

Механика разрушений

**ПРЕДЕЛЬНО-ДОПУСТИМЫЕ ДЕФЕКТЫ В
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНУТРЕННЕГО
ДАВЛЕНИЯ**

Е.В. КУЗНЕЦОВА, кандидат технических наук, доцент
Г.Л. КОЛМОГОРОВ, доктор технических наук, профессор
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614000 г. Пермь, Комсомольский пр. 29, ПНИПУ,
кафедра «Динамика и прочность машин», mellen75@mail.ru

В работе предлагается методика расчёта критических размеров микродефектов и несплошностей на поверхностях цилиндрических оболочек, находящихся под внутренним давлением. Приведены подходы механики разрушения, учитывающие коэффициенты интенсивности напряжений при определении предельно-допустимых соотношений размеров несквозных полуэллиптических трещин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микродефекты, несплошности, трещины, коэффициент интенсивности напряжений, вязкость разрушения, цилиндрические оболочки, внутреннее давление, окружные напряжения.

В соответствии с современными представлениями механики разрушения практически все готовые металлоизделия имеют плоские дефекты типа трещиноподобных разрывов или полостей. Например, трещины сдвига – дислокации – в металлах (10^{-8} – 10 см); технологические трещины и эксплуатационные трещины в металлах (10^{-3} – 10 см); трещины, возникающие в металлургическом процессе (10^{-5} – 1 см) [1].

Цилиндрические оболочки, тонкостенные трубы широко применяются в газовой, нефтяной и в других отраслях техники, а так же для оборудования в атомных реакторах. Специфика эксплуатации таких ответственных металлоизделий предполагает высокое качество поверхности, а так же контроль микродефектов и несплошностей после изготовления и при эксплуатации [2, 3]. В агрессивных средах и при высоких уровнях эксплуатации даже межкристаллитные границы зерен и дислокации, выходящие на поверхность, могут привести к разрушению металлоизделий. Действие сжимающих напряжений считают благоприятным при наличии дефектов. Растягивающие напряжения напротив, способствуют раскрытию микротрещин и проникновению в них агрессивной среды, что приводит к снижению коррозионной стойкости поверхностных слоев металла. В результате длительного воздействия на микротрещины растягивающие напряжения могут вызвать их увеличение до критических размеров и привести к макро разрушению металла. Основными методами изготовления цилиндрических металлоизделий являются обработка металлов давлением (волочение, прокатка, прессование), где процессы проходят с выраженной неравномерной пластической деформацией, что в свою очередь может привести к возникновению технологических остаточных напряжений. Совместное действие эксплуатационных и остаточных напряжений значительно ускоряет процесс раскрытия трещин, особенно при наличии поверхностных растягивающих остаточных напряжений. Проблема установления закономерностей развития трещин приобретает особую актуальность в связи с применением высокопрочных материалов, тенденциями к уменьшению массы машин, изысканиями резервов

прочности материалов, выбором оптимальных технологических процессов изготовления и упрочнения материалов, а также в связи с необходимостью назначения оптимальных сроков службы и повышения надежности работы деталей.

В деталях, уже проработавших в течение определенного времени, вероятность появления трещин резко возрастает. Усталостные трещины, возникающие при циклических нагрузках, постоянно разрастаясь, подготавливают условия для хрупкого разрушения. В связи с этим особое значение приобретает способность материала или конструкции воспринимать нагрузки при наличии трещины. Однако необходимо отметить, что наличие микротрещин не препятствует надежной длительной работе машин и конструкций до тех пор, пока связанная с ним повреждаемость не приводит к снижению прочности ниже предельно допустимого уровня.

Допустимую степень повреждаемости устанавливают на основании расчетно-экспериментальных исследований и опыта эксплуатации. До определенных пределов допускаются также некоторые повреждения поверхности в эксплуатации – изнашивание контактных участков, эрозия, забоины, коррозионные точки.

При постоянной нагрузке трещина в некоторых условиях может стабилизироваться, при переменных нагрузках выше определенного уровня длина трещины постоянно растет. Скорость развития трещины и ее критическая длина, при достижении которой возникает опасность быстрого разрушения конструкции, зависят от коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины, измеряемого в МПа · м^{1/2} [4]

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi a}, \quad (1)$$

где a – полудлина большей оси эллиптической трещины; σ – разрушающее напряжение.

