

ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ РЕМОНТНЫХ МУФТ ПО КРИТЕРИЯМ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ

Худякова Л.П., Мельникова Н.А., Ешмагамбетов Б.С.
ГУП «ИПТЭР»

При ремонте трубопроводов в аварийных ситуациях часто применяются ремонтные муфты, для оценки несущей способности которых необходимо проводить дополнительные расчеты по критериям трещиностойкости.

В данной работе приведена методика оценки предельного состояния ремонтной муфты с позиции трещиностойкости.

Прочность элементов конструкций оценивают по следующему критерию [1, 2]:

$$K_1 = K_c, \quad (1)$$

где K_1 - коэффициент интенсивности напряжений (КИН) детали; K_c - критическое (предельное) значение КИН (ККИН).

Величину K_c оценивают по ГОСТ 25.506-85.

Значение K_1 определяют на основе подходов механики разрушения (трещин), например приведенных в работах [1, 2 и др.].

Предполагается, что прочность сварного шва обеспечена, т.е. разрушение происходит по основному металлу муфты. Это предположение аналогично тому, что в качестве расчетной схемы для оценки коэффициента интенсивности напряжений принимается цилиндр с внутренней полостью (трещиной). Причем длина цилиндрической муфты равна длине цилиндрической щели, в которую через отверстие попадает среда под давлением P .

Как уже отмечалось ранее, муфты, применяемые на практике, относятся к категории длинных, для которых краевые моменты и силы не зависят от ℓ_m или m_{ℓ_d} . Следовательно, на вершине цилиндрической щели будет действовать краевой момент M_0 , определяемый по формуле: $M_0 = \mu \cdot P \cdot R \cdot \delta_m$. На практике в большинстве случаев применяются муфты толщиной, равной толщине трубы. Поэтому индекс "m" при δ можно опустить.

Базируясь на подходах механики разрушения [1, 2], получена следующая формула для оценки КИН для рассматриваемой модели:

$$K_1 = \frac{\mu \sqrt{3P} \sqrt{\delta_m}}{\eta \cdot m_\delta}, \quad (2)$$

где $m_\delta = \delta_m / \delta$; $\eta = \delta / 2R$.

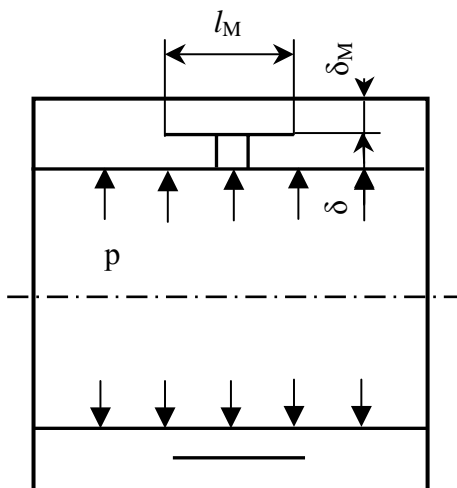


Рисунок 1 – Расчетная схема для определения КИН в окрестности стыка муфты с трубой

Используя условие (1) находим предельное давление P_c :

$$P_c = \frac{\eta \cdot m_\delta \cdot K_c}{\mu \sqrt{3} \sqrt{\delta_m}}. \quad (3)$$

С ростом толщины муфты величина КИН, отнесенная к номинальным продольным напряжениям σ_{zn} , возрастает (рисунок 2). Это говорит о том, что с ростом толщины муфты степень напряженности в окрестности вершины цилиндрической щели возрастает, хотя при этом номинальные напряжения падают. В целом, увеличение толщины муфты способствует повышению несущей способности муфты (P_c) (рисунок 3.1, б), но менее интенсивно, чем величина P_c , определенная по критериям теории упругопластического изгиба. Это наглядно иллюстрируется рисунком 4, на котором даны зависимости относительного предельного давления \bar{P}_c ($\bar{P}_c = P_c / P_{c0}$, где P_c - текущее значение P_c , а P_{c0} - значение P_c при фиксированной толщине муфты) от толщины стенки муфты δ . Этот факт следует учитывать при выборе размеров муфт.

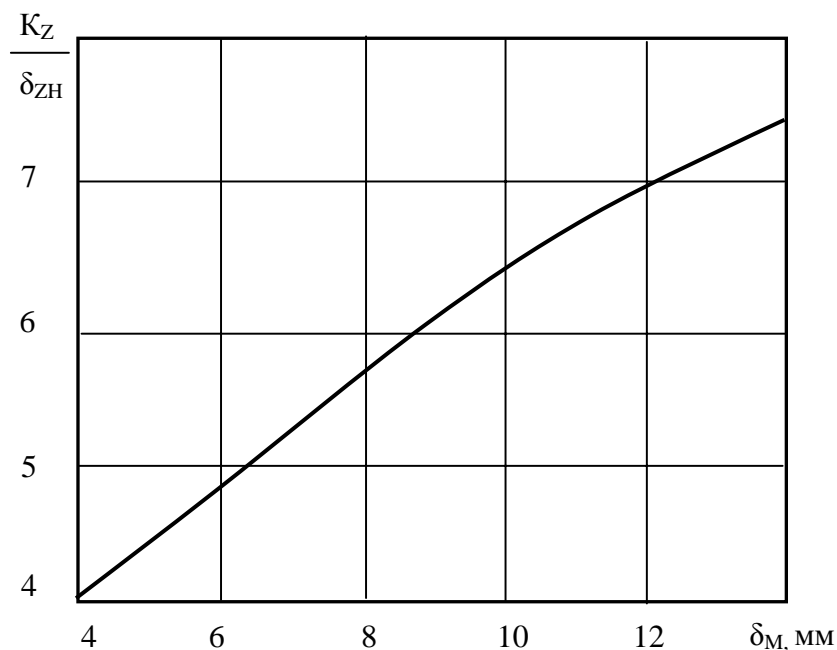


Рисунок 2 – Зависимость относительной величины КИН K_1 / σ_z от толщины муфты δ_m

