

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ ТАВРОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Е.А. Усманова, М.В. Шахматов

COMPLEX APPROACH TO ESTIMATION OF DURABILITY OF T-SHAPED WELDED CONNECTIONS

Е.А. Usmanova, M. V. Shakhmatov

Рассмотрены расчетные методики оценки несущей способности сварных соединений с угловыми швами в условиях вязкого и квазихрупкого разрушений.

Ключевые слова: угловые швы, сварные соединения, вязкое разрушение, квазихрупкое и хрупкое разрушение.

Computational techniques for estimation of bearing ability of welded connections with corner seams in the conditions of ductile and quasibrittle fracture are considered.

Keywords: corner seams, welded connections, ductile fracture, quasibrittle and brittle fracture.

Повышение эффективности работы тавровых сварных соединений можно достичь путем выбора оптимальных сечений сварных швов, характеризующихся наименьшим количеством наплавленного металла при заданных нагрузках. Очевидно, что проектирование сварных соединений с неполными проплавлениями и пониженными сечениями угловых швов должно быть основано на соответствующих расчетных методиках оценки их прочности. Существующие методики расчета на прочность тавровых соединений с угловыми швами разработаны в основном для равнокатетных швов, то есть для частного случая их геометрической формы. Последнее значительно ограничивает использование предлагаемых расчетных методик и не позволяет провести оптимизацию геометрических параметров рассматриваемых соединений с точки зрения обеспечения их максимальной несущей способности при заданном объеме наплавленного металла. В данной работе приведены комбинированные расчетные методики оценки несущей способности угловых швов в условиях вязкого разрушения и их сопротивляемости квазихрупким и хрупким разрушениям с учетом локальных пластических деформаций в окрестности места сопряжения и величины радиуса последнего.

Теоретический анализ вязкой прочности тавровых соединений был выполнен с использованием кинематической теоремы предельного равновесия [1]. При этом приняты следующие упрощающие условия и допущения: металл соединений изотропный, однородный и идеально упругопластический, подчиняющийся условию текучести Губера-Мизеса. На основе экспериментальных данных была принята следующая расчетная схема, отражающая характер пластического деформиро-

вания и особенности напряженного состояния тавровых соединений с угловыми швами (рис. 1). В предельном состоянии, характеризующем вязкое разрушение рассматриваемых соединений, очаг пластической деформации может быть представлен упрощенными линиями скольжения OA_i , совпадающими с плоскостью вязкого разрушения.

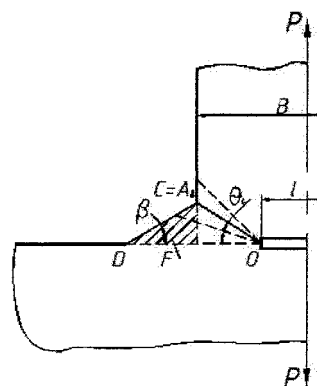


Рис. 1. Тавровое соединение с диапазоном изменения угла θ_i

Согласно [1] мощность внутренних w_L и внешних w_p сил на единицу длины соединения в плоскости, перпендикулярной чертежу (рис. 1), определяется выражениями:

$$w_L = 2kU_L l_p; \quad w_p = PU_0, \quad (1)$$

где k – предел текучести материала при чистом сдвиге, $k = \sigma_T / \sqrt{3}$ – для неупрочняющихся материалов, $k = \sigma_B / \sqrt{3}$ – для упрочняющихся в процессе пластического деформирования материалов [1], (σ_T и σ_B – соответственно предел текуче-

сти и прочности материала); l_p – размер поверхности разрушения OA_i в плоскости чертежа, $l_p = \left(h + \sqrt{\frac{2F}{\text{tg}\beta}} \right) \cdot \frac{\sin\beta}{\sin(\beta + \theta_i)}$; h – глубина проплавления; β – угол наклона образующей шва; F – площадь шва; P – погонное предельное усилие; U_L – скорость перемещения материальных частиц при пластическом течении вдоль линий скольжения OA_i , $U_L = U_0/\sin\theta_i$, U_0 – средняя скорость деформирования.