При медленно возрастающей нагрузке условием начала разрушения является равенство $K_1 = K_{1c}$, где K_{1c} – характеристика сопротивления материала развитию трещины (трещиностойкость), называемая вязкостью разрушения. Для различных металлов и сплавов значения коэффициента K_{1c} определены в диапазоне от 30 до 70 МПа*м^{1/2} [4]. Тогда критическая длина трещины при определенном уровне напряжения будет определяться в соответствии с выражением:

$$a_{кр} = \left(\frac{K_{1c}}{\sigma} \right)^2 \frac{1}{\pi}. \quad (2)$$

В основе уравнений механики разрушения лежит энергетический подход Гриффитса, где трещина раскрывается по достижению определенного уровня энергии, накопленной у концов трещины. Разрушающие напряжения для условий плосконапряженного и плоскодеформированного состояния при этом определяются соответственно в виде [1]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E \gamma}{\pi a}}, \quad \sigma = \sqrt{\frac{2E \gamma}{\pi (1 - \mu^2) a}}, \quad (3)$$

где γ – поверхностная энергия; E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона.

Важным этапом в теории распространения трещин явились работы Ирвина и Орована, в которых была разработана концепция квазихрупкого разрушения. Согласно которой пластичные материалы при стандартных испытаниях на растяжение разрушаются по квазихрупкому механизму, где пластическая

деформация сосредотачивается в узком слое вблизи поверхности трещины. Ими показано, что для пластичных материалов можно воспользоваться уравнением Гриффитса, вводя вместо поверхностной энергии работу пластической деформации у поверхности трещины, которая может быть на несколько порядков больше поверхностной энергии материала. Распространение теории трещин на квазихрупкие материалы и развитие линейной механики разрушения позволило добиться значительных успехов в оценке сопротивления разрушению тел с трещинами или вязкости разрушения. Сопротивление развитию трещины можно уподобить растущему сопротивлению пластической деформации в результате деформационного упрочнения.

За последние годы опубликовано много работ по математической трактовке и практическому определению вязкости разрушения. Многочисленные исследователи показали связь критерия вязкости разрушения с различными механическими свойствами материалов. Зная диапазоны коэффициента трещиностойкости K_{Ic} и эксплуатационные условия, а также применяя методы неразрушающего контроля поверхностных трещин, можно рассчитывать критические размеры дефектов и определять предельно-допустимые напряжения, по достижению которых существующие микродефекты начнут раскрываться, что в целом может привести к макро разрушению цилиндрической детали.

Рассмотрим случай, когда на внешней поверхности цилиндрической оболочки имеет место несквозная полуэллиптическая трещина (см. рис. 1).

Коэффициент интенсивности напряжения для подобных трещин рассчитывается в следующем виде [5]

$$K_{Ic} = \sigma \cdot \left(\frac{\pi \cdot l}{Q} \right)^{1/2} \cdot F_i \left(\frac{l}{a}, \frac{l}{h}, \frac{h}{R_2} \right), \quad (4)$$

где σ – среднее окружное напряжение; h – толщина стенки оболочки; R_2 – внутренний радиус; l – глубина трещины.

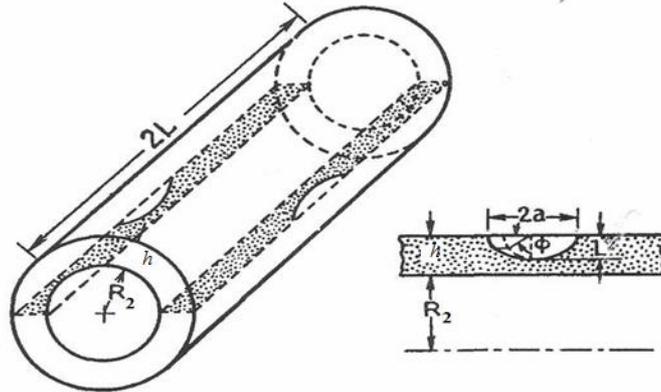


Рис. 1. Полуэллиптическая поверхностная трещина в цилиндрических оболочках

Здесь Q – квадратный корень из полного эллиптического интеграла второго рода, определяемый приближенной формулой

$$Q = 1 + 1,464(l/a)^{1,65}, \quad (5)$$

в соответствии с которой, величина Q изменяется от 1 до 2,5 при соотношении l/a от 0,2 до 1, соответственно. Корректировочный коэффициент F_i в формуле (4) определяется выражением:

$$F_i = \frac{h}{R_2} \frac{R_1^2}{R_1^2 - R_2^2} \left[2G_0 - 2\frac{l}{R_2} G_1 + 3\left(\frac{l}{R_2}\right)^2 G_2 - 4\left(\frac{l}{R_2}\right)^3 G_3 \right], \quad (6)$$

где G_i – коэффициенты влияния, учитывающие действие внутреннего давления на поверхности трещины, значение некоторых из них приведены ниже в таблице [5].