Повышение характеристики трещиностойкости K_c способствует росту несущей способности муфты (рисунок 3, а).

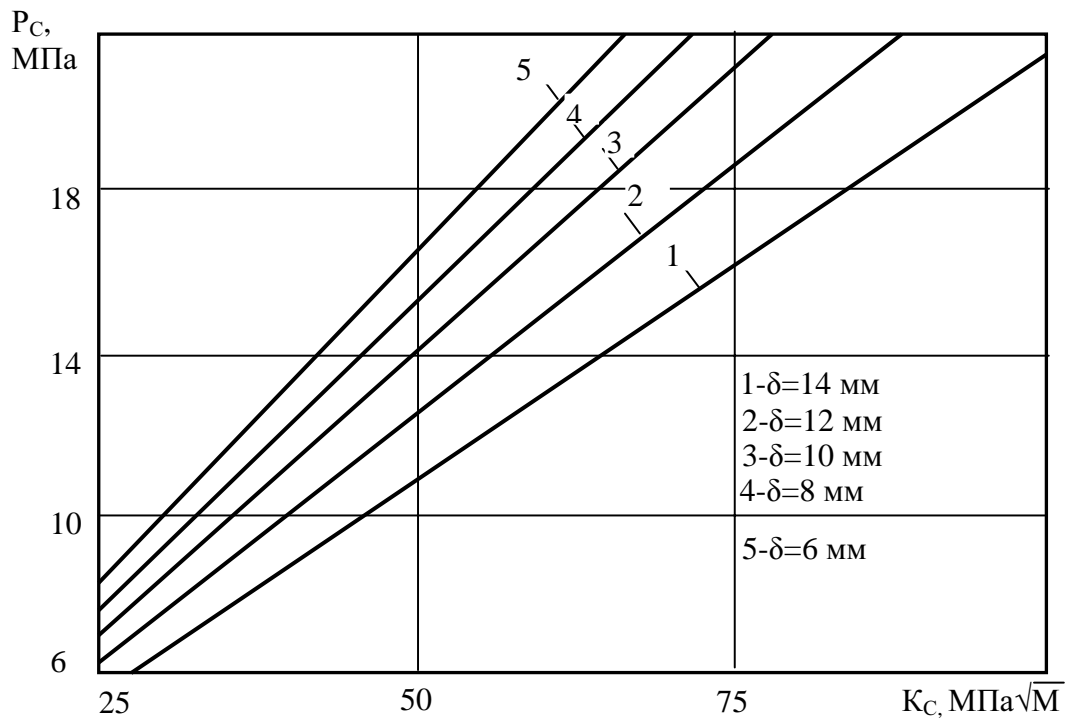
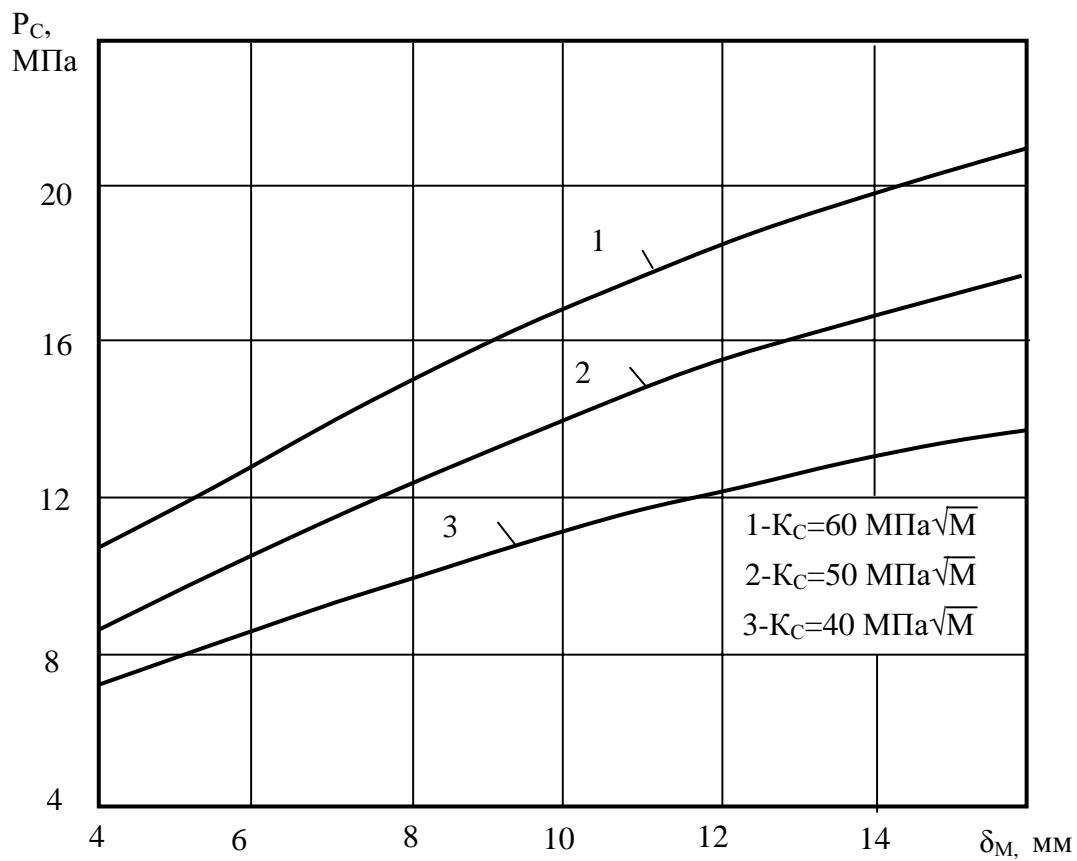
Далее рассмотрим оценку несущей способности модели, для которой имеется ограничение по размеру "с" (рисунок 5).

