

## РАСЧЕТЫ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ РЕМОНТНЫХ МУФТ

Худякова Л.П., Ешмагамбетов Л.П.

ГУП «ИПТЭР»

*В работе произведена оценка предельных давлений в ремонтной цилиндрической муфте от действия краевого момента  $M_0$ .*

Для хрупких материалов, согласно первой теории прочности:

$$\sigma_{z\max} = \alpha_{\sigma_z} \cdot \sigma_z^{(P)} = \sigma_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_z^{(P)}$  - как и ранее, продольные напряжения в трубе от действия внутреннего давления;  $\sigma_{\text{пр}}$  - предельное напряжение для хрупких материалов, которое равно временному сопротивлению  $\sigma_b$  или пределу текучести  $\sigma_T$  ( $\sigma_{\text{пр}} = \sigma_T = \sigma_b$ ).

Из условия (1) получаем значение предельного давления  $P_c$ :

$$P_c = \frac{\eta \cdot m_\delta \cdot \sigma_T}{3\mu}, \quad (2)$$

где  $\eta = \delta/2R$ .

Для сталей  $\mu = 0,3$ , тогда

$$P_c = 1,11 \cdot \eta \cdot m_\delta \cdot \sigma_T. \quad (3)$$

В случае, когда  $m_\delta = 1,0$ :

$$P_c = 1,11 \cdot \eta \cdot \sigma_T. \quad (4)$$

Например, для муфты при  $m_\delta = 1,0$ ,  $\delta = \delta_M = 10$  мм,  $2R = D = 720$  мм и  $\sigma_T = 350$  МПа из формулы следует, что  $P_c \approx 5,4$  МПа. При этом давлении продольные напряжения  $\sigma_z$  в трубе составляют 97,2 МПа, а окружные  $\sigma_\theta = 194,4$  МПа.

Для идеально пластического металла (рисунок 1, б) предельный момент  $M_c$  равен [1]:

$$M_c = \sigma_T \cdot W_s, \quad (5)$$

где  $W_s = \delta_M^2 / 4$  - пластический момент сопротивления сечения. Как известно, при упругих деформациях  $W_s = \delta_M^2 / 6$ .

С учетом (5) и предельного момента под муфтой из идеально пластического металла получаем:

$$P_c = \frac{\eta \cdot m_\delta}{2\mu} \cdot \sigma_T. \quad (6)$$

При  $\mu = 0,3$

$$P_c = 1,67 \cdot \eta \cdot m_\delta \cdot \sigma_T. \quad (7)$$

В случае, когда  $m_\delta = 1$

$$P_c = 1,67 \cdot \eta \cdot \sigma_T. \quad (8)$$

При исходных условиях предыдущего примера в данном случае по формуле (8) следует, что  $P_c = 8,1$  МПа.

Для слабо упрочняемых сталей при деформации вместо  $\sigma_T$  в формулу (7) можно подставлять значение  $\sigma_B$ , тогда

$$P_c = \frac{\eta \cdot m_\delta \cdot \sigma_B}{2\mu} = \eta \frac{m_\delta}{2\mu} \cdot \frac{\sigma_T}{K_{TB}}, \quad (9)$$

где  $K_{TB} = \sigma_T / \sigma_B$ .

При  $\mu = 0,3$

$$P_c = 1,67 \eta \frac{m_\delta \cdot \sigma_T}{K_{TB}}. \quad (10)$$

Если  $m_\delta = 1,0$ , то

$$P_c = 1,67 \cdot \eta \frac{\sigma_T}{K_{TB}}. \quad (11)$$

Например, если  $K_{TB} = 0,9$ . то при исходных условиях предыдущего примера  $P_c = 9$  МПа. При этом давлении продольные напряжения  $\sigma_z = 162$  МПа, окружные  $\sigma_\theta = 314$  МПа.

Большинство трубных сталей при деформации заметно упрочняются. Степень деформационного упрочнения характеризует параметр  $K_{TB}$ . Чем меньше это значение, тем больше металл при деформации упрочняется.

