



СТАТИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С X-ОБРАЗНОЙ РАЗДЕЛКОЙ КРОМОК

А. А. ОСТСЕМИН, д-р техн. наук, В. Л. ДИЛЬМАН, канд. физ.-мат. наук (Южно-Уральский гос. ун-т, г. Челябинск, РФ)

На основе метода решения плоской задачи теории пластичности выполнена расчетная оценка статической прочности соединений из пластин с X-образной разделкой и менее прочным швом по сравнению с основным металлом. Исследовано напряженное состояние механически неоднородных стыковых соединений. Показана возможность определения оптимальных геометрических размеров металла шва.

Ключевые слова: стыковые соединения, относительная толщина, мягкая прослойка, зазор, корень шва, угол скоса, свариваемые кромки, предельное растягивающее усилие, контактное упрочнение, механическая неоднородность, коэффициент неоднородности

Прочность и напряженное состояние механически неоднородных сварных соединений определяются геометрической формой и размерами мягких прослоек, которыми могут быть сварной шов, зона термического влияния и обезуглероживенная зона, расположенная вблизи границы сплавления [1] в нефтегазовом и химическом оборудовании (сосудах давления, трубах, трубопроводной арматуре, криогенной технике). Наличие в сварном соединении мягких прослоек, металл которых имеет более низкий по сравнению с основным металлом предел текучести (мягкие швы), приводит к локализации в них пластических деформаций. В мягких швах, как и в плоских мягких прослойках, в результате сдвигания по контактными поверхностям (границам сплавления) пластических деформаций

более прочным металлом возникает объемное напряженное состояние и проявляется эффект контактного упрочнения.

В настоящее время детально изучена работоспособность сварного соединения с плоской мягкой прослойкой [2, 3]. Однако геометрическая форма последней бывает самой разнообразной, что нередко обусловлено способом подготовки свариваемых кромок, например, при сварке пластин, труб большого диаметра и значительной толщины с X-образной симметричной разделкой кромок [1].

В работе [1] показано, что напряженное состояние X-образных мягких швов можно представить с помощью сетки линий скольжения. Все X-образные симметричные швы условно можно разделить на три группы, для каждой из которых свойственны определенные интервалы изменения геометрических параметров. Однако отсутствие математического описания зависимости статической прочности от геометрических параметров и степени механической неоднородности сварных соединений с X-образным мягким швом значительно ограничивает возможность использования теории контактного упрочнения.

В работе [4] на основании метода линий скольжения предложен приближенный способ оценки прочности сварных соединений с X-образными мягкими швами. Распределение напряжений в рассматриваемой прослойке приводится согласно решению Л. Прандтля.

Однако влияние формы и размеров мягких швов на их прочность и напряженное состояние с позиций теории пластичности изучено недостаточно.

В настоящей работе на основе решения плоской задачи теории пластичности [5] дана расчетная оценка статической прочности соединений из пластин с X-образной разделкой (мягким швом), с помощью которой можно определить оптимальные зазоры h_0 в корне шва и углы φ скоса свариваемых кромок (рис. 1).

Теоретический анализ сварных соединений из пластин проводили с учетом условий и допущений, представленных в работах [3, 5]. Рассматривали статическое растяжение (сжатие) соединений с мягким швом без усиления в предельной стадии пластического деформирования (вязкое разрушение). Материалы,

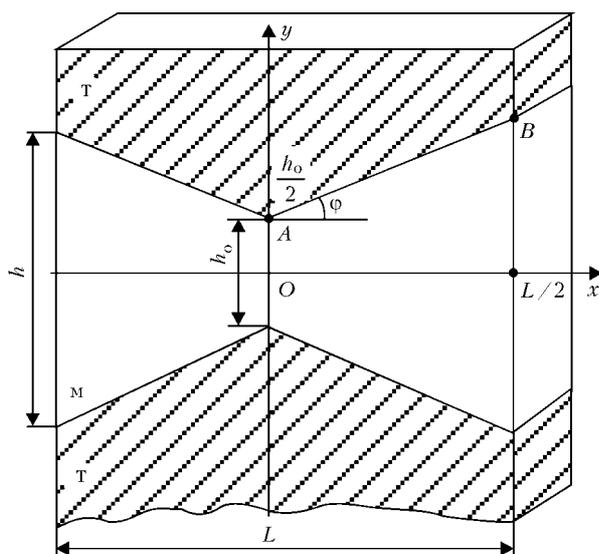


Рис. 1. Параметры мягкой прослойки стыковых сварных соединений с X-образной разделкой кромок ($v = h_0/h$; $\chi_0 = h_0/L$; $\chi = h/L$; $y = f(x)$; $0 \leq \chi \leq L/2$)



