

ЩОДО РОЗРАХУНКУ ДОВГОТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ ТОНКОСТІННИХ ТРУБ ЗА УМОВ СКРУЧЕННЯ

Русінов О.О.

Інститут механіки ім.С.П.Тимошенка НАН України, flc@ukr.net

Розв'язано задачу розрахунку часу до руйнування тонкостінних труб за умов усталеної повзучості під дією крутного моменту з розтягом. Розв'язок побудовано на основі концепції еквівалентних напружень. У якості еквівалентного напруження використовується змішаний критерій довготривалого руйнування. Отримано задовільне узгодження результатів розрахунку часу довготривалого руйнування з експериментальними даними.

1.Постановка задачі. Задача розрахунку довготривалої міцності вирішується в роботі у рамках підходу, який базується на концепції еквівалентних напружень як деякої скалярної характеристики початкового напруженого стану труби. Еквівалентне напруження σ_{eqv} встановлює відповідність між руйнуванням труби за довільним напруженим станом та руйнуванням циліндричного взірця за умов одновісного розтягу:

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

де t_R , σ_t - час та напруження руйнування суцільних циліндричних зразків за умов одновісного розтягу; B , m – матеріальні константи, що визначаються з стандартних дослідів на довготривалу міцність за умов одновісного розтягу суцільних циліндричних зразків.

У якості еквівалентного напруження σ_{eqv} в роботі використовується узагальнений змішаний критерій довготривалої міцності у вигляді [1]

$$\sigma_{eqv} = \begin{cases} \alpha\sigma_{\max} + (1-\alpha)\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^\chi s_i, & \sigma_1 > \sigma_2 > 0; \sigma_3 = 0; \\ 2\beta\tau_{\max} + (1-\beta)\left(\frac{\sqrt{2}}{3}\right)^\chi \tau_{oct}, & \sigma_1 > 0, \sigma_2 = 0; \sigma_3 < 0, \end{cases} \quad (2)$$

що враховує знаки головних напружень та вид напруженого стану за допомогою параметра Надаї-Лоде $\left(\chi = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1\right)$. За однакових знаків головних напружень величини σ_{eqv} пов'язує максимальне нормальне

напруження $\sigma_{\max} = \sigma_1$ та інтенсивність дотичних напружень $s_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2}$, а за різних знаків головних напружень – подвійне максимальне дотичне напруження $2\tau_{\max} = \sigma_1 - \sigma_2$ та октаедричне дотичне напруження $\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2}$, де під σ_2 розуміється будь-яке відмінне від 0 друге головне напруження. Коефіцієнти α та β у (2) є матеріальні константи, що враховують вплив виду напруженого стану на величину σ_{eqv} та визначаються з експерименту.

Підставляємо перше співвідношення з (2) в (1) для часу до руйнування тонкостінної труби t_R у функції головних напружень за однакових знаків головних напружень отримуємо рівняння

$$t_R = \frac{1}{B \left[\frac{\sqrt{3}\alpha\sigma_1 + (1-\alpha)(\sqrt{3})^{1-\chi} \sqrt{(\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2)}}{\sqrt{3}} \right]^m}, \quad (7)$$

а підставляючи друге співвідношення з (2) в (1) для часу до руйнування тонкостінної труби t_R за різних знаків головних напружень – рівняння

$$t_R = \frac{1}{B \left[\beta(\sigma_1 - \sigma_2) + (1-\beta) \left(\frac{\sqrt{2}}{3} \right)^{1+\chi} \left(\sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \right) \right]^m}, \quad (8)$$

які фактично задають момент виникнення локального руйнування. У тонкостінних трубах, внаслідок обмеженості стадії розповсюдження фронту руйнування, цей момент утотожнюється в подальшому з часом повного руйнування.

2. Довготривала міцність труб під дією кручення з розтягом. Для прямолінійного елемента тонкостінної циліндричної труби, що навантажена крутним моментом M_T з осьюовою силою N для головних напружень маємо:

$$\sigma_1 = \frac{l}{2} \left[\frac{N}{\pi D_m h} + \sqrt{\left(\frac{N}{\pi D_m h} \right)^2 + 4 \left(\frac{2M_T}{\pi D_m^2 h} \right)^2} \right]; \quad \sigma_2 = 0; \quad (9)$$

$$\sigma_3 = \frac{l}{2} \left[\frac{N}{\pi D_m h} - \sqrt{\left(\frac{N}{\pi D_m h} \right)^2 + 4 \left(\frac{2M_T}{\pi D_m^2 h} \right)^2} \right],$$

звідки зрозуміло, що в данному випадку знаки головних напружень різні. Тут, D_m та h - середній діаметр та товщина стінки труби відповідно ($D_m=2r$).