Исходя из баланса мощности внутренних и внешних сил ($w_L = w_p$) получено выражение для оценки несущей способности (средних предельных напряжений σ_{cp}) рассматриваемых сварных соединений:

$$\sigma_{cp} = \frac{B}{P} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_v \psi k_{\eta\beta}, \quad (2)$$

где $\psi = \sqrt{2F}/B$ – относительная площадь наплавленного металла (B – толщина пластины); $k_{\eta\beta}$ – коэффициент, зависящий от геометрических параметров сварных соединений. В общем виде коэффициент может быть представлен в следующем виде:

$$k_{\eta\beta} = \left(\eta + \frac{1}{\sqrt{\text{tg}\beta}} \right) \cdot \frac{\sin\beta}{\sin(\beta + \theta_i) \sin\theta_i}, \quad (3)$$

где $\eta = h/\sqrt{2F}$ – относительная глубина проплавления пластин.

Угол наклона плоскости вязкого разрушения θ_i находим из условия минимума мощностей $\left(\frac{\partial w_L}{\partial \theta_i} = \frac{\partial w_p}{\partial \theta_i} = 0 \right)$. В зависимости от сочетания геометрических параметров тавровых соединений имеют место три диапазона изменения угла θ_i , характеризующихся местоположением точки A_i по отношению к вершине углового шва C (рис. 1).

В первом диапазоне ($\pi/2 \geq \beta \geq \beta_*$, где β_* – граничные значения углов β , определяемые из уравнения $\eta = \text{tg} \frac{\beta_*}{2} \sqrt{\text{tg}\beta_*}$) траектория вязкого разрушения, совпадающая с линией скольжения OA_i , распространяется от вершины непрямого шва стенки тавра O до наклонной поверхности углового шва CD (штриховая линия на рис. 1):

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{2}; \quad k_{\eta\beta}^1 = 2 \text{tg} \frac{\beta}{2} \left(\eta + \frac{1}{\sqrt{\text{tg}\beta}} \right). \quad (4)$$

Во втором диапазоне ($\beta_* \geq \beta \geq \beta_{**} = \arctg \eta^2$) траектория вязкого разрушения распространяется от вершины непрямого шва стенки тавра O до точки перехода углового шва к основному металлу $A_2 \equiv C$ (рис. 1):

$$\theta_2 = \arctg \left(\frac{\sqrt{\text{tg}\beta}}{\eta} \right); \quad k_{\eta\beta}^{(2)} = \frac{\eta^2 + \text{tg}\beta}{\sqrt{\text{tg}\beta}}. \quad (5)$$

В третьем диапазоне ($\beta_{**} \geq \beta \geq 0$) траектория непрямого шва распространяется от вершины непрямого шва стенки тавра O до вертикальной (боковой) ее поверхности (штриховая линия на рис. 1). Угловым швом в этом случае не вступает в пластическую деформацию:

$$\theta_3 = \frac{\pi}{4}; \quad k_{\eta\beta}^{(3)} = 2\eta. \quad (6)$$

Анализ полученных выражений (2)–(6) открывает возможность оптимизировать геометрические параметры угловых швов при конструктивно-технологическом проектировании рассматриваемых сварных соединений. Из условия $\partial \sigma_{cp} / \partial \beta = 0$ были найдены соотношения, позволяющие по известной глубине проплавления h и площади наплавленного металла F (т. е. по известному значению параметра $\eta = h/\sqrt{2F}$) определить оптимальные углы наклона образующей шва $\beta = \beta_{\text{опт}}$, обеспечивающие максимальную способность рассматриваемых сварных соединений:

$$\eta = \frac{1 - 2\cos\beta_{\text{опт}}}{\sqrt{2\sin\beta_{\text{опт}}}}. \quad (7)$$

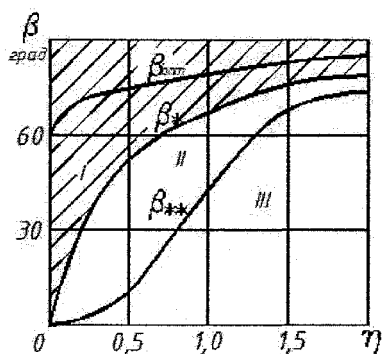


Рис. 2. Зависимость оптимальных значений углов $\beta_{\text{опт}}$ от относительной глубины проплавления η таврового соединения (I, II, III – диапазоны изменения углов β)

Зависимости оптимальных значений углов $\beta_{\text{опт}}$ от относительной глубины проплавления η приведены на рис. 2. Как следует из выражения (7), для тавровых соединений, выполненных ручной дуговой сваркой без проплавления стенки, оптимальное значение угла $\beta_{\text{опт}} = 60^\circ$. С увеличением относительной глубины проплавления η тавровых соединений оптимальные значения углов наклона образующей швов $\beta_{\text{опт}}$ смещаются в область больших величин ($\beta_{\text{опт}} > 60^\circ$). Следует отметить, что оптимальные значения углов $\beta_{\text{опт}}$ находятся в I диапазоне их изменения.