В некоторых случаях для упрощения расчетов принимается линейный закон упрочнения (рисунок 1, в). В этом случае предельный момент  $M_c$  на основании работы [2] равен:

$$M_c = \sigma_T \cdot W_s \left[ 1 + \left( \frac{\sigma_B}{\sigma_T} - 1 \right) \frac{W}{W_s} \right], \quad (12)$$

где  $W$  - момент сопротивления сечения;  $W_s$  - пластический момент сопротивления сечения.

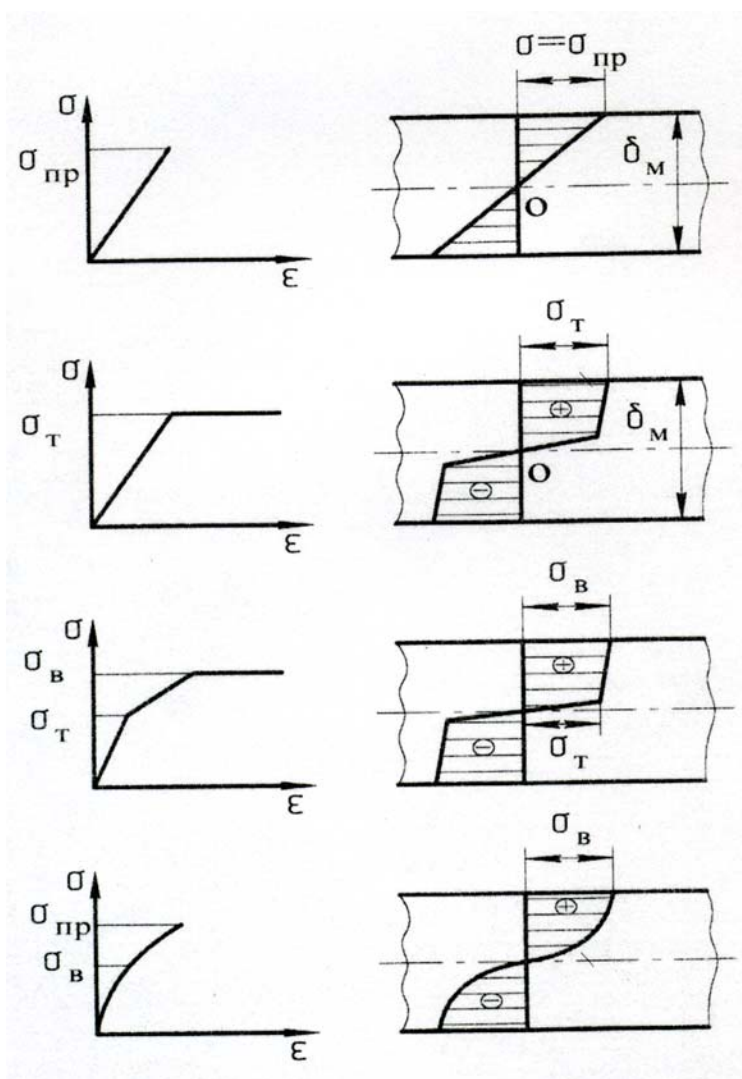


Рисунок 1. Кривые упрочнения и распределения напряжений в предельном состоянии цилиндрических муфт

На основании этой зависимости с учетом предельного момента получаем величину предельного давления муфты:

$$P_c = \frac{\eta \cdot m_\delta}{6\mu} \sigma_T \left( \frac{2}{K_{TB}} + 1 \right) = \frac{\eta \cdot m_\delta}{6\mu} \sigma_B (2 + K_{TB}). \quad (13)$$

При  $K_{TB} = 1$  из формулы (13) вытекает формула (6) для оценки предельного давления муфты из идеально-пластического металла.

При  $\mu = 0,3$ ,  $m_\delta = 1$  формула (13) приобретает следующий вид:

$$P_c = 0,55 \cdot \eta \cdot \sigma_T \left( \frac{2}{K_{TB}} + 1 \right). \quad (14)$$

Если  $K_{TB} = 0,7$ ,  $\delta_M = 10$ ,  $R = 360$  мм, то из формулы получаем значение  $P_c = 10,3$  МПа.

