

Напряженное состояние равнопроходных тройниковых соединений трубопроводов при действии крутящих и изгибающих моментов

С. В. Кобельский^а, В. И. Кравченко^а, А. Л. Квитка^а, П. П. Ворошко^а,
И. А. Клименко^а, Б. Поспишил^б

^а Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

^б Фирма Research Consultant, Брно, Чехия

Проанализировано напряженное состояние тройника, в котором штуцер расположен по отношению к оси трубы под углом 90 и 45°, при действии крутящих и изгибающих моментов, вызывающих кручение и изгиб из плоскости тройника. Показано влияние угла наклона штуцера на характер изменения компонент тензора напряжений для различных видов нагружения. По теории прочности удельной потенциальной энергии формоизменения установлены значения коэффициентов концентрации напряжений для всех рассмотренных вариантов нагружения.

Исследование напряженного состояния тройниковых соединений выполнено с использованием разработанного в Институте проблем прочности НАН Украины пакета прикладных программ SPACE [1]. Ранее [2] с позиций трехмерной теории упругости рассматривалось влияние угла наклона штуцера к оси трубы на напряженное состояние тройникового соединения при нагружении его внутренним давлением и изгибающими моментами, действующими в плоскости тройника. Такое нагружение приводит к симметрии напряженного состояния относительно плоскости YOZ (рис. 1), что позволяло в качестве расчетной геометрической модели выбирать половину тройникового узла. Однако для оценки работоспособности тройников при эксплуатации их в составе трубопроводных систем необходимо учитывать также нагружение крутящими и изгибающими моментами, вызывающими кручение и изгиб из плоскости тройника. Этот вид нагружения заставляет усложнять расчетную схему тройникового узла. В качестве таковой для всех вариантов расчета рассматривалась общая трехмерная схема (рис. 1).

Результаты расчета представлены в основном для внутренней цилиндрической поверхности тройника. Это обусловлено необходимостью их согласования с анализом экстремального напряженного состояния от действия внутреннего давления, которое достигается на внутренней поверхности трубы [2], а также с приведенными в [3] данными экспериментальных исследований.

Рассмотрены два варианта равнопроходных тройниковых соединений, в которых угол θ между осями трубы и штуцера составляет соответственно 90 и 45°. В кинематической расчетной схеме тройника предусматривалась жесткая заделка одного из торцов трубы.

Концентрация напряжений в тройниковых соединениях при действии заданных нагрузок оценивалась по величинам коэффициентов концентрации напряжений, определяемым как отношение эквивалентных напряжений, вы-

численных по теории прочности удельной потенциальной энергии формоизменения, к номинальным эквивалентным напряжениям в обычной трубе при соответствующей нагрузке.

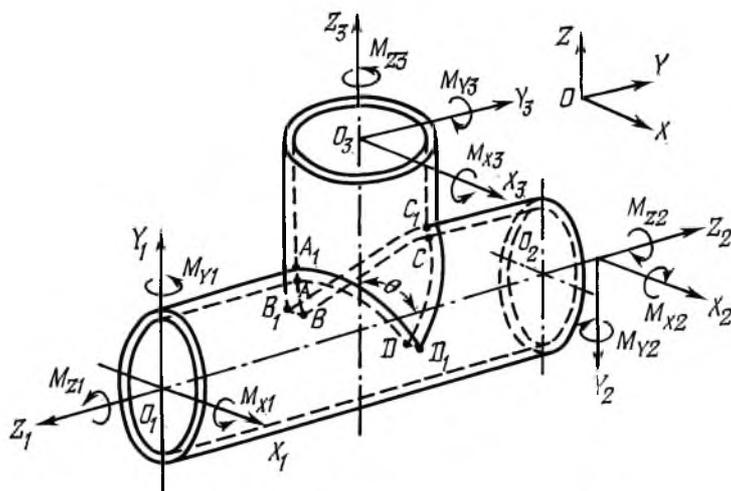


Рис. 1. Нагрузки, действующие на тройниковое соединение.

