

¹М. Н. Регульский, канд. техн. наук, старш. науч. сотр.,
²А. В. Голубничий, канд. техн. наук, доц.,
²Е. А. Польчин

РАСЧЕТ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТАЛЬНЫХ ТРУБ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ И КРУЧЕНИЕМ

¹Институт механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины

govp@imech.creep.kiev.ua

²Национальный авиационный университет, ptznau@ukr.net

Расчеты долговечности труб из стали ЭИ694 выполнены с использованием смешанного критерия длительной прочности в форме эквивалентных напряжений, в структуру которого входит максимальное нормальное напряжение и интенсивность касательных напряжений, а также константа материала, определяемая из базового идентифицирующего эксперимента при двухосном напряженном состоянии.

Введение. На основании исследований, выполненных в работах [1; 3], была предложена следующая структура критерия длительной прочности металлических конструкционных материалов для условий плоского напряженного состояния:

$$\sigma_{\text{equiv}} = \begin{cases} \alpha \sigma_{\text{max}} + (1 - \alpha) \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^{\chi} s_i & (\sigma_1 \geq \sigma_2 > 0) \\ 2\beta \tau_{\text{max}} + (1 - \beta) \left(\frac{\sqrt{2}}{3} \right)^{\chi} \tau_{\text{ост}} & (\sigma_1 > 0; \sigma_2 < 0); \end{cases} \quad (1)$$

Структура критерия (1) выведена на основе нового подхода, описанного в этих работах, где приведена также методика выбора инвариантов, входящих в критерий, методика идентификации констант материалов и описание необходимых базовых опытов. Апробация данного критерия была выполнена с использованием экспериментальных данных, полученных разными авторами при испытаниях на длительную прочность тонкостенных труб изготовленных из разных марок конструкционных сталей и сплавов, предназначенных для работы при повышенных температурах.

Первое из соотношений (1) соответствует таким условиям плоского напряженного состояния, когда знаки главных напряжений совпадают, второе – когда знаки главных напряжений противоположны.

Целью настоящей работы является исследование возможности применения данной структуры критерия для расчетов характеристик длительной прочности стальных труб, находящихся под совместным воздействием внутреннего давления и кручения, а также вывод соответствующих расчетных формул. Сопоставление расчетных характеристик длительной прочности с результатами экспериментальных исследований при длительном статическом нагружении выполнено на примере трубчатых образцов из жаропрочной стали ЭИ694 со средним диаметром $D_m = 25,30$ мм и толщиной стенки $h = 3,28$ мм. Результаты экспериментальных исследований, необходимые для сопоставления с расчетами, заимствованы из работы [2], где, в частности, описаны результаты экспериментов при длительном статическом нагружении указанных трубчатых образцов при внутреннем давлении, внутреннем давлении совместно с кручением, а также приведены результаты испытаний на длительную прочность при простом растяжении.

Оценка особенностей напряженного состояния. В зависимости от соотношения указанных двух нагрузок (внутреннего давления и кручения) они могут инициировать в трубчатом конструктивном элементе напряженные состояния с совпадающими знаками главных напряжений, а также состояния, когда эти знаки противоположны.

Схема нагружения трубчатого образца, а также схема приложения возникающих на краях малого элемента трубы напряжений для условий плоского напряженного состояния показаны на рис. 1

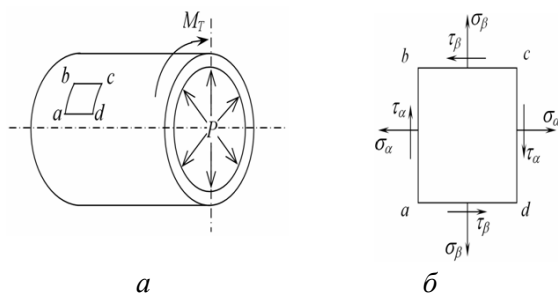


Рис.1. Схема нагружения образца: *а* – схема нагружения трубчатого образца внутренним давлением и крутящим моментом; *б* – схема приложения возникающих на краях малого элемента трубы напряжений

