

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НАХЛЕСТОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ВЯЗКОГО И КВАЗИХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЙ

М.В. Шахматов, Е.А. Усманова

THE COMPLEX ESTIMATION OF DURABILITY OF WELDED LAP CONNECTIONS IN THE CONDITIONS OF VISCOUS AND QUASIFRAGILE DESTRUCTIONS

M.V. Shakhmatov, E.A. Usmanova

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.

Settlement techniques of an estimation of bearing ability welded connections with corner seams in the conditions of viscous and quasifragile destructions are considered.

Keywords: corner seams, welded connections, viscous destruction, quasifragile and fragile destruction.

При изготовлении сварных конструкций для автомобилей особо большой грузоподъемности, горно-шахтного оборудования, строительно-дорожных машин и механизмов около 70 % всех сварных швов составляют угловые швы [1]. Оптимизация геометрических параметров сварных соединений с угловыми швами, ведущая к снижению объема наплавленного металла, возможна только на основе расчетной оценки несущей способности указанных соединений.

В данной работе рассматривается расчетная оценка несущей способности сварных нахлесточных соединений с лобовыми швами в условиях вязкого разрушения и их сопротивляемость квазихрупким и хрупким разрушениям с учетом локальных пластических деформаций в окрестности места сопряжения и величины радиуса последнего.

Теоретический анализ вязкой прочности нахлесточных соединений был выполнен с использованием полос скольжения по алгоритму кинематической теоремы предельного равновесия [2]. Согласно принятым расчетным схемам (рис. 1), линии скольжения OA_i делят нахлесточные соединения с лобовыми швами на жесткие недеформируемые блоки.

Мощность внутренних w_L и внешних w_p сил на единицу длины соединения в плоскости, перпендикулярной чертежу (рис. 1), определяется выражениями [2]:

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

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 [2], (σ_T и σ_B – соответственно предел текучести и прочности материала); l_p – размер поверхности разрушения OA_i в плоскости чертежа, для нахлесточных соединений: $l_p = \left(h + \sqrt{2F \operatorname{tg} \beta} \right) \frac{\cos \beta}{\sin(\beta + \theta_i)}$;

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 $\sigma_{ср}$) для нахлесточных сварных соединений:

Расчет и конструирование

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

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 этот коэффициент может быть представлен в следующем виде:

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

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

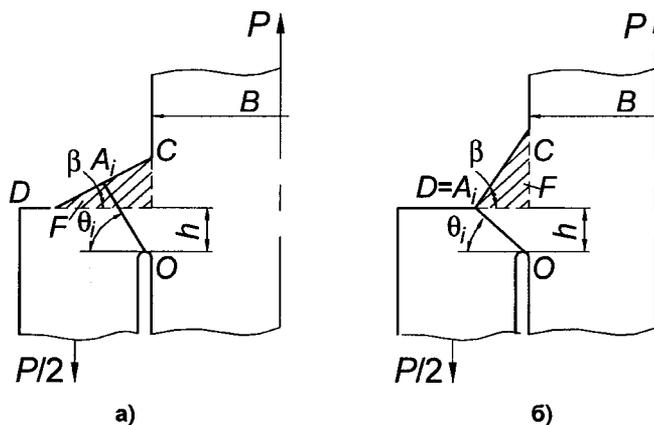


Рис. 1. Наклесточные соединения с диапазоном изменения угла θ_i

Угол наклона плоскости вязкого разрушения θ_i находим из условия минимума мощностей $\frac{\partial w_L}{\partial \theta_i} = \frac{\partial w_P}{\partial \theta_i} = 0$.

В зависимости от сочетания геометрических параметров наклесточные соединения имеют два диапазона изменения угла θ_i , характеризующихся местоположением точки A_i по отношению к вершине углового шва C (рис. 1, а, б).