Предельное давление  $P_c$  для трубы, нагруженной внутренним давлением, можно определять по формуле

$$P_c = 2\eta \cdot \sigma_B = 2\eta \frac{\sigma_T}{K_{TB}}. \quad (15)$$

При исходных условиях предыдущего примера  $P_c = 13,9$  МПа.

Поделив значение  $P_c$ , определяемое по формуле (13), на величину  $P_c$ , можно найти коэффициент снижения несущей способности муфты:

$$K_{CH} = \frac{P_c}{P_c} = \frac{m_\sigma (K_{TB} + 2)}{12\mu}. \quad (16)$$

Равнопрочность трубы и муфты обеспечивается при  $K_{CH} = 1$ . Из этой формулы при  $K_{CH} = 1$  получаем необходимое увеличение толщины стенки муфты:

$$m_{\delta_{op}} \geq \frac{12\mu}{K_{TB} + 2}. \quad (17)$$

При  $m_R = 1$

$$m_{\delta_{op}} \geq \frac{12\mu}{K_{TB} + 2}. \quad (18)$$

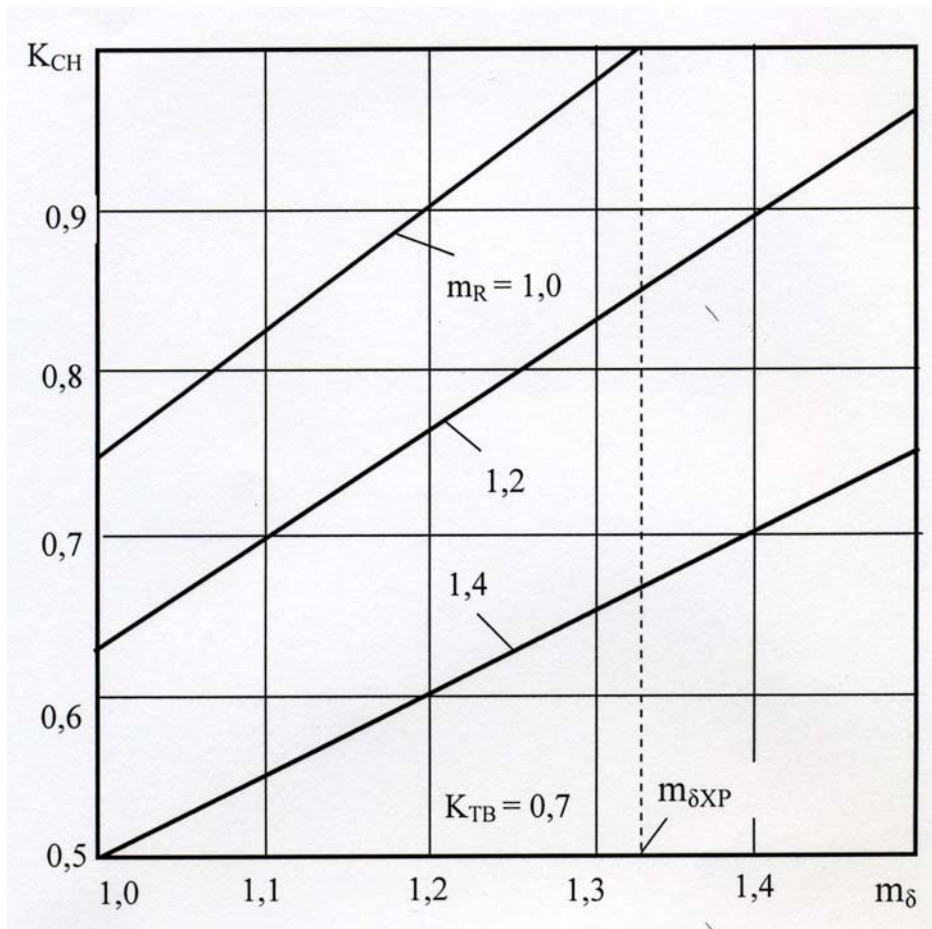


Рисунок 2. Зависимость  $K_{СН}$  от  $m_{\delta}$

При  $K_{ТВ} = 0,7$   $m_{\delta_{кр}} = 1,33$ , т.е. толщина муфты должна составлять:

$\delta_M = 1,33 \cdot \delta$ . При  $\delta = 10$  мм  $\delta_M \approx 13,3$  мм. Округляя, получаем  $\delta_M = 14$  мм.