Общие соотношения для главных напряжений при плоском напряженном состоянии в соответствии со схемой, представленной

на рис. 1, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{1}{2} \left[\sigma_\alpha + \sigma_\beta + \sqrt{(\sigma_\alpha - \sigma_\beta)^2 + 4\tau_\alpha^2} \right]; \\ \sigma_2 &= \frac{1}{2} \left[\sigma_\alpha + \sigma_\beta - \sqrt{(\sigma_\alpha - \sigma_\beta)^2 + 4\tau_\alpha^2} \right].\end{aligned}\quad (2)$$

Конкретизируем для исследуемого в настоящей работе сочетания нагрузок выражения для напряжений, входящих в формулы (2), следующим образом:

$$\sigma_\alpha = \frac{p\lambda}{2} = \frac{pD_m}{4h}; \quad \sigma_\beta = p\lambda = \frac{pD_m}{2h}; \quad \tau_\alpha = \frac{2M_T}{\pi D_m^2 h}, \quad (3)$$

где p – внутреннее давление; M_T – крутящий момент; D_m – средний диаметр трубы; h – толщина стенки трубы; $\lambda = \frac{D_m}{2h}$ – безразмерный геометрический параметр трубы.

Поскольку экспериментальные данные графически интерпретируются в плоскости «нагрузка» – «долговечность», нам необходимо уровень нагружения характеризовать одной из компонент нагрузки, наиболее характерной для работы данного элемента конструкции. При этом вторую компоненту нагрузки необходимо учесть посредством безразмерного силового параметра. Разумеется, так можно поступать только при пропорциональном изменении обеих компонент нагрузки, что и имеем в рассматриваемом в настоящей работе случае нагружения труб внутренним давлением совместно с кручением.

Выберем для характеристики уровня нагружения величину внутреннего давления p , а в качестве силового безразмерного параметра ψ примем отношение напряжений от внутреннего давления к касательным напряжениям, инициированным крутящим моментом M_T :

$$\psi = \frac{p}{\tau_\alpha} = \frac{pD_m^2 h}{2M_T}. \quad (4)$$

С учетом соотношений (3), (4) выражения (2) для главных напряжений приобретают следующий вид:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left[\frac{3}{2} p\lambda + \sqrt{\left(\frac{p\lambda}{2}\right)^2 + 4\left(\frac{p}{\psi}\right)^2} \right]; \quad (5)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{3}{2} p\lambda - \sqrt{\left(\frac{p\lambda}{2}\right)^2 + 4\left(\frac{p}{\psi}\right)^2} \right].$$

Или, преобразовав к более удобному виду, получим:

$$\sigma_1 = p \frac{3\lambda + 2\sqrt{\left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 + \left(\frac{2}{\psi}\right)^2}}{4} \quad (6)$$

$$\sigma_2 = p \frac{3\lambda - 2\sqrt{\left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 + \left(\frac{2}{\psi}\right)^2}}{4}. \quad (7)$$

Поскольку структура критерия (1) зависит от того, совпадают или не совпадают знаки главных напряжений необходимо провести анализ соотношений (6) и (7) с целью вывода условия, определяющего совпадение или несовпадение знаков главных напряжений для конкретного расчетного случая.

Как видно из рассмотрения соотношений для главных напряжений, противоположные знаки главных напряжений мы получим при следующем условии:

$$\sqrt{\left(\frac{p\lambda}{2}\right)^2 + 4\left(\frac{p}{\psi}\right)^2} > \frac{3}{2} p\lambda. \quad (8)$$

После несложных преобразований с учетом выражение (4) это условие приобретает следующий вид:

$$\frac{4\sqrt{2}M_T}{p\pi D_m^3} > 1. \quad (9)$$

Анализ экспериментальных данных и конкретизация расчетных формул. Анализ экспериментальных данных, заимствованных из работы [2] и приведенных ниже в таблице, показал, что для диапазона нагрузок, при которых были получены эти данные, величина дроби в соотношении (9) находится в пределах 0,61–0,74.