В первом диапазоне ($0 \leq \beta \leq \beta_*$), где β_* – граничные значения углов β , определяемые из уравнения $\frac{1}{\eta} = \text{tg} \frac{\beta_*}{2} \sqrt{\text{tg}\beta_*}$, траектория вязкого разрушения, совпадающая с линией скольжения OA_1 , распространяется от вершины непровара стенки (точки O) до наклонной поверхности углового шва CD (см. рис.1, а).

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

Во втором диапазоне ($\beta_* \leq \beta \leq \pi/2$) траектория вязкого разрушения распространяется от вершины непровара стенки (точки O) до точки перехода от шва к основному металлу присоединяемой пластины (наклестки) $A_i \equiv D$ (рис. 1, б):

$$\theta_2 = \arctg(\eta \sqrt{\text{tg}\beta}), \quad k_{\eta\beta}^{(2)} = \eta + 1/\eta \text{tg}\beta. \quad (5)$$

Анализ полученных выражений (2)–(5) открывает возможность оптимизировать геометрические параметры угловых швов при конструктивно технологическом проектировании рассматриваемого сварного соединения. 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 несущую способность рассматриваемых сварных соединений:

$$\eta = \frac{1 - 2 \cos \beta_{\text{опт}}}{\sqrt{2 \sin 2\beta_{\text{опт}}}} \left(-\text{ctg} \frac{\beta_{\text{опт}}}{2} \right). \quad (6)$$

Зависимости оптимальных значений углов $\beta_{\text{опт}}$ от относительной глубины проплавления η для нахлесточных соединений приведены на рис. 2. Как следует из выражения (6), для нахлесточных соединений, выполненных ручной дуговой сваркой без проплавления стенки, оптимальное значение угла $\beta_{\text{опт}} = 60^\circ$. С увеличением относительной глубины проплавления η нахлесточных соединений наблюдается уменьшение оптимальных значений $\beta_{\text{опт}}$ ($\beta_{\text{опт}} < 60^\circ$). Следует отметить, что оптимальные значения углов $\beta_{\text{опт}}$ находятся в I диапазоне их изменения.

Оценку несущей способности нахлесточных сварных соединений в условиях квазихрупкого и хрупкого разрушения осуществляли, используя критерий обобщенного нормального разрыва [3], в следующей форме:

$$\sigma_{\text{кр}} = \frac{K_{\text{Ic}}}{\sqrt{\pi l/2} \varphi_{\text{к}} \varphi_{\lambda} \varphi_{\text{пл}} \varphi_{\text{р}}}, \quad (7)$$

где K_{Ic} – критическое значение коэффициента интенсивности, при котором произойдет разрушение; $\varphi_{\text{к}}$ – поправочная функция; учитывающая конечность геометрических размеров; φ_{λ} – поправочная функция; учитывающая совместное действие нормальных и сдвигающих напряжений в окрестности места сопряжения; $\varphi_{\text{пл}}$ – поправочная функция, учитывающая образование зон локальной текучести в окрестностях места сопряжения; $\varphi_{\text{р}}$ – поправочная функция, учитывающая конечность радиуса сопряжения.

Для определения поправочной функции $\varphi_{\text{к}}$, согласно работам [3, 4], рассматриваемые сварные соединения 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:

$$\varphi_{\text{к}} = \frac{\sqrt{\sec \left(\frac{\pi l}{2 B \Phi_1} \right)}}{\Phi_1 \Phi_2}, \quad (8)$$

где Φ_1 , Φ_2 – параметрические функции; $\Phi_1 = 1 + 2\psi \sqrt{\text{tg} \beta} \text{tg} \gamma_*$, $\Phi_2 = \sin^2 \gamma_*$, 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 [3], описывается выражением: $\lambda = \text{ctg} \gamma_*$.