Номинальные напряжения в трубе от действия изгибающих моментов M_x , M_y и крутящих моментов M_z вычислялись по формулам

$$\sigma_{z \text{ nom}} = M_i R / J_i, \quad \sigma_{e \text{ nom}} = \sqrt{3} M_z R / J_p,$$

где

$$J_i = \frac{\pi R_{\max}^4}{4} (1 - k^4), \quad i = x, y; \quad J_p = \frac{\pi R_{\max}^4}{2} (1 - k^4), \quad k = \frac{R_{\min}}{R_{\max}}.$$

Для удобства сопоставления результатов расчетов нагрузки подобраны так, чтобы номинальные эквивалентные напряжения были равны 100 МПа. При этом $M_x = M_y = 55130 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $M_z = 63680 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $R_{\min} = 0,1252 \text{ м}$, $R_{\max} = 0,1359 \text{ м}$.

Результаты расчета напряженного состояния тройниковых соединений при действии указанных нагрузок представлены на рис. 2–5 в виде графиков изменения компонент тензора напряжений и эквивалентных напряжений вдоль внутренней линии $ABCD$ пересечения трубы и штуцера (рис. 1).

Действие изгибающего момента M_{y2} на торце трубы. Анализ графиков, приведенных на рис. 2, показывает, что угол θ определяет не только уровень максимальных эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экр}}$ в зоне пересечения трубы и штуцера, но и место на линии пересечения, в котором этот уровень достигается. Наибольшее напряжение $\sigma_{\text{экр}} = 191 \text{ МПа}$ наблюдается при $\theta = 90^\circ$ вблизи точек B и D линии пересечения (рис. 2,а). Оно обусловлено действием вблизи этих точек максимальных осевых напряжений σ_z , равных соответственно -187 и 187 МПа . Окружные σ_φ и

касательные $\tau_{\varphi z}$ напряжения здесь незначительны и на уровень максимальных эквивалентных напряжений влияния практически не оказывают. Характерной особенностью напряженного состояния тройникового соединения для угла $\theta = 45^\circ$ является снижение уровня максимальных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ до 155 МПа (рис. 2, б). Кроме того, в данном случае происходит смещение вдоль линии пересечения $ABCD$ максимума эквивалентных напряжений с линии AB на линию BC и с линии DA на линию CD .

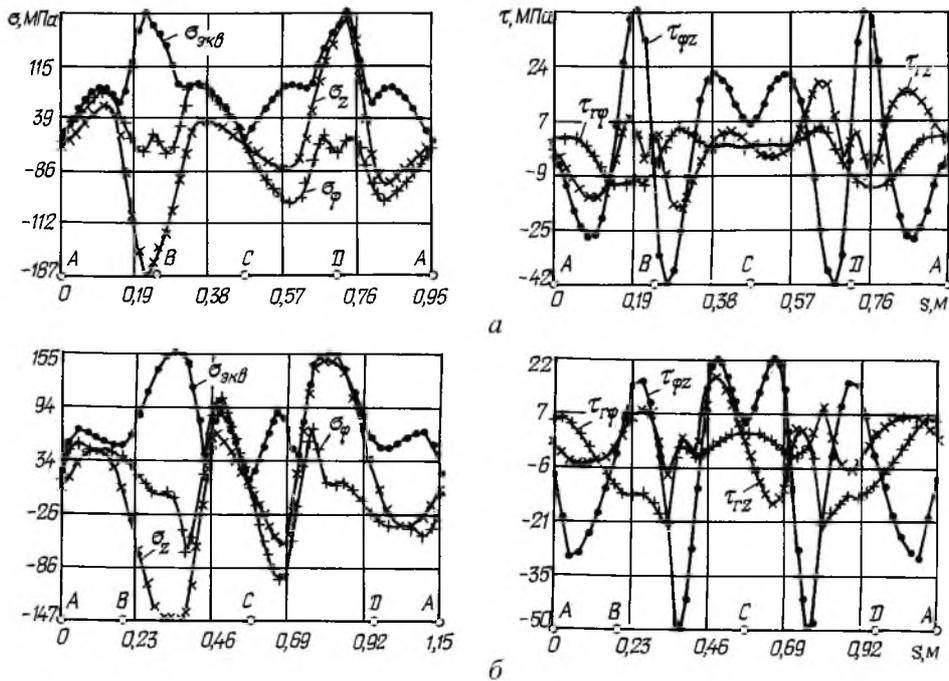


Рис. 2. Распределение напряжений вдоль линии $ABCD$ при действии изгибающего момента M_{y2} на торце трубы: а - $\theta = 90^\circ$; б - $\theta = 45^\circ$.