Таблица. Коэффициенты влияния G_i полуэллиптической трещины на внешней поверхности цилиндра (h/R_2)

Тип нагрузки	l/a		0.2			0.4	
	$\frac{2\phi}{\pi}$	$\frac{l}{h}$	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5
Равномерное (G_0)	0		0.612	0.786	1.160	0.793	0.994
	0.25		0.752	0.952	1.346	0.828	1.016
	0.5		0.972	1.278	1.860	0.967	1.175
	0.75		1.114	1.541	2.344	1.072	1.311
	1.0		1.162	1.640	2.510	1.109	1.360
Линейное (G_1)	0		0.080	0.134	0.242	0.130	0.195
	0.25		0.209	0.272	0.389	0.252	0.315
	0.5		0.430	0.532	0.713	0.451	0.521
	0.75		0.618	0.767	1.044	0.620	0.702
	1.0		0.691	0.861	1.178	0.685	0.773
Квадратичное (G_2)	0		0.023	0.049	0.097	0.045	0.078
	0.25		0.076	0.106	0.159	0.100	0.130
	0.5		0.241	0.291	0.376	0.261	0.295
	0.75		0.437	0.513	0.654	0.447	0.489
	1.0		0.524	0.613	0.782	0.530	0.575
Кубическое (G_3)	0		0.010	0.025	0.051	0.022	0.041
	0.25		0.032	0.050	0.079	0.046	0.064
	0.5		0.148	0.177	0.225	0.164	0.184
	0.75		0.337	0.383	0.468	0.350	0.375
	1.0		0.434	0.488	0.596	0.445	0.472

Определим в соответствии с выражением (4) среднее разрушающее напряжение

$$\sigma = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi \frac{l}{Q}}} \cdot \frac{1}{F_i\left(\frac{l}{a}, \frac{l}{t}, \frac{h}{R_2}\right)}. \quad (7)$$

Данные дефектоскопии поверхностных несплошностей в трубопроводах, резервуарах и других цилиндрических тонкостенных металлоизделиях свидетельствуют о различных размерах несквозных трещин, протяженность которых может достигать несколько сантиметров [1].

Глубина таких дефектов варьируется в диапазоне $l = 100 \div 500$ мкм. Найдем зависимости предельно-допустимых напряжений от критической полудлины трещины $a_{кр} = 0,5 \div 25$ мм для цилиндрических оболочек из различных металлов и сплавов с коэффициентами интенсивности напряжения $K_{Ic} = 1 \div 1.6 \cdot 10^3$ МПа*мм^(1/2) (см. рис. 2), в соответствии с выражением (7).

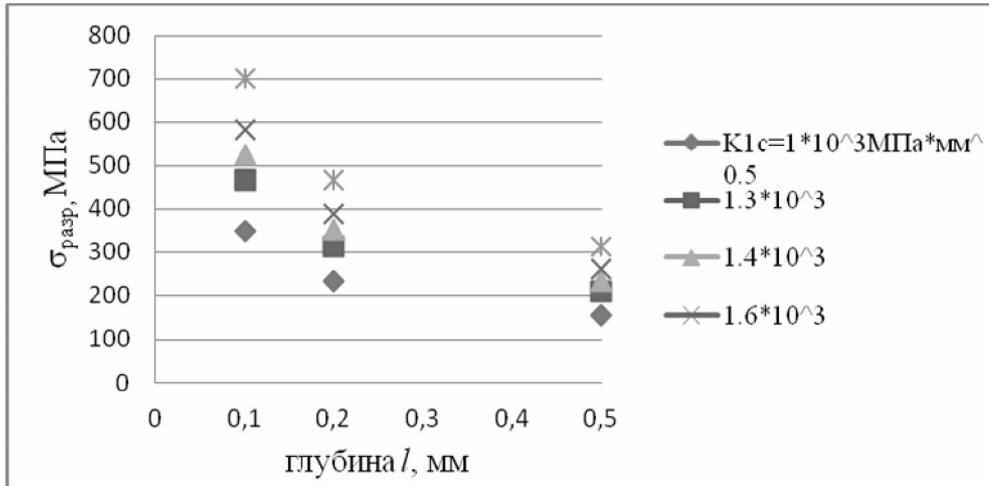


Рис. 2. Величины предельно-допустимых напряжений в зависимости от размера дефекта для сплавов и сталей с различными коэффициентами интенсивности напряжения

Анализируя приведенные на рис. 2 зависимости можно сделать вывод, что уровень разрушающих напряжений варьируется в пределах 150-700 МПа в зависимости от характеристик трещиностойкости стали или сплава.