Согласно работе [4], параметр λ определяет направление страгивания трещины от места сопряжения (угол α_i):

$$\lambda = \left| \frac{\sin \alpha_i}{3 \cos \alpha_i - 1} \right|. \quad (9)$$

Для определения поправочной функции φ_{λ} получено следующее выражение:

$$\varphi_{\lambda} = \frac{\cos \alpha/2}{1 + \lambda^2}. \quad (10)$$

Функция $\varphi_{\text{пл}}$, учитывающая локальную текучесть в окрестности вершины концентратора, с учетом особенностей, вносимых смешанным типом нагружения, равна [4]:

$$\varphi_{\text{пл}} = \frac{\sqrt{3,41\lambda^2 + 2,06}}{\cos \alpha/2 (\cos^2(\alpha/2) - 1,5\lambda \sin \alpha)}. \quad (11)$$

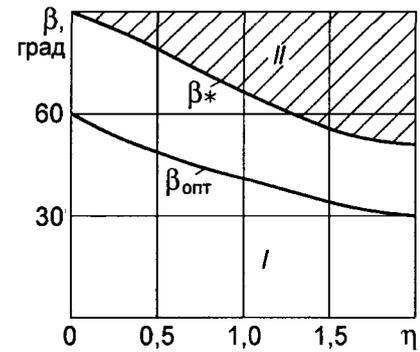


Рис. 2. Зависимость оптимальных значений углов $\beta_{\text{опт}}$ от относительной глубины проплавления η нахлесточного соединения. I, II – диапазоны изменения углов β

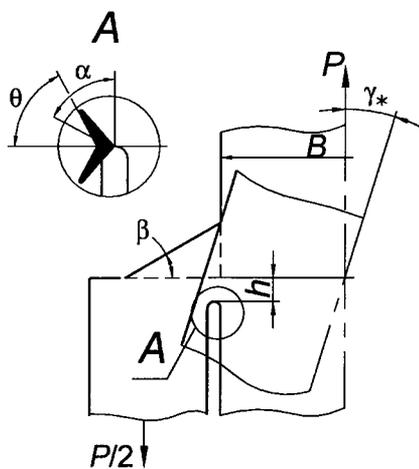


Рис. 3. Расчетная схема нахлесточного соединения с эквивалентной ей пластиной с наклонным трещиноподобным концентратором

Из сопоставления выражений (9) и (11) для нахлесточных соединений при практических инженерных расчетах удобнее пользоваться произведением поправочных функций Φ_λ и $\Phi_{пл}$:

$$\Phi_{пл}\Phi_\lambda = \frac{\sqrt{3,41\lambda^2 + 2,06}}{1 + \lambda^2} \quad (12)$$

Дефекты типа непровара в нахлесточных 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 [4], 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 [5]:

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

Поправочная функция Φ_ρ имеет вид [2]:

$$\Phi_\rho = \sqrt{\rho_0/\rho} \quad (14)$$

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 нахлесточных сварных соединений.

Расчет предельного состояния при квазихрупком разрушении сварных нахлесточных и тавровых [6] соединений с неполным проплавлением можно провести на основании комбинированного критерия, предложенного Е.М. Морозовым [7, 8] для соединений с предусмотренными трещиноподобными несплошностями, основанного на анализе энергетического состояния элемента с трещиной и полученного с использованием вариационного принципа:

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_B} \right)^{q+1} + \left(\frac{K_I}{K_{Ic}} \right)^2 = 1, \quad (15)$$

где K_{Ic} – предел трещиностойкости материала, σ_1 – максимальное главное напряжение на линии трещины, q – показатель степени в выражении $u_* = a\sigma_1^q$, устанавливающим связь между перемещениями u_* берегов трещины под действием σ_1 за счет появления пластических зон в ее вершинах, a – коэффициент пропорциональности. Согласно экспериментальным данным работы [8] наиболее консервативное предельное соотношение между σ и K_I при коэффициенте $q = 1$, то есть при линейной связи между пластическим перемещением u_* и напряжением σ_1 .

