h / \sigma_f$  for EPFM analysis  
 $\sigma_h = pR_m / t$ , where  $R_m$  = mean pipe radius,  $p$  = internal pressure  
 $\sigma_f$  = flow stress  
 $Z$  = Z-factor load multiplier for axial part-through-wall flaw  
(3)  $\ell_f$  = end-of-evaluation-period flaw length  
 $\ell_f$  shall be limited to less than  $\ell_{allow}$ , where  
 $\ell_{allow} = 1.58(R_m t)^{0.5} [(\sigma_f / \sigma_h)^2 - 1]^{0.5}$  for limit load analysis  
 $\ell_{allow} = 1.58(R_m t)^{0.5} [(\sigma_f / Z \sigma_h)^2 - 1]^{0.5}$  for EPFM analysis  
 $Z$  = Z-factor load multiplier for axial part-through-wall flaw  
(4) Acceptance standards for the applicable class shall be used.

Рис.2 Пример таблицы из кода ASME для определения допустимого дефекта

При определении размеров допустимых дефектов по каждой из методик имелись одинаковые исходные данные, и не учитывался подрост трещин от циклических нагрузок в процессе эксплуатации трубопровода. Из опыта расчета циклического подраста трещин для трубопроводов, изготовленных из аустенитной стали, видно, что рост дефекта за весь срок эксплуатации незначителен, что также имеет и экспериментальные подтверждения. В данном примере также не учитывалось указанное в коде ASME ограничение, что величина допустимого дефекта не должна превышать  $0,75t$ . В методике MP 125-02-95 отсутствуют ограничения на величину допустимого дефекта относительно толщины стенки  $t$ . В целом видно, что обе методики имеют схожие подходы в определении допустимых дефектов. Из таблицы 1 видно, что полученные результаты для обеих методик похожи. Многие отечественные методики, включенные в нормативные документы, в своей основе содержат схожие с кодом ASME формулы. Однако, код ASME имеет альтернативный к аналитическому решению подход к определению допустимого размера дефекта по приведенным в нем таблицам (TABULAR SOLUTION). В данном методе глубина допустимого осевого дефекта выбирается из таблицы, приведенной на рисунке 2, исходя из соотношений длины дефекта с учетом подраста на конец эксплуатации и геометрических размеров трубы (средний радиус и толщина стенки), а также отношения расчетных напряжений, возникающих в сечении трещины в рассматриваемом режиме, к напряжениям пластической неустойчивости. Из данной таблицы хорошо видно, что максимальный размер осевого дефекта не может превышать 75% от толщины стенки. Данный подход удобен и широко применяется за рубежом.

Существующие отечественные методы разрознены, и отсутствие в РД ЭО 1.1.2.05.0330-2012 подходов по оценке дефектов по предельным пластическим состояниям приводит к вопросу о том, чем руководствоваться инженеру при выполнении расчетов. Видна необходимость доработки или разработки нормативного документа, в котором бы были указаны четкие методы решения задач по определению допускаемых размеров дефектов в трубопроводах и оборудовании, изготовленных из стали аустенитного класса, и данные методики должны быть обоснованы экспериментально.