

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КРУГОВОГО ПРЕРЫВИСТОГО СВАРНОГО ШВА ТАВРОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Ю.В. БЕЛОУСОВ, канд. техн. наук, доцент

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

В статье рассмотрены вопросы расчета кругового прерывистого сварного шва тавровых соединений. Проведен сравнительный анализ напряжений в опасном сечении сплошного и прерывистого шва.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: касательные напряжения, осевой момент сопротивления опасного сечения, главные осевые моменты инерции опасного сечения.

Сварные соединения – наиболее рациональный и распространенный вид неразъемных соединений. Их широко применяют в строительстве и машиностроении. Достаточно подробно разработаны методы расчета стыковых и нахлесточных соединений [1, 2]. Расчет угловых швов таврового соединения проводят по касательным напряжениям в повернутом опасном сечении шва. Сварное тавровое соединение может работать на изгиб и кручение. При поперечном изгибе в опасном сечении возникают напряжения от изгибающего момента M и поперечной силы Q . При одновременном нагружении крутящим моментом, добавляются напряжения от крутящего момента T . Суммарные касательные напряжения $\overline{\tau}_\Sigma$ в наиболее нагруженной зоне повернутого опасного сечения:

$$\overline{\tau}_\Sigma = \overline{\tau}_M + \overline{\tau}_Q + \overline{\tau}_T,$$

где τ_M – модуль вектора касательного напряжения от изгибающего момента M , τ_Q – модуль вектора касательного напряжения от поперечной силы Q , τ_T – модуль вектора касательного напряжения от крутящего момента T .

Наибольшие нормальные напряжения от изгибающего момента M определяют по формуле

$\tau_{M_{max}} = M/W_x$, где W_x – осевой момент сопротивления повернутого опасного сечения. Осевой момент сопротивления W_x сплошного шва может быть определен по известным формулам сопротивления материалов для сечения шва в форме круглого и прямоугольного кольца, двух прямоугольников. Осевой момент сопротивления W_x опасного сечения прерывистого шва по известным формулам сопротивления материалов может быть определен только для прямоугольного кольца и двух прямоугольников.

Для определения осевого момента сопротивления повернутого опасного сечения кругового прерывистого шва рассмотрим сектор тонкого кольца (рис. 1). Для него [2]:

$$y_1 = \frac{d - \delta}{2} \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} - \cos \alpha \right) + \frac{\delta \cos \alpha}{2},$$

$$J_1 = \frac{\delta(d - \delta)^3}{8} \left[\alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{2\sin^2 \alpha}{\alpha} \right],$$

$$J_2 = \frac{\delta(d - \delta)^3}{8} \left(\alpha - \frac{\sin 2\alpha}{2} \right),$$

где J_1 и J_2 – главные осевые моменты инерции сечения относительно осей 1 и 2.

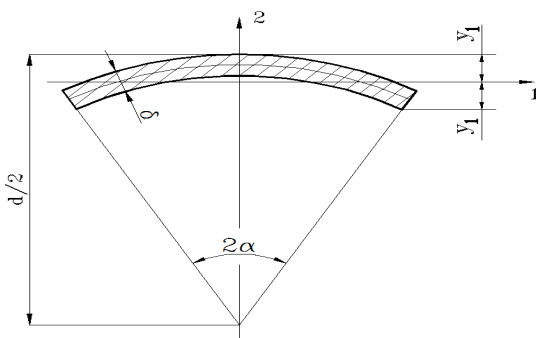


Рис. 1

Расположим равномерно по окружности четыре сектора (рис 2).
Моменты инерции этой группы секторов

$$J_1^1 = J_2^1 = 2J_2 + 2 \left[J_1 + d\delta\alpha \left(\frac{d}{2} - y_1 \right)^2 \right]$$