При обнаружении более глубоких дефектов (до 500 мкм) необходимо контролировать уровень эксплуатационных напряжений, который при таких трещинах не должен превышать 300 МПа.

Эксплуатационные напряжения в оболочках под внутренним давлением P со средним радиусом r и толщиной h являются окружными и определяются в соответствии с безмоментной теорией оболочек выражением [6]

$$\sigma_{\theta} = \frac{Pr}{h}. \quad (8)$$

Для определения критических значений длины дефекта используем условие (2). Подставляя выражение (8) в соотношение (2), для поперечных поверхностных дефектов критические размеры длин получим в зависимости от рабочих давлений, коэффициента интенсивности напряжений и геометрических размеров оболочки

$$a = \frac{h^2 K_{1c}^2}{\pi r^2 P^2}. \quad (9)$$

Определим размеры допустимых дефектов в зависимости от величины внутреннего давления для различных сплавов Э110, Э125 и Э635 (см. рис. 3).

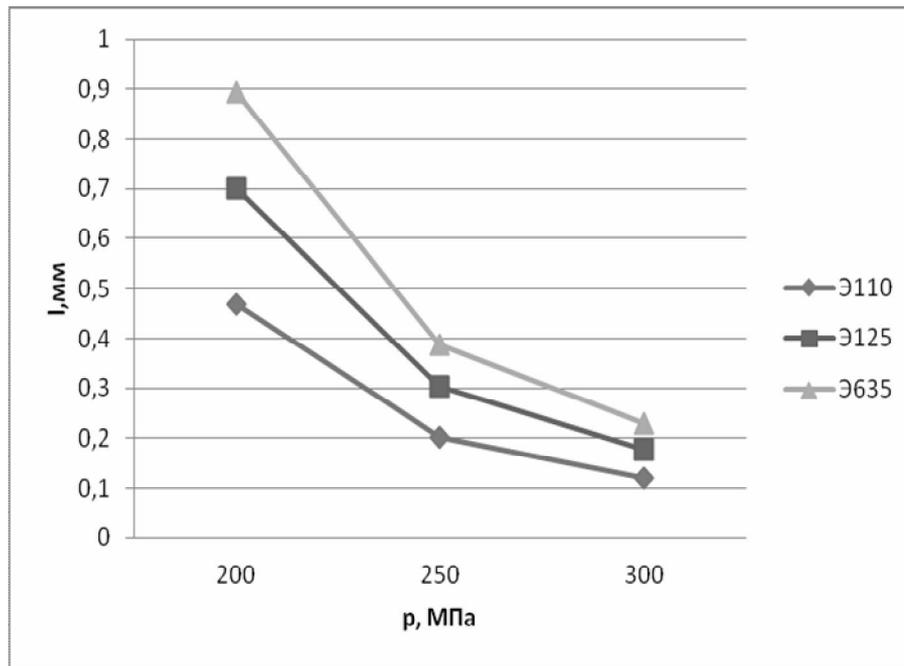


Рис. 3. Зависимость допустимой глубины дефекта от внутреннего давления

Таким образом, предложенная методика расчёта критических размеров микродефектов и несплошностей на поверхностях цилиндрических оболочек, находящихся под внутренним давлением позволяет определять предельные эксплуатационные режимы элементов конструкций и механизмов с учетом результатов дефектоскопии поверхностных трещин, а также рассчитывать допустимые величины внутренних давлений и соотношения размеров длин и глубин дефектов.

В классических подходах механики разрушения, основанных на теории Гриффитса [7-9], описываются процессы хрупкого разрушения сквозных плоских трещин, а значит, их применение для цилиндрических металлоизделий с несквозными дефектами, может привести к большим погрешностям в расчетах, так как конструкционные стали, металлы и сплавы разрушаются вязко – с предварительной пластической деформацией, при этом форма и величина дефектов также имеют существенное значение, поэтому необходимо конкретизировать материалы и виды дефектов для адекватной оценки предельно-допустимых эксплуатационных условий.