Зависимости  $K_{СН}$  от  $m_{\delta}$  даны на рисунке 2.

Любопытно, что критические значения  $m_{\delta_{кр}}$  зависят от параметра  $K_{ТВ}$  (рисунок 3). С ростом  $K_{ТВ}$  значение  $m_{\delta_{кр}}$  снижается.

Многие стали упрочняются по степенной функции (рисунок 1, г):

$$\sigma = C \cdot \epsilon^n,$$

где  $\sigma$  и  $\epsilon$  - истинные напряжения и деформации;  $C$  и  $n$  - константы прочности и упрочнения стали (они определяются по диаграммам растяжения).

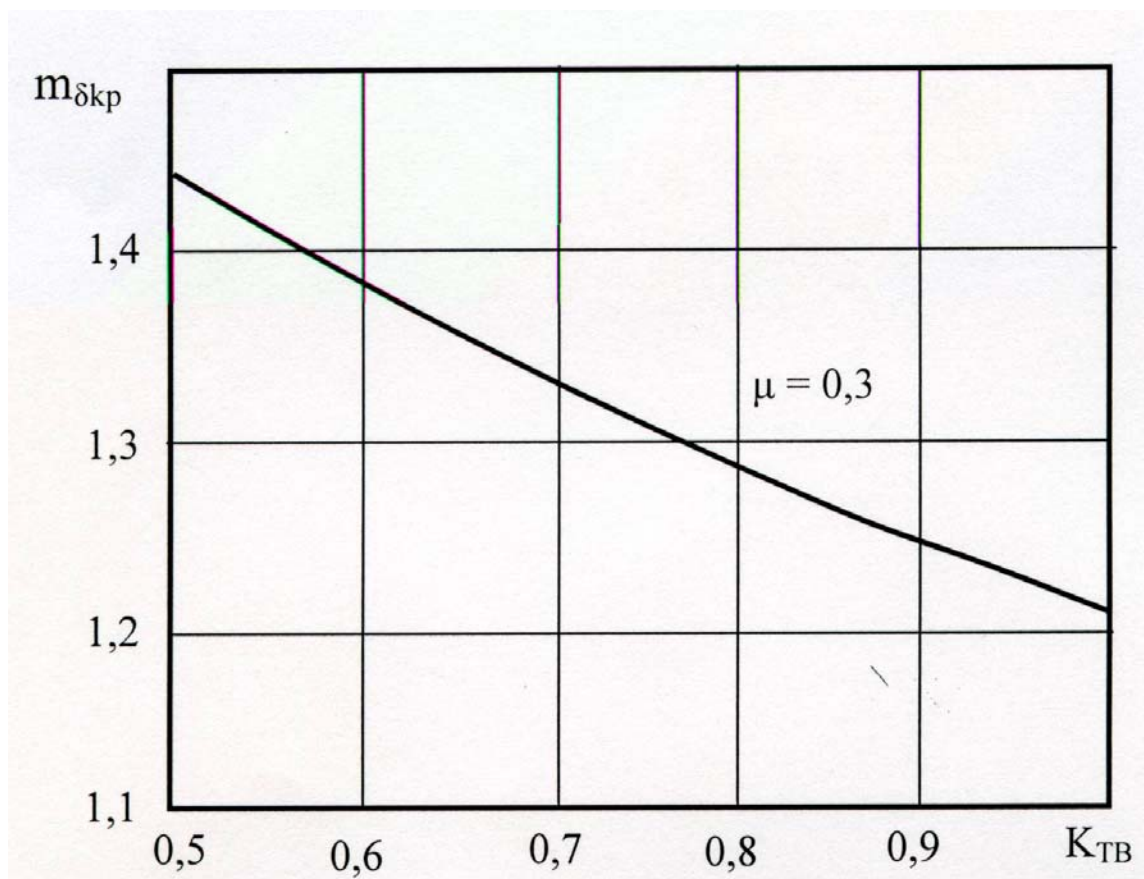


Рисунок 3. Зависимость  $m_{\delta_{кр}}$  от  $K_{ТВ}$

В этом случае предельный момент  $M_c$  определяется интегрированием уравнения:

$$M_c = 2 \int_0^{\delta_m/2} y \cdot \sigma(y) dy = \frac{2 \cdot \sigma_{пр} \cdot W_s}{n + 2}. \quad (19)$$