также являются главными. При повороте осей 1^1 и 2^1 на любой угол моменты J_1^1 и J_2^1 не изменятся, так как центробежный момент инерции J_{12}^1 равняется нулю. Таким образом, если представить прерывистый сварной шов как совокупность участков, количество которых кратно четырем, то

$$\begin{aligned} J_{1\Sigma}^1 = J_{2\Sigma}^1 &= 2n \left[J_1 + J_2 + d\delta\alpha \left(\frac{d}{2} - y_1 \right)^2 \right] = \\ &= 2n \left[\frac{\delta(d-\delta)^3}{8} \left(2\alpha - \frac{2\sin^2\alpha}{\alpha} \right) + d\delta\alpha \left(\frac{d}{2} - y_1 \right)^2 \right], \end{aligned}$$

где n – количество групп из четырех участков.

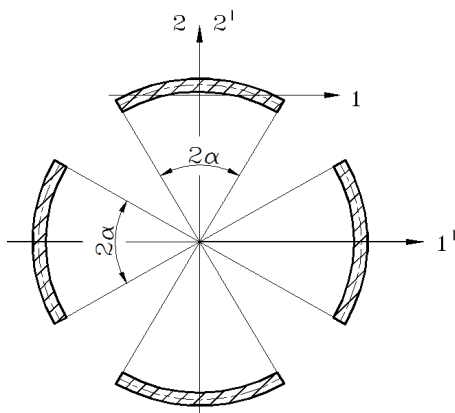


Рис. 2

Поскольку d много больше δ и y_1 , то

$$\begin{aligned} J_\Sigma &= J_{1\Sigma}^1 = J_{2\Sigma}^1 \approx \\ &\approx 2n \left[\frac{\delta d^3}{8} \left(2\alpha - \frac{2\sin^2\alpha}{\alpha} \right) + \frac{\delta d^3 \alpha}{4} \right] = \\ &= \frac{\delta d^3 n}{2} \left(2\alpha - \frac{\sin^2\alpha}{\alpha} \right). \end{aligned}$$

Представим $\alpha = \pi/kn$, где $k = 4(1 + l_{\text{пр}}/l_{\text{ш}})$ при равномерном расположении по окружности четырех участков шва с заданным соотношением длины промежутка между участками $l_{\text{пр}}$ к длине участка $l_{\text{ш}}$, n – также количество групп из четырех участков. Тогда

$$J_\Sigma = \frac{\delta d^3 n}{2} \left[\frac{2\pi}{kn} - \frac{\sin^2\left(\frac{\pi}{kn}\right)}{\frac{\pi}{kn}} \right].$$

В пределе, при увеличении n

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} J_\Sigma &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\delta d^3 \left(\frac{\pi}{k} - \frac{n \sin^2\left(\frac{\pi}{kn}\right)}{2 \frac{\pi}{kn}} \right) \right] = \delta d^3 \left[\frac{\pi}{k} - \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n \sin^2\left(\frac{\pi}{kn}\right)}{2 \frac{\pi}{kn}} \right) \right] = \\ &= \delta d^3 \left[\frac{\pi}{k} - \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n}{2} \sin\left(\frac{\pi}{kn}\right) \frac{\sin\left(\frac{\pi}{kn}\right)}{\frac{\pi}{kn}} \right) \right] = \\ &= \delta d^3 \left[\frac{\pi}{k} - \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n}{2} \sin\left(\frac{\pi}{kn}\right) \right) \right] = \delta d^3 \left[\frac{\pi}{k} - \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\pi}{2k} \frac{\sin\left(\frac{\pi}{kn}\right)}{\frac{\pi}{kn}} \right) \right] = \\ &= \delta d^3 \left(\frac{\pi}{k} - \frac{\pi}{2k} \right) = \frac{\delta d^3 \pi}{2k}. \end{aligned}$$