Методика учета эксплуатационных нагрузок и схемы дефектов, предложенные в данной работе, предполагают наличие несквозной полуэллиптической трещины в цилиндрической оболочке под внутренним давлением, где действуют окружные растягивающие напряжения, что достоверно описывает процессы перехода к растрескиванию в подобных металлоизделиях.

Л и т е р а т у р а

1. Пестриков В.М., Морозов Е.В. Механика разрушения твердых тел: курс лекций. – СПб.: Профессия, 2002. – 302 с.

2. Li D.F., Li C.F., Shu S.Q., Wang Z.X., Lu J. A fast and accurate analysis of the interacting cracks in linear elastic solids // *International Journal of Fracture*. June 2008. – Vol. 151, – P. 169-185.
3. Yucheng Liu, Michael L. Day. Bending collapse of thin-walled circular tubes and computational application// *Thin-Walled Structures*. – 2008. – Vol. 46, Iss. 4. – P. 442-450.
4. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин/ /Справочник. 4-е изд, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
5. Мураками Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. / В 2-х томах/ Пер. с англ. – М.: Мир, 1990 г., – 1016 с.
6. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. – М.: Наука, 1966 г., 635 с.
7. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. Технологические остаточные напряжения и прочность осесимметричных полых изделий. / Научные исследования и инновации. – Пермь: ПГТУ, 2008 № 4. С. 40-49.
8. Arutyunyan A.R., Arutyunyan R.A. The fatigue fracture criterion based on the latent energy approach// *Engineering*. – 2010. – 2. – P. 318-321.
9. Knees D. Griffith formula and J-integral for a crack in a power-law hardening material, Bericht, 2005, 12, Univ. Stuttgart. – 31 p.

References

1. Pestrikov, V.M., Morozov, E.V. (2002). *Mechanics Of The Destruction Of Rigid Bodies: Lecture Course*, SPb: Professiya, 302 p.
2. Li, D.F., Li, C.F., Shu, S.Q., Wang, Z.X., Lu J. (2008). A fast and accurate analysis of the interacting cracks in linear elastic solids, *International Journal of Fracture*, Vol. 151, June 2008, pp. 169-185.
3. Liu, Yucheng and Day, Michael L. (2008). Bending collapse of thin-walled circular tubes and computational application, *Thin-Walled Structures*, Vol. 46, Iss. 4, pp. 442-450.
4. Birger, I.A., Shorr, B.F., Iosilevich, G.B. (1993). *Raschet Na Prochnost Detaley Mashin: Reference Book*, 4-e izd., M.: Masinstroenie, 640 p.
5. Murakami, Yu. (1990). *A Reference Book on Coefficients of Intensity of Stresses*, 2 volumes, M.: Mir, 1016 p.
6. Timoshenko, S.P., Voynovskiy-Kriger, S. (1966). *Plates and Shells*, M.: Nauka, 635 p.
7. Kolmogorov, G.L., Kuznetsova E.V. (2008). Tehnologicheskie ostatochnye napryazheniya i prochnost osesimmetrichnih polyh izdeliy, *Nauchnye isledovaniya i innovatsii*, Perm: PGU, № 4, pp. 40-49.
8. Arutyunyan A.R., Arutyunyan R.A. (2010). The fatigue fracture criterion based on the latent energy approach, *Engineering*, № 2, pp. 318-321.
9. Knees D. (2005). Griffith formula and J-integral for a crack in a power-law hardening material, Bericht, 12, Univ. Stuttgart. – 31 p.

TOLERANCE LIMIT DEFECTS IN THE CYLINDRICAL PIPE SHELLS UNDER INTERNAL PRESSURE

Kuznetsova E.V., Kolmogorov G.L.

Permskiy Natsionalniy Issledovatel'skiy Politehnicheskiy Universitet, Perm

In the work, the design procedure of the critical sizes of microdefects and discontinuity flaw on surfaces of the cylindrical shells which are under internal pressure is offered.

Approaches of mechanics of destructions considering factors of intensity of stresses for definition of maximum-permissible lengths of cracks for blind semielliptical cracks are studied.

KEYWORDS: microdefects, discontinuity flaw, factor of intensity of stresses, viscosity of destruction, cylindrical shell, internal pressure, tangential stresses.