Поскольку теоретической оценки КИН для такой модели в литературе нами не обнаружено (заметим, что решение такой задачи не простое). Поэтому нами для оценки КИН для рассматриваемой модели были проведены следующие эксперименты.

Анализ подходов механики разрушения дает основание сделать следующий важный вывод: для двух подобных моделей произведения предельных номинальных напряжений (усилий, моментов) и поправочных функций равны между собой. Математически это представляется в следующем виде:

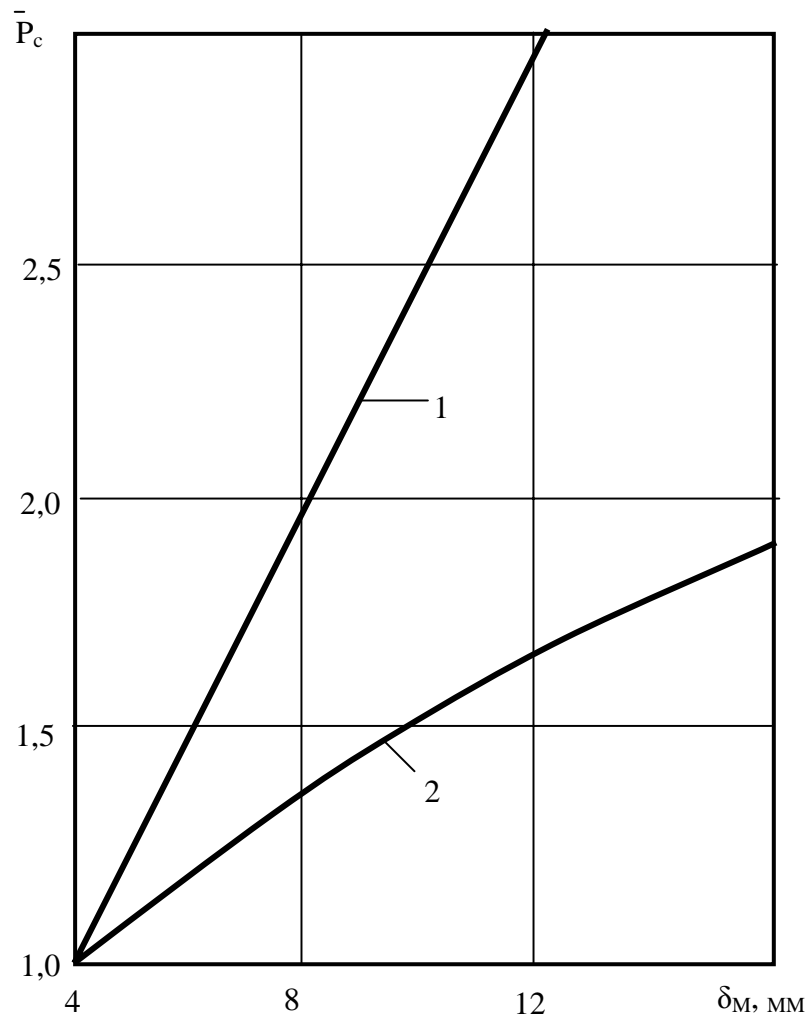
$$\sigma_{нпр.1} \cdot Y_1 = \sigma_{нпр.2} Y_2, \quad (4)$$

где $\sigma_{нпр.1}$ и $\sigma_{нпр.2}$ - предельные номинальные напряжения первой и второй подобных моделей (это соблюдается при равенстве длин трещин); Y_1 и Y_2 - соответствующие поправочные функции.



a)

Рисунок 3 – Зависимости предельного давления муфт от K_c (а) и δ_M (б)



1 – критерии упругопластического изгиба; 2 – критерии трещиностойкости

Рисунок 4 – Зависимости интенсивности роста несущей способности P_c муфт при увеличении их толщины δ_M

Если для одной из моделей известно значение поправочной функции, то по экспериментальной зависимости $\varphi = \sigma_{нпр.2} / \sigma_{нпр.1}$ можно найти значение поправочной функции для другой модели:

$$\varphi = \frac{Y_1}{Y_2}. \quad (5)$$

В рассматриваемом случае известно значение поправочной функции для модели без ограничения размера "с".