входящие в соединение, принимали однородными, изотропными и идеально жесткопластичными. Считали, что при наличии значительных пластических деформаций остаточные напряжения отсутствуют. В настоящей работе наряду с обычными предположениями и упрощающими условиями, которые принимаются при теоретическом изучении механически неоднородных соединений, используется также предположение [3], которое согласуется с теорией пластического слоя [5] и обобщает известное допущение Л. Прандтля: касательные напряжения τ_{xy} в мягкой прослойке линейно зависят от расстояния от плоскости, на которой $\tau_{xy}(x, y) = 0$ (см. ось Ox на рис. 1).

Цель работы – определение прочности и напряженного состояния в механически неоднородных стыковых соединениях с X-образной симметричной разделкой кромок.

Касательные напряжения в мягкой прослойке стабилизируются вблизи свободных поверхностей. На контактных поверхностях получим

$$\tau_{xy}^{\text{кон}} = \alpha k_m \quad (0 < \alpha < 1), \quad (1)$$

где α – параметр, характеризующий вовлечение основного металла в пластическую деформацию и зависящий от механической неоднородности сварного соединения: $\alpha = K_B - 1$; $K_B = \sigma_B^T / \sigma_B^M$; σ_B^T, σ_B^M – соответственно временное сопротивление более прочного твердого (т) основного металла и менее прочного мягкого (м) металла прослойки; k_m – предел текучести на сдвиг металла шва. Предполагаем, что функция τ_{xy} в мягкой прослойке линейно зависит от y , что позволяет воспользоваться вместе с условием (1) формулой для вычисления нормальных напряжений σ_y [5]:

$$\sigma_y = k_m \times \left(2 + \frac{1}{2} \ln \operatorname{ch} \frac{4\alpha x}{h} + \frac{4\alpha^2}{h^2} \frac{y^2}{\operatorname{ch}^2 \frac{2\alpha x}{h}} + \frac{1}{2} \ln \operatorname{ch} \frac{4\alpha x}{h} + \frac{\alpha^2}{3} \right) \quad (2)$$

Пусть $y = f(x)$ – функция, описывающая линию контактной поверхности (кривая AB на рис. 1). Предполагаем, что линейная функция $f(x)$ монотонна на $[0; L/2]$ и не имеет точек перегиба (здесь L – толщина образца).

Предельное растягивающее усилие можно записать в виде $P = P_0 + P_1$, где

$$P_0 = 2 \int_0^{L/2} \sigma_y \left(x, \frac{h}{2} \right) dx;$$

$$P_1 = 2 \int_0^{L/2} \left[\sigma_y(x, f(x)) - \sigma_y \left(x, \frac{h}{2} \right) \right] dx.$$

Поскольку $f(x)$ определяет контактную поверхность, то

$$P = 2 \int_0^{L/2} [\sigma_y(x, f(x))] dx.$$

Интеграл P_0 вычисляется по линии $y = h/2$, как и в случае прямоугольной прослойки. Поэтому можно воспользоваться результатом работы [5]:

$$P_0 = k_m L \left(-\frac{\alpha^2 + 0,2}{2\alpha} \chi + \frac{\alpha}{2\chi} + 2 + \frac{\alpha^2}{3} \right) \quad (3)$$

Используя (2), вычислим усилие P_1 . При $f(x) = \frac{h_0}{2} + \frac{h - h_0}{L} x$ получим следующее выражение (подробности вычисления не приводим):

$$P_1 = \frac{k_m \alpha}{16} (1 - \nu) L \chi \left[4(1 + \nu) \operatorname{th} \frac{\alpha}{\chi} + (3 + \nu) \operatorname{th} \frac{2\alpha}{\chi} \right], \quad (4)$$

где $\nu = \frac{h_0}{h} = \frac{\chi_0}{\operatorname{tg} \varphi + \chi_0}$; χ_0, χ – соответственно минимальная и максимальная относительная толщина мягкой прослойки; $\operatorname{tg} \varphi = (h - h_0)/L$.