Действие изгибающего момента M_{y3} на торце штуцера. Результаты расчета, представленные на рис. 3, свидетельствуют, что, как и в рассмотренном выше случае, для угла $\theta = 45^\circ$ происходит снижение максимальных эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ на линии пересечения трубы и штуцера. Однако точка, в которой действуют эти напряжения, смещается вдоль линии пересечения незначительно и не выходит за границу участков AB и DA . Максимальных значений, равных 623 МПа, напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ достигают для $\theta = 90^\circ$. Для $\theta = 45^\circ$ они уменьшаются до 320 МПа. Максимум эквивалентных напряжений в данном случае определяется не только осевыми σ_z , но и окружными σ_φ и касательными $\tau_{\varphi z}$ напряжениями. Необходимо отметить, что для угла $\theta = 45^\circ$ наблюдается появление на участках BC и CD линии пересечения трубы и штуцера зон, в которых эквивалентные напряжения возрастают на 43% по сравнению с напряжениями для прямого тройника. Для $\theta = 45^\circ$ они увеличиваются и достигают 260 МПа.

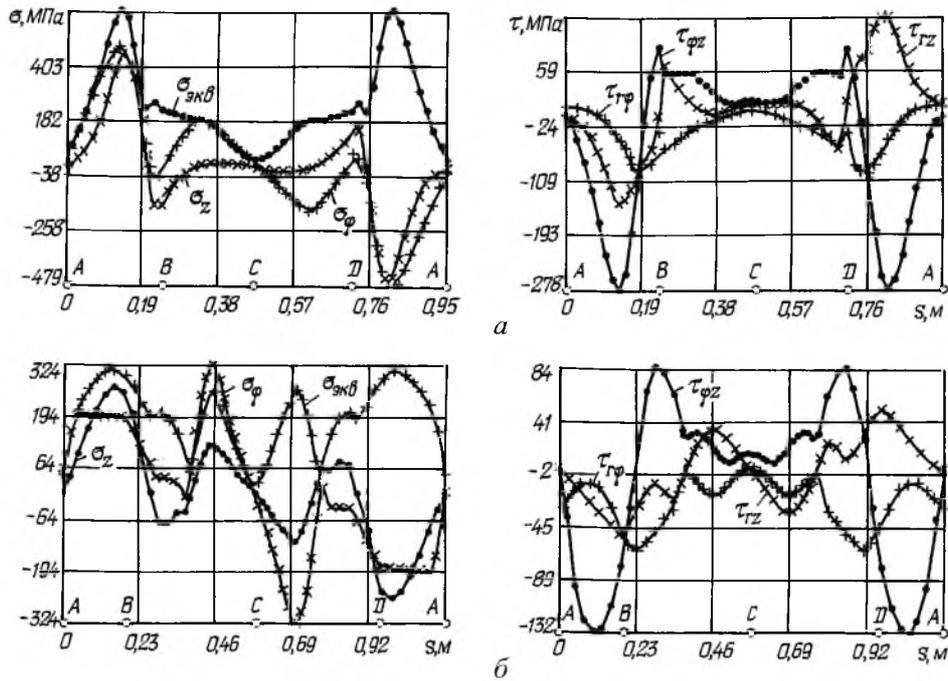


Рис. 3. Распределение напряжений вдоль линии $ABCD$ при действии изгибающего момента M_{y_3} на торце штуцера: $a - \theta = 90^\circ$; $b - \theta = 45^\circ$.