Суммарный осевой момент сопротивления повернутого опасного сечения

$$W_\Sigma = \pi d^3 \delta / k.$$

Тогда отношение моментов сопротивления сплошного кольца и прерывистого:

$$\frac{W_X}{W_\Sigma} = \frac{\pi d^2 \delta}{4} : \frac{\pi d^2 \delta}{k} = \frac{k}{4}.$$

В частности, когда длина каждого участка шва равна длине промежутка между ними, т. е. $k = 8$, а $\alpha = \pi/8$, то $W_X/W_\Sigma = 2$. При более точном расчете: для четырех участков – $W_X/W_\Sigma = 1,904$, для восьми – $W_X/W_\Sigma = 1,975$, для шестнадцати – $W_X/W_\Sigma = 1,994$, для тридцати двух – $W_X/W_\Sigma = 1,998$.

Когда длина участка в два раза меньше промежутка между ними ($k = 12$) – $W_X/W_\Sigma = 3$, если в два раза больше ($k = 6$) – $W_X/W_\Sigma = 1,5$.

Отношение напряжений для сплошного и прерывистого шва обратно пропорционально отношению осевых моментов сопротивления их повернутого опасного сечения, т. е. $\tau_{M_{max}}^{пер.} / \tau_{M_{max}}^{спл.} = k/4$.

Касательные напряжения от поперечной силы в повернутом опасном сечении для сплошного тонкостенного кольца [2]

$$\tau_{Q_{max}} = 2 \frac{Q}{\pi d \delta},$$

где Q – поперечная сила в повернутом опасном сечении шва, d – диаметр средней линии кольца, т. е. касательные напряжения в сечении распределены неравномерно и их максимальные значения в два раза больше равномерно распределенных. Максимальные касательные напряжения от поперечной силы в каждом элементе прерывистого шва могут быть определены по формуле

$$\tau_{Q_{max}} = \frac{Q}{d \delta a m} \cdot \frac{1 - \cos \alpha}{1 - \frac{\sin 2\alpha}{2\alpha}}.$$

Представим $\alpha = \pi/k' m$, где $k' = 1 + l_{пр}/l_{ш}$, m – количество участков прерывистого шва. Тогда

$$\tau_{Q_{max}} = \frac{kQ}{\pi d \delta} \cdot \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{k' m}\right)}{1 - \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{k' m}\right)}{\frac{2\pi}{k' m}}}.$$

В пределе, при увеличении количества участков

$$\begin{aligned} \lim_{m \rightarrow \infty} (\tau_{Q_{max}}) &= \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\frac{kQ}{\pi d \delta} \cdot \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{k' m}\right)}{1 - \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{k' m}\right)}{\frac{2\pi}{k' m}}} \right) = \\ &= \lim_{m \rightarrow \infty} \left(\frac{kQ}{\pi d \delta} \cdot \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{k' m}\right)}{1 - \frac{1}{2} \frac{2 \sin\left(\frac{\pi}{k' m}\right) \cos\left(\frac{\pi}{k' m}\right)}{\frac{\pi}{k' m}}} \right) = \\ &= \frac{kQ}{\pi d \delta} \frac{\lim_{m \rightarrow \infty} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{k' m}\right) \right]}{\lim_{m \rightarrow \infty} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{k' m}\right) \right]} = \frac{kQ}{\pi d \delta}. \end{aligned}$$

Если $k' = 2$ ($l_{ш} = l_{пр}$), то $\tau_{Q_{max}} = 2Q/\pi d \delta$, также как в опасном сечении в форме сплошного тонкостенного кольца. Когда $k' = 3$ ($2l_{ш} = l_{пр}$) – $\tau_{Q_{max}} = 3Q/\pi d \delta$, т.е. в 1,5 раза больше.

При определении касательных напряжений в повернутом опасном сечении шва от крутящего момента отметим, что крутящий момент, приложенный к сварному шву с замкнутым контуром опасного сечения, уравнивается мо-

ментами внутренних сил с длиной плеча порядка поперечных размеров сечения, а открытого профиля – порядка толщины (ширины поперечного сечения шва).