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

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{ср}} \right)^2 + \left(\frac{K_I}{K_{Ic}} \right)^2 = 1, \quad (16)$$

где σ – напряжение, приложенное к сварному соединению при вязком разрушении, прочность сварного соединения при вязком разрушении, K_I – коэффициент интенсивности напряжений, K_{Ic} –

критический коэффициент интенсивности напряжений, при котором реализуется хрупкое разрушение.

На рис. 4 приведена диаграмма предельного состояния при квазихрупком разрушении рассматриваемых нахлесточных сварных соединений, согласно формуле (16).

Выражение (16) устанавливает предельное соотношение между номинальными и локальными напряжениями при квазихрупком разрушении. Из анализа (16) и рис. 4 можно видеть, что использование комбинированного критерия для сварных соединений с предусмотренными трещинообразными несплошностями дает возможность расчетным путем определять по конструктивно-геометрическим параметрам соединений величину коэффициента интенсивности напряжений, при котором данное соединение при нагружении будет работать в области безопасного сочетания нагрузок и квазихрупкое разрушение не произойдет.

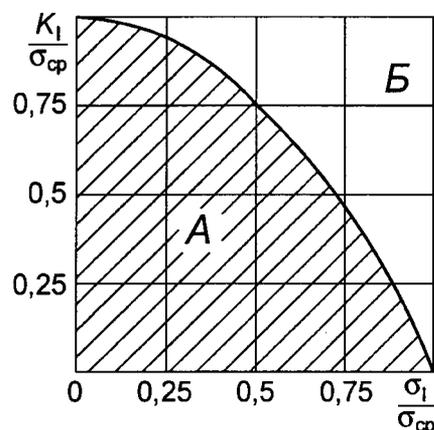


Рис. 4. Диаграмма предельного состояния нахлесточного сварного соединения. В области А расположено безопасное сочетание нагрузок для данного сварного соединения, в области Б произойдет квазихрупкое разрушение

Литература

1. Березовский, Б.М. Математические модели дуговой сварки. В 3 т. Т. 2: Математическое моделирование и оптимизация формирования различных типов сварных швов / Б.М. Березовский. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – 601 с.
2. Шахматов, М.В. Прочность механики неоднородных сварных соединений / М.В. Шахматов, Д.М. Шахматов. – Челябинск: «ЦПС сварка и контроль», 2009. – 225 с.
3. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
4. Броек, Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. – М.: Высш. школа, 1980. – 368 с.
5. Серенсен, С.В. Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению / С.В. Серенсен. – М.: Атомиздат, 1975. – 192 с.
6. Усманова, Е.А. Комплексный подход к оценке прочности сварных тавровых соединений / Е.А. Усманова, М.В. Шахматов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2010. – Вып. 15. – № 34 (210). – С. 54–58.
7. Партон, В.З. Механика упруго-пластического разрушения / В.З. Партон, Е.М. Морозов. – М.: Наука, 1985. – 504 с.
8. Морозов, Е.М. Расчет на прочность при наличии трещин / Е.М. Морозов. – Киев: Наук. думка, 1975. – 107 с.

Поступила в редакцию 26 января 2011 г.

Шахматов Михаил Васильевич. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и оборудование сварочного производства», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск). Область научных интересов: основное направление работы связано с проблемами прочности, разрушения, ресурса и безопасности сварных конструкций. Тел.: 267-92-98.

Michael V. Shakhmatov. Doctor of Engineering Science, professor, Head of the Welding Technology the Equipment department, South Urals State University (c. Chelyabinsk). Scientific interests: The basic direction of work is connected with problems of durability, destruction, a resource and safety of welded designs. Tel.: 267-92-98.

Усманова Екатерина Александровна. Преподаватель, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск). Область научных интересов: изучение работоспособности сварных строительных конструкций. Тел.: 267-97-41.

Ekaterina A. Usmanova. Teacher, South Urals State University (c. Chelyabinsk). Scientific interests: studying of working capacity welded building designs. Tel.: 267-97-41.