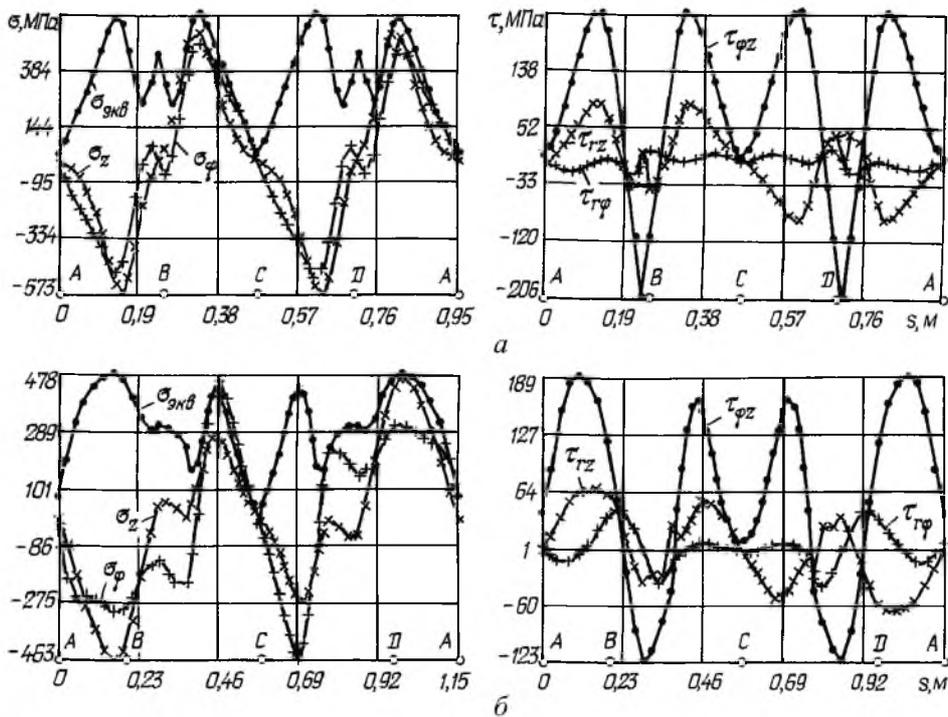


Рис. 4. Распределение напряжений вдоль линии $ABCD$ при действии крутящего момента M_{z_2} на торце трубы: $a - \theta = 90^\circ$; $b - \theta = 45^\circ$.

Действие крутящего момента M_{z2} на торце трубы. На линии пересечения трубы и штуцера (рис. 4) имеют место четыре зоны, где напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ достигают экстремума. Их максимальная величина определяется осевыми σ_z , окружными σ_φ и касательными $\tau_{\varphi z}$ напряжениями. Наибольших значений, равных 624 МПа, эквивалентные напряжения достигают для прямого тройника. Для угла $\theta = 45^\circ$ наблюдается снижение напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ на участках AB и DA до 478 МПа.

Действие крутящего момента M_{z3} на торце штуцера. Напряженное состояние тройникового соединения представлено на рис. 5. Из анализа графиков следует, что эквивалентные напряжения для угла $\theta = 45^\circ$ возрастают. Максимальных значений они достигают на участках AB и DA линии пересечения и составляют 757 МПа. Для прямого тройника эти напряжения равны 531 МПа. Следует отметить, что для угла $\theta = 45^\circ$ на участках BC и CD наблюдается заметное снижение эквивалентных напряжений. Для $\theta = 90^\circ$ напряжения $\sigma_{\text{экв}} = 481$ МПа, а для $\theta = 45^\circ$ они снижаются до 276 МПа.