При этом вместо предельных напряжений $\sigma_{нпр.}$ можно использовать предельные моменты $M_{пр}$ или усилие $q_{пр.}$

В данном случае удобнее использовать предельные моменты.

Для случая, когда для модели параметр "с" не ограничен, величина КИН определяется на основании формулы:

$$K_1 = \frac{Y_1 M_1}{\delta \sqrt{\delta}}. \quad (6)$$

Для модели с ограничением параметра "с":

$$K_1 = \frac{Y_2 M_2}{\delta \sqrt{\delta}}. \quad (7)$$

При $K_1 = K_c$ или, что то же самое, по условию (5) находим:

$$Y_2 = Y_1 / \varphi = 2\sqrt{3} / \varphi, \quad (8)$$

где $\varphi = M_2 / M_1 = M_2 / M_0$.

Для оценки φ проводили испытание с различным значением параметра "с". С целью соблюдения точных геометрических параметров и условия работы модели при упругой деформации (параметр K_1 описывает напряженное состояние при упругих деформациях) образцы изготавливали из органического стекла по схеме двухконсольной балки (рисунок 5, в и г). В образцах варьировали параметр $m_{c\delta}$ ($m_{c\delta} = c/\delta$). В условиях опытов величина $m_{\delta a}$ ($m_{\delta a} = \delta / \ell$) сохранялась постоянной.

Вначале рассмотрим результаты испытаний образцов, схема которых представлена на рисунке 5, в.

Несущую способность образцов оценивали по параметру $M_{пр}$, который определяли по разрушающему усилию $q_{пр}$:

$$M_{пр} = \frac{q_{пр} \cdot \ell}{b}, \quad (9)$$

где b - ширина образцов.

Увеличение параметра $m_{c\delta}$ приводит к росту предельного момента $M_{пр}$ (рисунок 6) с нуля (при $m_{c\delta} = 0$) до некоторого критического значения $M_{пр}^*$ (при $m_{c\delta} = m_{c\delta}^* = \frac{5}{3}$) по монотонной кривой.

На рисунке 7 представлены контуры образцов после их разрушения (снятые непосредственным копированием). Установлено, что образцы с параметром $m_{c\delta} < m_{c\delta}^*$ разрушаются, начиная с точки "с", вдоль трещины (рисунок 7, а). При $m_{c\delta} > m_{c\delta}^*$ образцы разрушаются, начиная с точки "а", по

сложной кривой с выходом на внешнюю поверхность модели муфты (рисунок 7, б). Точно так же разрушаются образцы с параметром $m_{c\delta} \gg 1$.

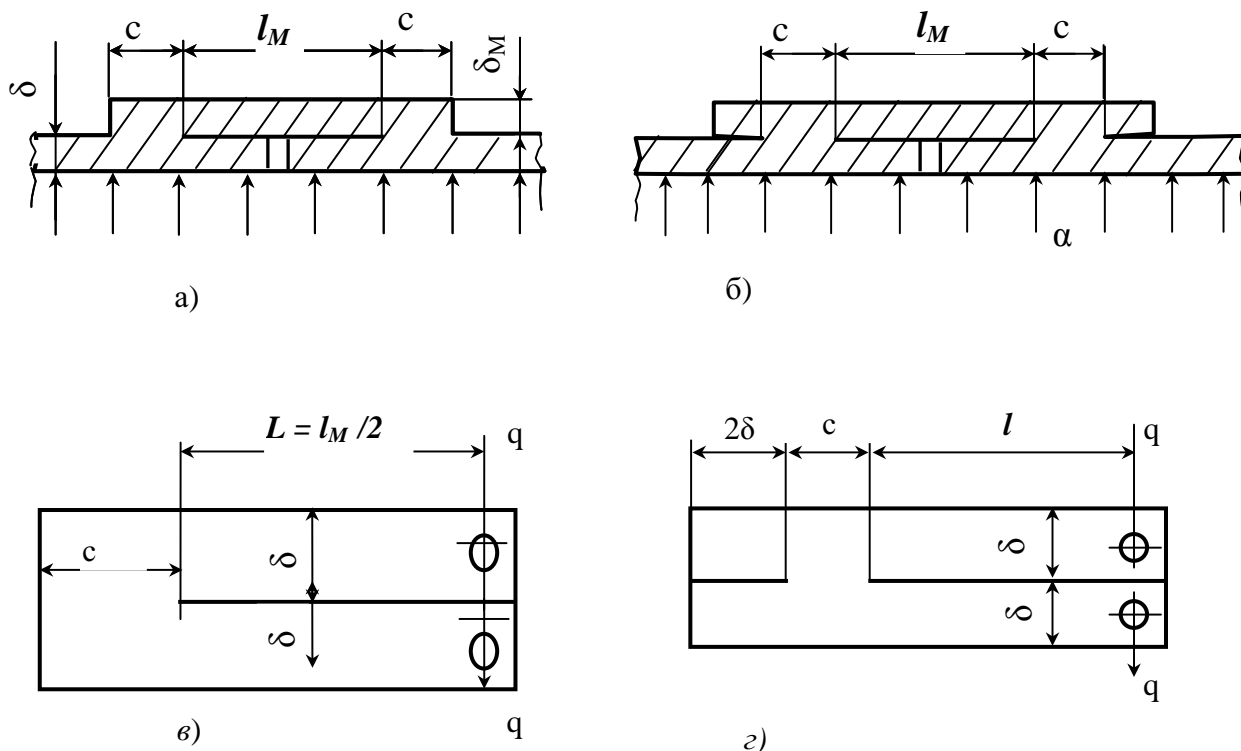


Рисунок 5 – Расчетные модели муфт с ограничением параметра «с» (а, б) и образцы для испытаний (в, г)