**Долговечности трубчатых образцов из стали ЭИ694 (1X13Н16Б),
испытанных при нагружении внутренним давлением и крутящим
моментом**

№ п/п	Величины нагрузок		Долго- вечность t_R , ч	Параметры кривой длительной прочности при растяжении	
	Внутреннее давление p , МПа	Крутящий момент M_t , Нм		B , МПа ^{-m} ч ^{-l}	m
1	15,9	106,5	2220	$3,303 \cdot 10^{-13}$	4,71
2	20,8	115,0	1639		
3	22,8	128,5	766		
4	25,4	143,0	439		
5	28,2	154,1	264		
6	28,0	155,5	526		
7	36,4	200,5	172		

Следовательно, для расчетов долговечностей в выражении для критерия (1) воспользуемся первым из соотношений, а именно:

$$\sigma_{eqv} = \alpha \sigma_{\max} + (1 - \alpha) \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^x s_i, \quad (10)$$

где σ_{\max} и s_i определены следующими выражениями:

$$\sigma_{\max} = \sigma_1 \quad (11)$$

$$s_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2}. \quad (12)$$

Подставив уравнение (6) и (7) в (10) с учетом (11) и (12), получим выражение для эквивалентного напряжения:

$$\sigma_{eqv} = p \frac{\alpha \left(3\lambda + 2 \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2} \right)^2 + \left(\frac{2}{\psi} \right)^2} - 2(\sqrt{3})^{-x} \sqrt{\lambda^2 + \frac{4}{\psi^2}} \right)}{4} + \quad (13)$$

$$+ p \frac{(\sqrt{3})^{-x} \sqrt{\lambda^2 + \frac{4}{\psi^2}}}{2}.$$

Параметр Надаи-Лоде χ , который входит в формулы (1), (10), (13), учитывает соотношение главных напряжений и для рассматри-

ваемого случая нагружения определяется следующей формулой:

$$\chi = 2 \frac{3\lambda - 2\sqrt{\left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 + \left(\frac{2}{\psi}\right)^2}}{3\lambda + 2\sqrt{\left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 + \left(\frac{2}{\psi}\right)^2}} - 1. \quad (14)$$

Значение безразмерного геометрического параметра для испытанных в работе [2] трубчатых образцов составило $\lambda = 3,85$.

Для определения зависимой от температуры константы материала α необходимо располагать данными единичного идентифицирующего эксперимента при сложном (в данном случае плоском) напряженном состоянии. Согласно методике, описанной в работе [3] для различных напряженных состояний с совпадающими знаками главных напряжений, в качестве данных идентифицирующего базового эксперимента могут быть использованы данные эксперимента при внутреннем давлении на одном из уровней нагружения. Выражение для константы α имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{2\sigma_t - \lambda\bar{p}_t}{\lambda\bar{p}_t}, \quad (15)$$

где \bar{p}_t – внутреннее давление в идентифицирующем базовом эксперименте; σ_t – напряжение, соответствующее на кривой длительной прочности для простого одноосного нагружения той же долговечности, что и в идентифицирующем базовом эксперименте при внутреннем давлении. Значение константы α , рассчитанное по формуле (15) и соответствующее базе по времени, равной 300 ч, составило для упомянутых выше трубчатых образцов $\alpha = 0,906$.

Расчеты прогнозируемых долговечностей выполнены на основании общего для принятой концепции эквивалентных напряжений условия, которое может быть выражено следующими соотношениями:

$$\sigma_t = \sigma_{eqv} \quad \text{и} \quad t_R = \frac{1}{B\sigma_t^m} \Rightarrow \frac{1}{B\sigma_{eqv}^m}, \quad (16)$$

где σ_t – напряжение, соответствующее на кривой длительной прочности для одноосного нагружения той же долговечности, при которой происходит разрушение конструктивного элемента при сложном напряженном состоянии, и для которого получено расчетное значение σ_{eqv} .