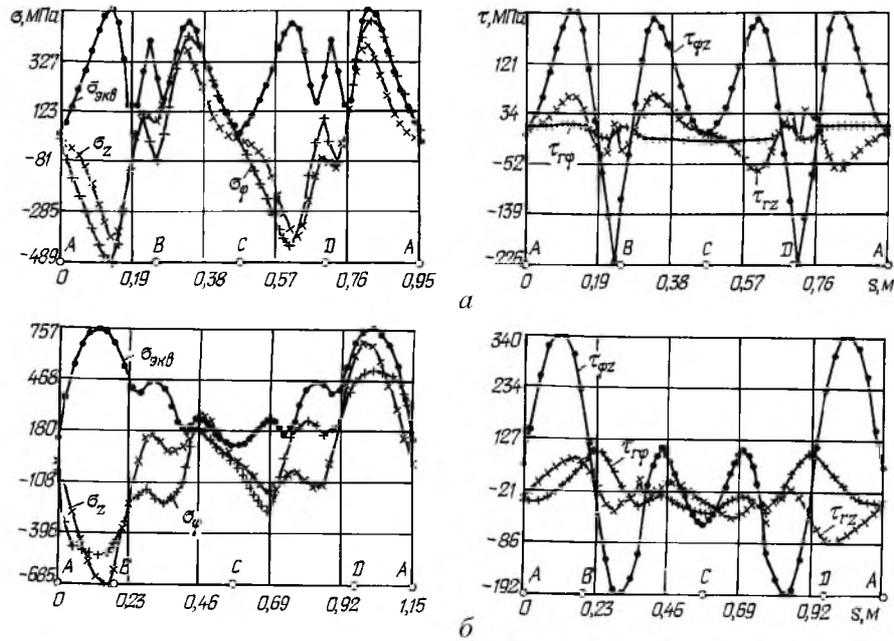


Рис. 5. Распределение напряжений вдоль линии $ABCD A$ при действии крутящего момента M_{z3} на торце штуцера: $a - \theta = 90^\circ$; $b - \theta = 45^\circ$.

При нагружении тройникового соединения крутящими и изгибающими моментами наибольшие напряжения могут действовать на его наружной поверхности, что подтверждается результатами расчета. В табл. 1 представлены максимальные эквивалентные напряжения, а также максимальные теоретические $\alpha_{\text{теор}}$ и экспериментальные $\alpha_{\text{эксп}}$ [3] коэффициенты концентрации напряжений на внутренней и наружной поверхностях прямого тройника при действии заданных нагрузок. В табл. 2 приведены максимальные значения теоретических коэффициентов концентрации напряжений на внутренней и наружной поверхностях тройника с наклонным штуцером.

Т а б л и ц а 1

Сравнение теоретических и экспериментальных коэффициентов концентрации напряжений для прямого тройника

Нагрузка	Линия ABCDA			Линия A ₁ B ₁ C ₁ D ₁ A ₁		
	$\sigma_{\text{экв}}$, МПа	$\alpha_{\text{теор}}$	$\alpha_{\text{эксп}}$	$\sigma_{\text{экв}}$, МПа	$\alpha_{\text{теор}}$	$\alpha_{\text{эксп}}$
M_{x2}	304	3,30	2,80	332	3,32	3,54
M_{x3}	548	5,96	6,07	479	4,79	4,01
M_{y2}	191	2,07	1,87	187	1,87	2,29
M_{y3}	623	6,77	5,76	703	7,03	7,02
M_{z2}	624	6,77	5,14	763	7,63	5,71
M_{z3}	531	5,76	5,60	769	7,69	7,71

Т а б л и ц а 2

Значения теоретических коэффициентов концентрации напряжений $\alpha_{\text{теор}}$ в тройнике с наклонным штуцером ($\theta = 45^\circ$)

Нагрузка	Линия ABCDA	Линия A ₁ B ₁ C ₁ D ₁ A ₁
M_{x2}	2,89	3,03
M_{x3}	4,95	6,66
M_{y2}	1,68	1,99
M_{y3}	3,47	6,32
M_{z2}	5,19	8,67
M_{z3}	8,22	13,60

На рис. 6 представлено сравнение расчетных и экспериментальных [3] коэффициентов концентрации напряжений для прямого тройникового соединения. Видно, что различие между ними не превышает 15%.