Оценку несущей способности рассматриваемого сварного соединения в условиях квазихрупкого и хрупкого разрушения осуществляли, используя критерий обобщенного нормального разрыва [2], в следующей форме:

$$\sigma_{кр} = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi l/2} \cdot \Phi_k \Phi_\lambda \Phi_{пл} \Phi_\rho}, \quad (8)$$

где K_{Ic} - критическое значение коэффициента интенсивности, при котором произойдет разрушение; Φ_k - поправочная функция, учитывающая конечность геометрических размеров; Φ_λ - поправочная функция, учитывающая совместное действие нормальных и сдвигающих напряжений в окрестности места сопряжения; $\Phi_{пл}$ - поправочная функция, учитывающая образование зон локальной текучести в окрестностях места сопряжения; Φ_ρ - поправочная функция, учитывающая конечность радиуса сопряжения.

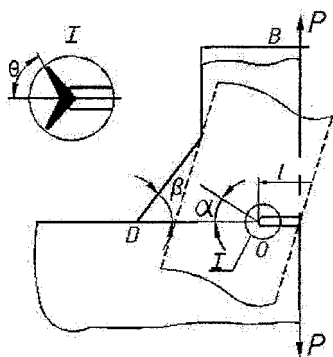


Рис. 3. Расчетная схема таврового соединения с эквивалентной ей пластиной с наклонным трещиноподобным концентратором

Для определения поправочной функции Φ_k рассматриваемое сварное соединение приводили к эквивалентной (с точки зрения идентичности напряженного состояния и характера локального разрушения в окрестности места сопряжения) пластине с наклонным трещиностойким концентратором напряжений. В результате теоретического анализа было получено следующее выражение:

$$\Phi_k = \frac{\sqrt{\sec\left(\frac{\pi l}{2 B \Phi_1}\right)}}{\Phi_1 \Phi_2}, \quad (9)$$

где Φ_1 , Φ_2 - параметрические функции, $\Phi_1 = 1 + 2\psi \sqrt{\text{tg}\beta} \cdot \text{tg}\gamma_*$, $\Phi_2 = \sin^2 \gamma_*$, γ_* - угол наклона трещиноподобного концентратора в эквивалентной пластине (рис. 3).

В условиях нагружения смешанного типа напряженное состояние в окрестности вершины концентратора определяется коэффициентами интенсивности напряжений K_I и K_{II} , отношение которых $\lambda = K_I/K_{II}$ согласно [2] описывается выражением $\lambda = \text{ctg}\gamma_*$.

Согласно работе [3], параметр λ определяет направление страгивания трещины от места сопряжения (угол α_i):

$$\lambda = \left| \frac{\sin \alpha_i}{3 \cos \alpha_i - 1} \right|. \quad (10)$$

Для определения поправочной функции Φ_λ получено следующее выражение:

$$\Phi_\lambda = \frac{\cos(\alpha/2)}{1 + \lambda^2}. \quad (11)$$

Функция $\Phi_{пл}$, учитывающая локальную текучесть в окрестности вершины концентратора, с учетом особенностей, вносимых смешанным типом нагружения равна:

$$\Phi_{пл} = \frac{\sqrt{3,41\lambda^2 + 2,06}}{\Phi_\lambda}. \quad (12)$$

Для реальных геометрических параметров тавровых соединений ($\beta = 30 \dots 70^\circ$, $\eta = 0 \dots 1,2$) значение λ находится в пределах $0 \dots 0,2$, следовательно, поправочная функция Φ_λ практически равна единице ($\Phi_\lambda = 1,0 \dots 1,015$), а поправочная функция $\Phi_{пл} = 1,4$.