Максимальные касательные напряжения от крутящего момента в сплошном круговом шве

$$\tau_{T_{max}}^{спл.} = \frac{T}{2A^*\delta} = \frac{2T}{\pi(d-\delta)^2\delta} \approx \frac{2T}{\pi d^2\delta},$$

где A^* – площадь, ограниченная средней линией контура шва.

Максимальные касательные напряжения в прерывистом шве

$$\tau_{T_{max}}^{пер.} = \frac{3T}{\delta^2 \sum S} \approx \frac{3T}{\delta^2 \pi d q},$$

где $\sum S$ – суммарная длина контура поперечного сечения шва, q – отношение суммарной длины прерывистого шва к длине сплошного шва ($q < 1$). Тогда

$$\frac{\tau_{T_{max}}^{пер.}}{\tau_{T_{max}}^{спл.}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{d}{q\delta}.$$

Так, если $q = 0,5$; то $\tau_{T_{max}}^{пер.}/\tau_{T_{max}}^{спл.} = 3d/\delta$, если $q = 0,25$ – $\tau_{T_{max}}^{пер.}/\tau_{T_{max}}^{спл.} = 6d/\delta$.

Круговые прерывистые швы довольно часто выполняются в сварных барабанах и шкивах. Они работают в основном на кручение. Поэтому касательные напряжения в опасном сечении этих швов могут на два порядка и более превышать касательные напряжения в опасном сечении сплошных швов, что предъявляет повышенные требования к размерам и качеству данных швов.

Суммарные касательные напряжения в опасном сечении шва

$$\tau_{\Sigma_{max}} = \sqrt{(\tau_{Q_{max}} + \tau_{T_{max}})^2 + \tau_{M_{max}}^2}.$$

Условие прочности соединения $\tau_{\Sigma_{max}} \leq [\tau]$, где $[\tau]$ – допускаемое напряжение для угловых швов.

Подобным образом может быть выполнен расчет таврового соединения и со стыковыми швами. Только в этом случае напряжения от изгибающего момента, определяемые аналогично, будут не касательными $\tau_{M_{max}}$, нормальными $\sigma_{M_{max}}$. Расчет стыковых швов на статическую прочность следует проводить по эквивалентным нормальным напряжениям σ_E в опасном сечении, испытывающим сложное напряженное состояние.

Для определения σ_E обычно используют четвертую теорию прочности $\sigma_E \leq [\sigma]_P$, где $[\sigma]_P$ – допускаемое напряжение для стыковых швов.

Л и т е р а т у р а

1. *Carlaw K.I., Lipsey R.G.* Sustained Endogenous Growth Driven by Structured and Evolving General Purpose Technologies// *J. of Evolutionary Econ.*, 2011, Vol. 21. Iss. 4.

2. *Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б.* Расчет на прочность деталей машин: Справочник. – 4-е изд., перер. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.

R e f e r e n c e s

1. *Carlaw, K.I., Lipsey, R.G.* (2011). Sustained Endogenous Growth Driven by Structured and Evolving General Purpose Technologies. *J. of Evolutionary Econ.*, Vol. 21. Iss. 4.

2. *Birger, I.A., Shorr, B.F., Iosilevich, G.B.* (1993). *Raschet na Prochnost Detalej Mashin: Spravochnik*, 4-e izd., pererab. i dop., M.: Mashinostroenie, 640 p.

ANALYSIS OF THE TENSION STATE OF THE CIRCUMFERENTIAL INTERMITTENT WELD OF THE T – JOINING

Y.V. Belousov

Moscow State Technical University named after N. Bauman

In the paper, the problems of analysis of the round faltering welding seam of the T – joining are considered. The quantitative analysis of tangent stresses in serried and faltering seam is made.

KEY WORDS: tangent stresses, axis moment of resistance of the perilous split, principal axis moments inertia of the perilous split.