Зависимость относительной прочности $\varphi \left(\varphi = \frac{M_{пр}}{M_{пр}^*} \right)$ от параметра $m_{c\delta}$

представлена на рисунке 8.

При $m_{c\delta} = m_{c\delta}^*$ величина φ становится равной единице ($\varphi = 1,0$).

Экспериментальные зависимости $\varphi (m_{c\delta})$ при фиксированном значении параметра $m_{\delta l}$ достаточно хорошо аппроксимируются следующей функцией:

$$\varphi = 2 \sqrt{\frac{m_{c\delta} \cdot m_{\delta l}}{1 + m_{c\delta} \cdot m_{\delta l}}} \quad (10)$$

Очевидно, что при $\varphi = 1,0$ прочность образцов достигает прочности образцов без ограничения параметра «с» ($c \gg \delta$).

Таким образом, для образцов с произвольным значением $m_{c\delta}$ поправочная функция на основании формул (8) и (10) будет равна:

$$Y_2 = \left[\frac{3(1 + m_{c\delta} \cdot m_{\delta\ell})}{m_{c\delta} \cdot m_{\delta\ell}} \right]^{0,5} \quad (11)$$

С учетом уравнения (10) формула (7) примет следующий вид:

$$K_1 = \left[\frac{3(1 + m_{c\delta} \cdot m_{\delta\ell})}{m_{c\delta} \cdot m_{\delta\ell}} \right]^{0,5} \frac{M\sqrt{\delta_M}}{\delta^2}, \quad (12)$$

где $M = q\ell / b$.

Для цилиндрической трещинообразной полости величина $M = M_0 = \mu \cdot P \cdot R \cdot \delta_M$, тогда

$$K_1 = \frac{2\mu}{m_\delta} \left[\frac{3(1 + m_{c\delta} \cdot m_{\delta\ell})}{m_{c\delta} \cdot m_{\delta\ell}} \right]^{0,5} \sigma_z \sqrt{\delta_M}, \quad (13)$$

где σ_z , как и ранее, продольное напряжение от действия внутреннего давления ($\sigma_z = P/4\eta = PR/2\delta$); $m_{\delta\ell} = \frac{2c}{\ell_M}$.

Предельное давление для муфты с ограничением параметра "с" определяется из условия $K_1 = K_c$:

$$P_c = 2\eta \frac{K_c}{\mu\sqrt{\delta}} \left[\frac{m_{c\delta} \cdot m_{\delta\ell}}{3(1 + m_{c\delta} \cdot m_{\delta\ell})} \right]^{0,5}. \quad (14)$$

При $m_{c\delta} = 5/3$ и $m_{\delta\ell} = 0,2$ из формулы (14) вытекает формула для оценки предельного давления муфты без ограничения на параметр "с".

На рисунке 9 представлена зависимость поправочной функции Y_2 от параметра $m_{c\delta}$. Величина Y_2 имеет постоянное значение при $m_{c\delta} > m_{c\delta}^*$. В области значений $m_{c\delta} < m_{c\delta}^*$ Y_2 значительно возрастает, что приводит к соответствующему увеличению КИН (рисунок 10) и снижению прочности модели (рисунок 11).

При фиксированных значениях $m_{c\delta}$ предельное давление моделей возрастает с ростом прочностной характеристики K_c (рисунок 11).