Дефекты типа непровара в тавровых соединениях имеют больший радиус в вершине, чем усталостная трещина. Оценивать несущую способность таких соединений следует с учетом радиуса в вершине непровара. Локальные разрушения соединения согласно [3] происходят при условии достижения коэффициентом интенсивности напряжений значения $K_{Ic(\rho)} = K_{Ic} \sqrt{\rho_0/\rho}$, где $K_{Ic(\rho)}$ - критический коэффициент интенсивности напряжений с учетом радиуса концентратора ρ , ρ_0 - эффективное значение радиуса концентратора.

Значение ρ_0 может быть приближенно определено по механическим свойствам материала [4]:

$$\rho_0 = \frac{0,08}{2\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_T} \right). \quad (13)$$

Поправочная функция Φ_ρ имеет вид:

$$\Phi_\rho = \sqrt{\rho_0/\rho}.$$

Используя приведенные соотношения для оценки поправочных функций Φ_k , Φ_λ , $\Phi_{пл}$, Φ_ρ , можно определить несущую способность сварных соединений с угловыми швами в условиях хрупкого (квазихрупкого) разрушения по известным конструктивно-геометрическим параметрам β , η , ψ и ρ тавровых сварных соединений.

Расчет предельного состояния при квазихрупком разрушении сварных тавровых соединений с неполным проплавлением можно провести, используя комбинированный критерий, предложенный Е.М. Морозовым для соединений с предусмотренными трещиноподобными несплошностями [5, 6].

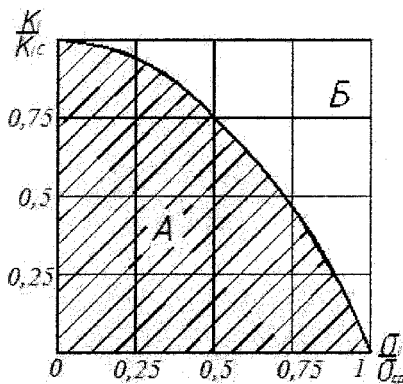


Рис. 4. Диаграмма предельного состояния таврового сварного соединения

Для сварных тавровых соединений, склонных разрушаться как вязко, так и хрупко, оценка предельного сопротивления разрушению может быть получена по зависимости

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{\text{ср}}}\right)^2 + \left(\frac{K_I}{K_{Ic}}\right)^2 = 1, \quad (15)$$

где σ – напряжение, приложенное к сварному соединению при вязком разрушении, $\sigma_{\text{ср}}$ – прочность сварного соединения при вязком разрушении, K_I – коэффициент интенсивности напряжений, $K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi l} \cdot \varphi_k \varphi_\lambda \varphi_{\text{пл}} \varphi_p$, K_{Ic} – критический коэффициент интенсивности напряжений, при котором реализуется хрупкое разрушение $K_{Ic} = \sigma_{\text{кр}} \sqrt{\pi l} \cdot \varphi_k \varphi_\lambda \varphi_{\text{пл}} \varphi_p$.

На рис. 4 приведена диаграмма предельного состояния при квазихрупком разрушении таврового сварного соединения согласно формуле (15). В области А расположено безопасное сочетание нагрузок для данного сварного соединения, в области Б произойдет квазихрупкое разрушение.

Предложенная методика расчета оценки прочности тавровых сварных соединений с непроваром в корне шва позволяет осуществить выбор оптимальных геометрических параметров сварных швов (угол наклона катета шва, глубина проплавления и т. д.) таким образом, чтобы с учетом действующих нагрузок по комбинированному критерию данное соединение не попало в область квазихрупких разрушений.

Литература

1. Шахматов, М.В. Прочность механики неоднородных сварных соединений / М.В. Шахматов, Д.М. Шахматов. — Челябинск: ЦПС «Сварка и контроль», 2009. — 225 с.
2. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. — М.: Наука, 1974. — 640 с.
3. Броек, Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. — М.: Высш. шк., 1980. — 368 с.
4. Серенсен, СВ. Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению / СВ. Серенсен. — М.: Атомиздат, 1975. — 192 с.
5. Партон, В.З. Механика упругопластического разрушения / В.З. Партон, Е.М. Морозов. — М.: Наука, 1985. — 504 с.
6. Морозов, Е.М. Расчет на прочность при наличии трещин / Е.М. Морозов. — Киев: Наук, думка, 1975. — 107 с.

Поступила в редакцию 13 сентября 2010 г.