На рис. 2 в логарифмических координатах представлены результаты расчета долговечности трубчатых образцов (штриховая линия) по формулам (13) и (16), соответствующие значению безразмерного силового параметра $\psi = 0,59$, а также ведены экспериментальные данные, приведенные в таблице (точки).

Можно констатировать вполне удовлетворительное согласование расчета с экспериментальными данными.

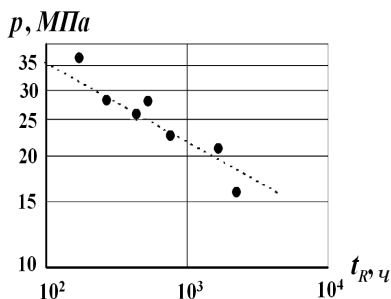


Рис. 2. Сопоставление расчета (линия) с результатами испытаний при длительном статическом нагружении внутренним давлением и кручением трубчатых образцов из стали ЭИ694 (точки)

Обсуждение результатов. Выводы. Выполненная работа является продолжением исследований, имеющих целью апробацию критерия длительной прочности, использованного в данной работе для расчета характеристик длительной прочности труб при совместном воздействии внутреннего давления и крутящего момента.

Приведенные соотношения и расчетные формулы были выведены для условий плоского напряженного состояния в тонкостенных трубах, когда величиной третьего главного напряжения, действующего в радиальном направлении можно пренебречь. Тем не менее, для рассмотренных в настоящем исследовании трубчатых образцов, которые не являются тонкостенными, а находятся в переходном диапазоне между тонкостенными и толстостенными, получено хорошее согласование расчета и эксперимента. Оценка максимальной ошибки по долговечности составила 49%, что следует признать вполне удовлетворительным, поскольку хорошо известно, что испытания на длительную прочность характеризуется существенным рассеянием долговечностей.

Можно предположить, что приведенная выше структура критерия длительной прочности позволит использовать её и для расчетов толстостенных цилиндров, когда напряженное состояние существенно отлично от плоского.

Дальнейшие исследования в данном направлении предполагают более обширную апробацию критерия длительной прочности вида (1) для различных материалов, сочетаний нагрузок и геометрических параметров трубчатых конструктивных элементов.

Список литературы

1. *Golub V.P.* Derivation of creep long-term fracture criteria under plane state of stress. *International Journal of Mechanical Sciences* 2005; 47:1807.

2. *Зверьков Б.В.* Длительная прочность труб при сложных нагрузках // Теплоэнергетика. – 1958. – № 3. – С. 51–54.

3. *Голуб В.П.* Длительная прочность тонкостенных труб при двухосном статическом нагружении/ В.П.Голуб, М.Н.Регульский, А.А.Русинов // Вестник НТУУ «КПИ» Серия Машиностроение. – 2008, – Вып. 52. – С. 61–67.

УДК 539.434 (045)

Регульський М.М., Голубничій О.В., Польчин О.О. **Розрахунок довговічності сталевих труб за умов довготривалого навантаження внутрішнім тиском і крученням** // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2009. – Вип. 52. – С.120–127.

Розрахунки довговічності труб, виготовлених із сталі ЭИ694, виконано із застосуванням критерію довготривалої міцності у формі еквівалентних напружень, у структуру якого входять максимальне нормальне напруження, інтенсивність дотичних напружень, а також константа матеріалу, значення якої визначають за допомогою базового ідентифікувального експерименту за умов двовісного напруженого стану.

Рис.: 2, талб.:1, список лит.:3.

Regulsky M.M., Golubnichy O.V., Polchin O.O. **Estimation of durability of steel tubs under long-term static loading by internal pressure and torsion.**

Calculation of durability of steel tubs under long-term static loading by internal pressure and torsion is performed with using criterion in form of equivalent stresses. The criterion contains maximum normal stress, shearing stress intensity and material constant, which is defined by means of special basic experiment with loading in plain stressed state.

Стаття надійшла до редакції 15.09.09.