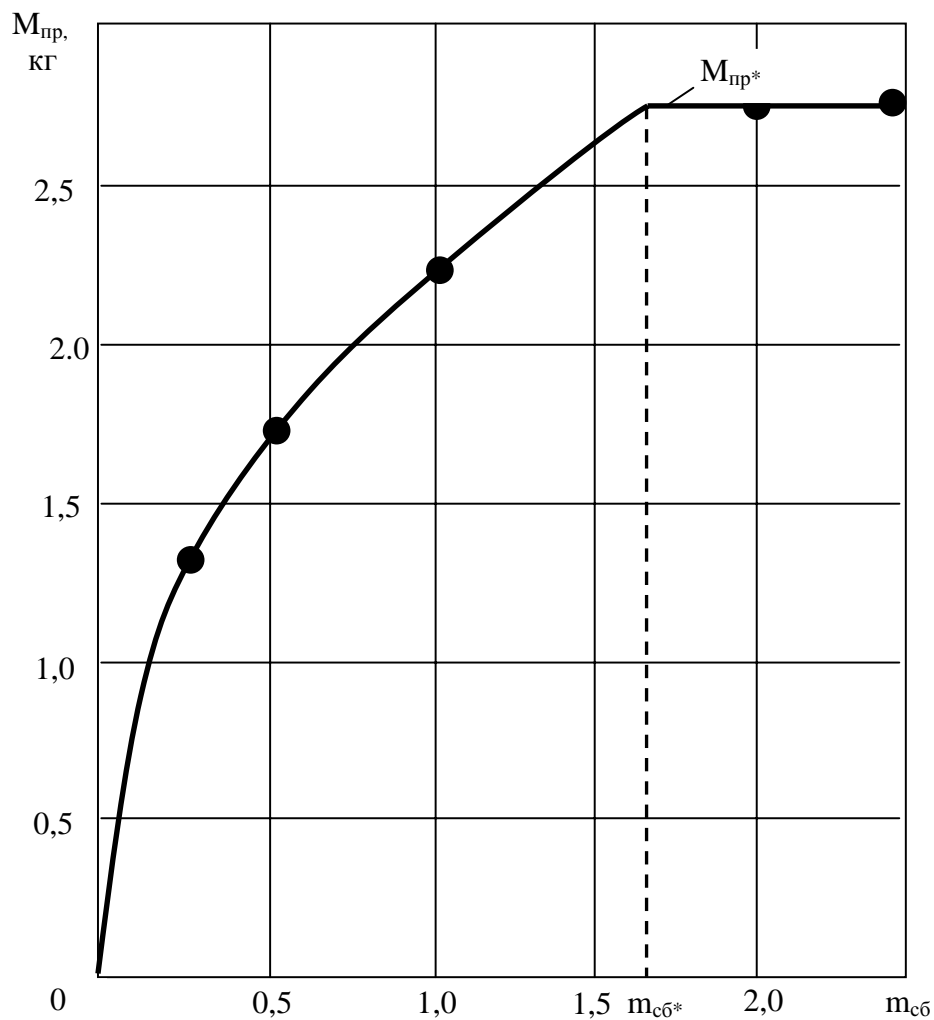


Рисунок 6 – Зависимость $M_{пр}$ от $m_{c\delta}$

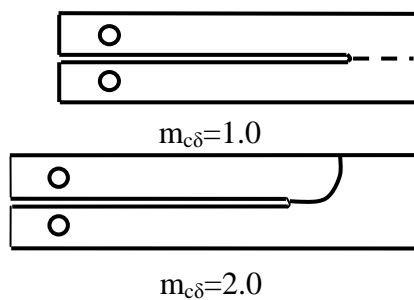


Рисунок 7 – Характерное разрушение образцов с различными параметрами (рисунок 5, в)