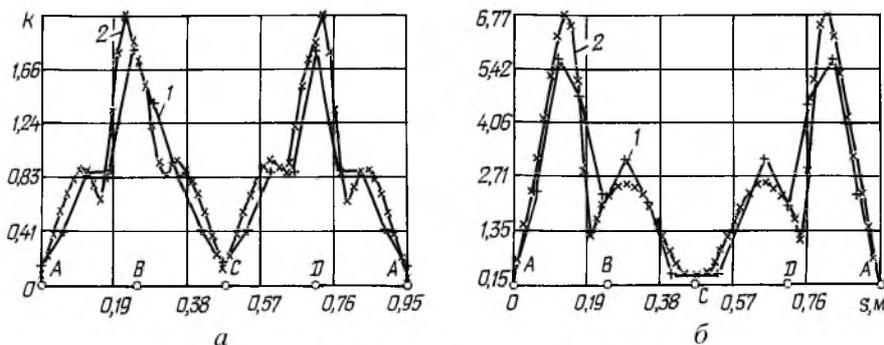


Рис. 6. Сравнение экспериментальных (1) и расчетных (2) коэффициентов концентрации напряжений на линии ABCDA для $\theta = 90^\circ$: а – действие изгибающего момента M_{y2} на торце трубы; б – действие изгибающего момента M_{y3} на торце штуцера.

Таким образом, на основе выполненных исследований установлены потенциально опасные зоны в местах стыка трубы и штуцера при различных углах между их осями, а также определены для этих зон коэффициенты концентрации напряжений. Показано, что для угла $\theta = 45^\circ$ при нагружении тройника изгибающими моментами, приложенными на торце трубы, наблю-

дается перераспределение напряжений по линии пересечения трубы и штуцера и снижение на 19% максимальных значений эквивалентных напряжений и коэффициентов концентрации напряжений. При этом относительный уровень напряжений в тройниковом соединении невысок.

Нагружение прямого тройника изгибающим моментом, приложенным на торце штуцера, характеризуется высокими значениями эквивалентных напряжений на линии пересечения трубы и штуцера. Для угла $\theta = 45^\circ$ эти напряжения снижаются на 48%. При этом наблюдается значительный рост (на 52%) напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ на участках *BC* и *CD* линии пересечения.

При нагружении прямого тройника крутящим моментом, приложенным на торце трубы, также достигается высокий уровень эквивалентных напряжений. Для угла $\theta = 45^\circ$ эти напряжения снижаются на 29%. При действии крутящего момента, приложенного на торце штуцера, имеют место высокие уровни эквивалентных напряжений, которые для данного угла θ на внутренней поверхности возрастают на 43%, а на наружной – на 77%.

Резюме

Проанализовано напряжений стан трійника, в якому штуцер розташовано по відношенню до осі труби під кутом 90 і 45°, при дії крутильних й згинальних моментів, що викликають кручення і згин із площини трійника. Показано вплив кута нахилу штуцера на характер зміни компонент тензора напружень для різних видів навантажень. По теорії міцності питомої потенціальної енергії формозміни встановлено значення коефіцієнтів концентрації напружень для всіх розглянутих варіантів навантаження.

1. *Разработать* информационно-технологическую систему современных ПЭВМ исследования трехмерных моделей МКЭ термопластических твердых тел для определения термонапряженного состояния элементов машиностроительных конструкций при квазистатических воздействиях. Отчет о НИР (заключит.) // УкрИНТЭИ; Руковод. П. П. Ворошко. – № ГР 0193U018813; Инв. № 0294U000746. – Киев, 1993. – 410 с.
2. *Кобельский С. В., Кравченко В. И., Квитка А. Л. и др.* Анализ напряженного состояния равнопроходных тройниковых соединений трубопроводов. Сообщ. 1 // Пробл. прочности. – 1998. – № 6. – С. 116 – 123.
3. *Moffat D. G.* Experimental stress analysis of 4 fabricated equal diameter branch intersections subjected to moment loadings. – Proc. 5th Intern. Conf. Pressure Vessel Tech. – San Francisco, 1984.

Поступила 11. 05. 99