Если принять за предельное напряжение  $\sigma_{пр}$  величину временного сопротивления  $\sigma_b$ , то

$$M_c = 2 \cdot \sigma_b \cdot W_s / (n + 2). \quad (20)$$

При  $n = 0$  из формулы (20) вытекает формула (5), а при  $n = 1$  (упругий металл)  $M_c = \sigma_{пр} \cdot W$  ( $W = \delta_m^2 / 6$ ).

Приравнивая значение  $M_c$  по формуле (20) к предельной величине  $M_o$ , получаем значение предельного внутреннего давления под муфтой:

$$P_c = \eta \frac{m_\delta \cdot \sigma_B}{\mu(n+2)} = \eta \frac{m_\delta \cdot \sigma_T}{K_{ТВ} \mu(n+2)}, \quad (21)$$

где  $\eta = \delta / 2R$  ( $\delta$  и  $R$  - толщина и радиус трубы).

Величину  $n$  можно приближенно найти в зависимости от  $K_{ТВ}$  по следующей формуле [2]:

$$n = \frac{2}{3}(1 - K_{ТВ}). \quad (22)$$

При  $K_{ТВ} = 0,7$  по формуле (22)  $n = 0,2$ .

По данным предыдущих примеров и при  $n = 0,2$  определенном по формуле (22) при  $K_{ТВ} = 0,7$ , предельное давление муфты достигает 10,05 МПа. Это значение несколько меньше найденного по формуле (22).

С учетом формулы (22) уравнение (21) можно представить в следующем виде:

$$P_c = \frac{3\eta_m \sigma_B}{2\mu (4 - K_{ТВ})}. \quad (23)$$

Аналогично можно найти коэффициент снижения несущей способности  $K_{сн}$  для случая степенного упрочнения стали:

$$K_{сн} = \frac{\eta_m}{2\eta\mu(n+2)} = \frac{m_\delta}{2\mu(n+2)}. \quad (24)$$

При  $\mu = 0,3$ ,  $K_{сн} = 1,67 \cdot m_\delta (n + 2^{-1})$ .

В частном случае, если  $m_\delta = 1$  и  $n = 0,23$ , значение  $K_{сн}$  практически совпадает с таковым, определенным по рисунку 2 ( $K_{сн} = 0,747$ ).

Поэтому предельные давления можно рассчитывать и по формуле (22), и по формуле (23) в зависимости от того, какие механические характеристики имеются для данной стали.

Значения  $C$ ,  $n$ ,  $K_{ТВ}$  для большинства трубных сталей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические характеристики низкоуглеродистых  
и низколегированных сталей для изготовления муфт

Сталь	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	C, МПа	$K_{TB}$	n	$\psi$ , %
10	258	414	463	0,62	0,10	48
20	265	450	860	0,59	0,26	50
Ст3	252	507	900	0,50	0,22	54
16ГС	310	500	820	0,62	0,23	52
17ГС	402	570	1090	0,71	0,20	59
17Г1С	406	570	1090	0,71	0,18	62
09Г2С	306	504	1000	0,56	0,24	70
10Г2С	340	500	890	0,68	0,17	50

### Литература

1. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
2. Гидравлические испытания действующих трубопроводов / Р.С. Зайнуллин, А.Г. Гумеров, Е.М. Морозов, В.Х. Галюк. – М.: Недра, 1990. – 224 с.
3. Зайнуллин Р.С., Гумеров А.Г., Адиев Р.К. Ресурс ремонтных муфт нефтепроводов. – Уфа: Транстэк, 2001. – 147 с.