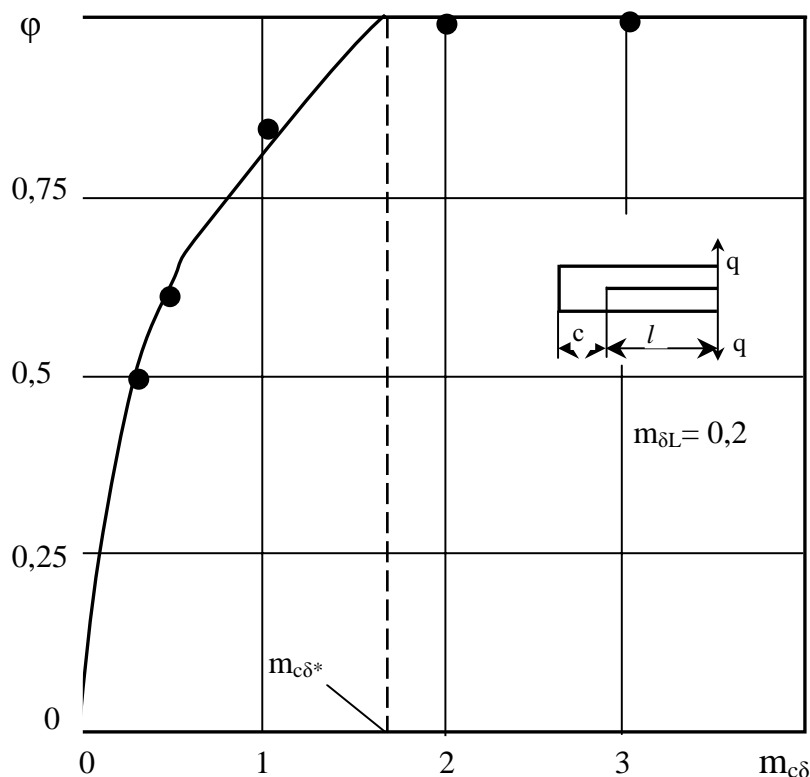


Рисунок 8 – Зависимость относительной прочности φ от параметра $m_{c\delta}$

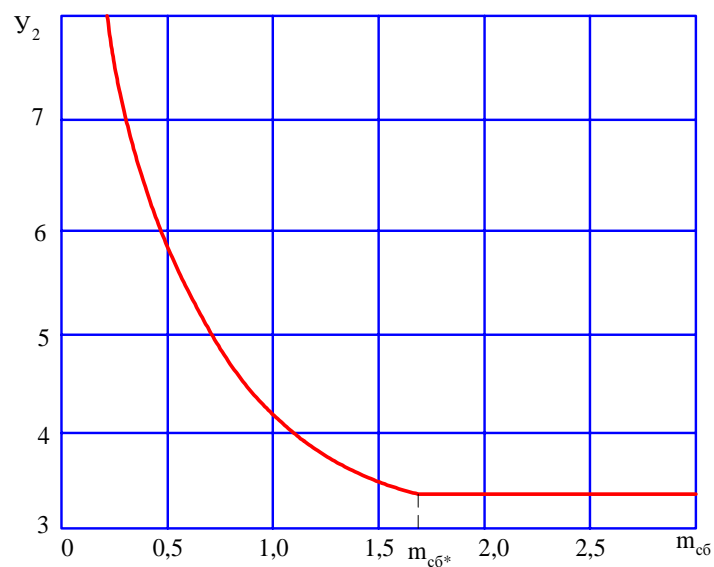
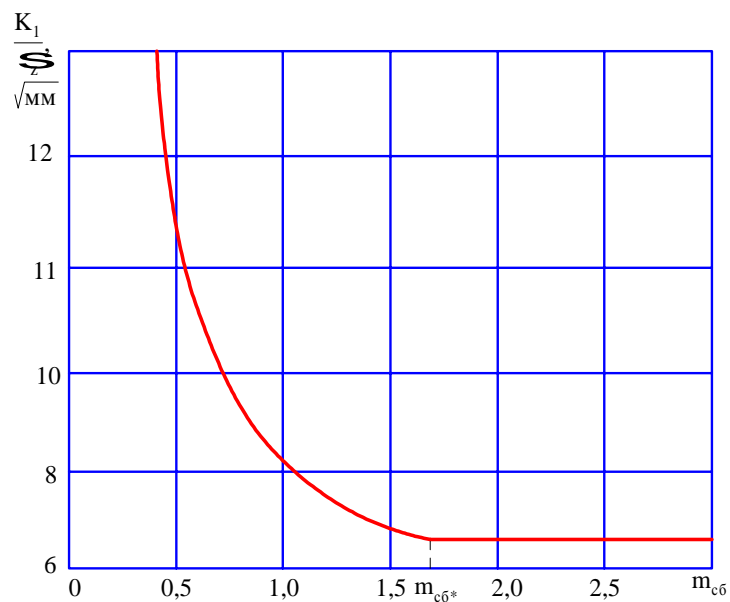
Общие закономерности механического поведения, установленные для образцов по схеме рисунка 5, в отмечаются и для образцов по схеме рисунка 5, г. Однако, прочностные характеристики образцов по схеме рисунка 5, г примерно на 35 % больше, чем у образцов по схеме рисунка 5, в.

На рисунке 13 сопоставлены зависимости относительной прочности φ от параметра $m_{c\delta}$ для образцов по схемам рисунка 5, в и г.

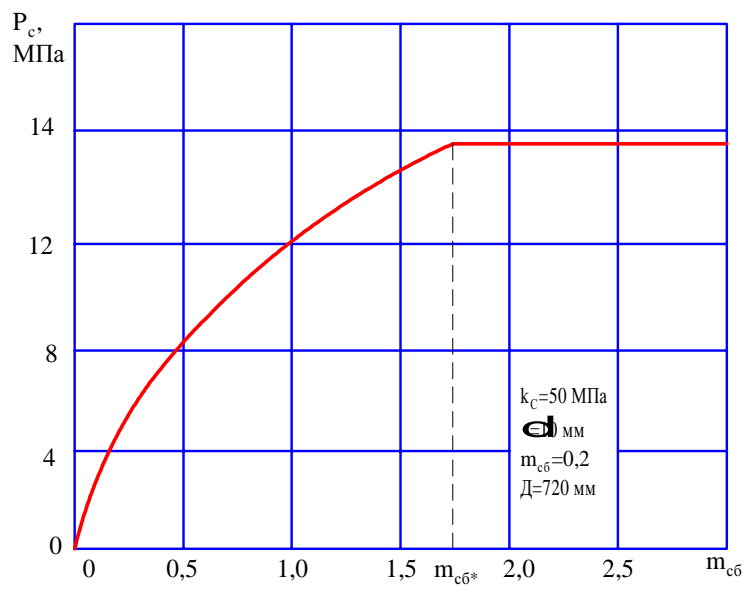
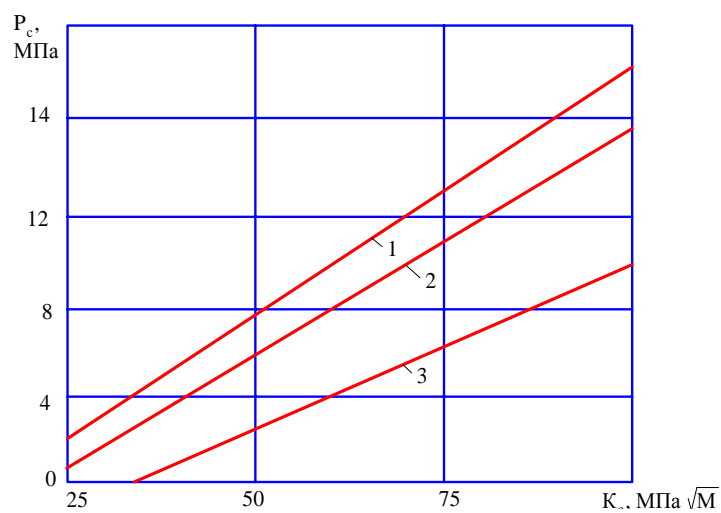
Видно, что условие $\varphi = 1,0$ для образцов по схеме рисунка 5, г обеспечивается при меньших значениях $m_{c\delta}^*$. В условиях опытов $m_{c\delta} \approx 0,75$.