Покладемо (9) в (8), для часу до руйнування тонкостінної циліндричної труби t_R під дією крутного моменту M_T з осью силою N отримуємо

$$t_R = \frac{l}{B \left[\left(\sqrt{4+v^2} \right) \beta + \sqrt{(3+v^2)}(1-\beta) \left(\frac{\sqrt{2}}{3} \right)^{1+\chi} \right]^m \cdot \left(\frac{2M_T}{\pi D_m^2 h} \right)^m} \quad (10)$$

де прийнято $v = \frac{D_m N}{2M_T}$ - безрозмірний силовий параметр, що визначає співвідношення між крутною та розтягуючою складовими навантаження.

Матеріальна константа β в (10) визначається з співвідношення [2]

$$\beta = \frac{\sqrt{3} \frac{\bar{\tau}_t}{\sigma_t} - \left(\frac{3}{\sqrt{2}} \right)^{1-\chi}}{\frac{\sqrt{3}}{2} - \left(\frac{3}{\sqrt{2}} \right)^{1-\chi}}, \quad (11)$$

де σ_t , τ_t - експериментально знайдені осереднені (з врахуванням статистичних властивостей матеріала) границі довготривалої міцності відповідно за одновісного розтягу циліндричного взірця та тонкостінної труби за умов чистого скручення для одного й того ж самого часу до руйнування.

Результати розрахунків (штрихові лінії), що виконані згідно рівняння (10) з використанням значень коефіцієнта β , розрахованого відповідно (11), співставлені на рис.1 з експериментальними даними (точки) для тонкостінних

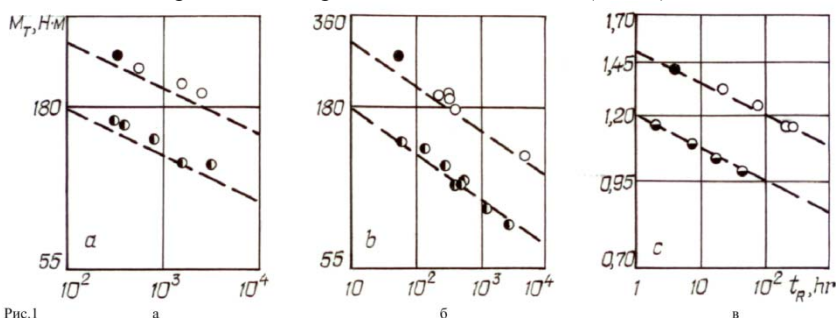


Рис.1 трубчастих зразків зі сталі 15X1M1Φ (а) за температури 570 °С та $v = 0$ (○), 2,0 (●), сталі 1X18H12T (б) за 610 °С та $v = 0$ (○), 2,0 (●), сталі X16H15M3B (в) за 675 °С та $v = 0$ (○), 1,3 (⊖) під дією скручення з розтягом.

В таблиці наведені значення матеріальних констант, β , B та m , які використовувались у розрахунках.

Таблиця 1. Значення матеріальних констант β , B и m

Матеріал	θ , °C	ν	B , МПа ⁿ ·год ⁻¹	m	β	Джерела [...]
Сталь 15Х1М1Ф	570	0	$1,41 \cdot 10^{-19}$	7,00	0,73	[3]
		2,0				
Сталь 1Х18Н12Т	610	0	$1,72 \cdot 10^{-21}$	8,27	0,65	[3]
		2,0				
Сталь Х16Н15М3В	675	0	$5,24 \cdot 10^{-174}$	7,94	0,70	[4]
		1,3				

Отримано задовільне узгодження результатів розрахунку часу довготривалого руйнування з експериментальними даними.

1. Голуб В.П., Крижановский В.И., Русинов А.А. Смешанный критерий длительного разрушения в условиях ползучести при плоском напряженном состоянии // Прикл. механика. – 2003. – **39**, №5. – С.94-106
2. Русинов А.А. К обоснованию сметанного критерия длительного разрушения при плоском напряженном состоянии // Прикл. механика. – 2009. – **45**, №3, сс. 135.
3. Трунин И.И. Оценка сопротивления длительному разрушению и некоторые особенности деформирования при сложном напряженном состоянии // ПМТФ.- 1963.- №1.- С. 110-114р
4. Кисилевский В.Н., Лукашев В.К., Полевой Д.В., Самсонов Б.В., Лосев Н.П. Влияние реакторных излучений на длительную прочность стали Х16Н15М3В в зависимости от вида напряженного состояния // Пробл. прочности.- 1974.- №9, С. 39-42.

TO THE CALCULATION OF LONG-TERM FRACTURE OF THIN-WALLED TUBES UNDER TORSION.

The problem of the long-term fracture determination of thin-walled tubes under torsion with tension has been considered. The approach is based on the equivalent stresses concept. The equivalent stress is given in a form of mixed long-term fracture criteria. A satisfactory agreement of the calculations with experimental data has been obtained.