При этом зависимость $\varphi(m_{c\delta})$ описывается функцией (10) за исключением того, что множитель перед квадратным корнем составляет 2,75:

$$\varphi = 2,75 \sqrt{\frac{m_{c\delta} \cdot m_{\delta l}}{1 + m_{c\delta} \cdot m_{\delta l}}} \quad (15)$$

Рисунок 9 – Зависимость от Y_2 $m_{c\delta}$ Рисунок 10 - Зависимость $\frac{K_1}{\sigma_z}$ от $m_{c\delta}$

Соответствующим образом изменяются значения поправочной функции, коэффициенты интенсивности напряжений и предельные давления. Характер разрушения образцов проиллюстрирован на рисунке 13.

Рисунок 11 - Зависимость P_c от $m_{с\delta}$ 1 - $m_{с\delta} \geq m_{с\delta}^*$; 2 - $m_{с\delta} = 1,0$; 3 - $m_{с\delta} = 0,5$ Рисунок 12 - Зависимости P_c от K_c

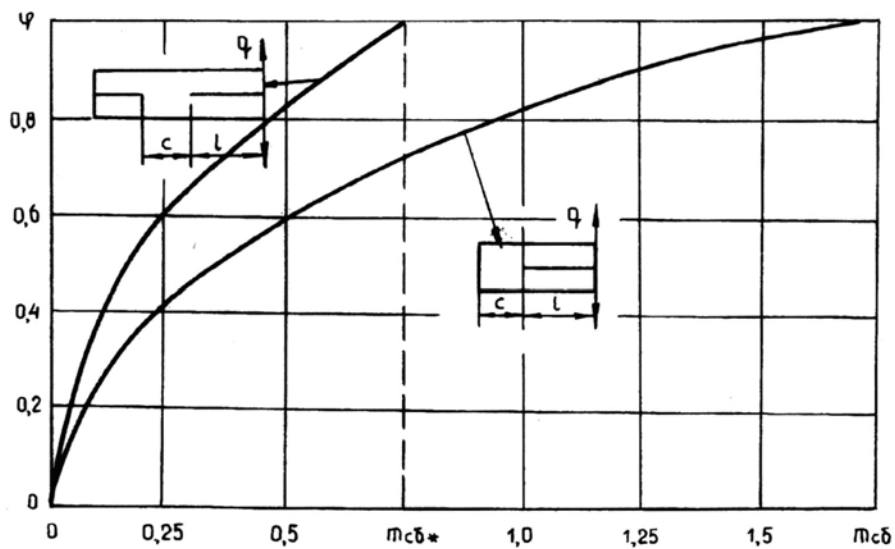
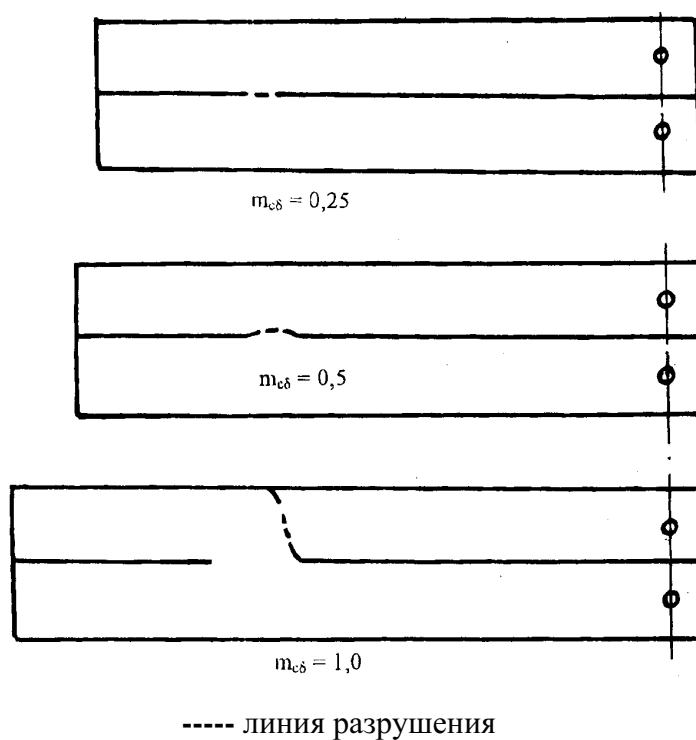
Рисунок 13 – Зависимость φ от $m_{c\delta}$ 

Рисунок 14 – Разрушение образцов по схеме рисунка 5, г

Литература

1. Махутов Н.А. Деформационное критерии разрушения и расчет элементов на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
2. Лобанов Л.М. и др. Основы проектирования конструкции / Л.М. Лобанов, В.И. Махненко, В.И. Труфяков. – Киев: Наукова думка, 1993. – Т.1. – 416 с.
3. Магистральные нефтепроводы: СНиП 2.05.06-85*. – М.: Стройиздат, 1985. – 52 с.