Из выражений (3) и (4) получаем, что предельное растягивающее усилие равно

$$P = k_m L \left[\left(-\frac{\alpha^2 + 0,2}{2\alpha} \chi + \frac{\alpha}{2\chi} + 2 + \frac{\alpha^2}{3} \right) + \frac{\alpha(1 - \nu)\chi}{16} \left(4(1 + \nu) \operatorname{th} \frac{\alpha}{\chi} + (3 + \nu) \operatorname{th} \frac{2\alpha}{\chi} \right) \right]. \quad (5)$$

Для среднего предельного напряжения из формулы (5) находим

$$\sigma_y^{\text{cp}} = 2k_m \left[\left(1 + \frac{\alpha}{4\chi} - \frac{\alpha^2 + 0,2}{4\alpha} \chi + \frac{\alpha^2}{6} \right) + \frac{\alpha(1 - \nu)\chi}{32} \left(4(1 + \nu) \operatorname{th} \frac{\alpha}{\chi} + (3 + \nu) \operatorname{th} \frac{2\alpha}{\chi} \right) \right]. \quad (6)$$

В случае приближения к наиболее узкой части X-образной прослойки уровень нормальных напряжений σ_y значительно повышается. При $\varphi = 0$ и $\nu = 1$ выражение (6) преобразуется в формулу для прямоугольной прослойки [3] (при $\alpha_1 = \alpha_2$):

$$\sigma_y^{\text{cp}} = 2k_m \left(1 + \frac{\alpha}{2\chi} - \frac{\alpha^2 + 0,2}{4\alpha} \chi + \frac{\alpha^2}{6} \right) \quad (7)$$

Для того чтобы использовать выражение (7) для сварных соединений, металл шва которых упрочняется в процессе пластического деформирования, в зависимостях (3)–(6) $k_m = \sigma_T / \sqrt{3}$ (σ_T^M – предел текучести металла шва) необходимо заменить на $\sigma_B^M / \sqrt{3}$ (σ_B^M – временное сопротивление мягкого шва) [2]. С уменьшением зазора h_0 в корне шва уменьшается и ν , а следовательно, среднее предельное напряжение σ_y^{cp} увеличивается согласно (6). Зависимость величины $\Delta\sigma_y^{\text{cp}}$, на которую среднее предельное напряжение X-образной прослойки, вычисляемое по (6), превышает аналогичную величину обычной плоскопараллельной мягкой прослойки шириной h , от относительной глубины X-образной прослойки (рис. 2) имеет вид

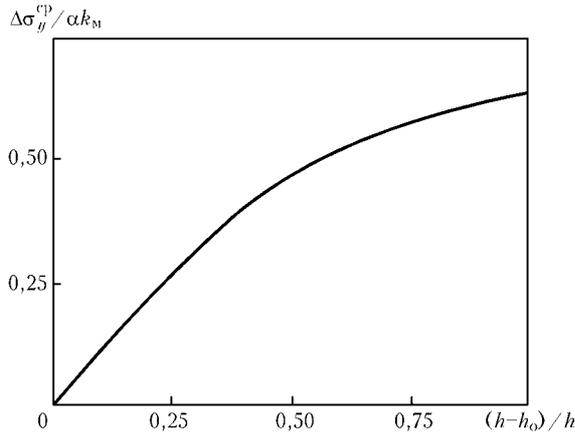


Рис. 2. Зависимость поправки $\Delta\sigma_y^{cp}$ среднего предельного напряжения от относительной глубины X-образной разделки кромок $1 - \nu = h - h_0/h$

$$\Delta\sigma_y^{cp} = \frac{\sigma_B^M}{16\sqrt{3}} \alpha (1 - \nu) \chi \left[4(1 + \nu) \operatorname{th} \frac{\alpha}{\chi} + (3 + \nu) \operatorname{th} \frac{2\alpha}{\chi} \right]. \quad (8)$$

Увеличение среднего предельного напряжения $\Delta\sigma_y^{cp}$ при уменьшении зазора в корне шва h_0 при постоянной толщине мягкой прослойки h согласуется с полученными экспериментальными [6] и теоретическими [7] результатами. Корень X-образных мягких симметричных швов является местом концентрации напряжений, а следовательно, может стать очагом хрупкого разрушения.

Опыт строительства трубопроводов показал, что наиболее характерным видом разрыва сварных швов газопроводов является сквозная трещина, проходящая на определенную длину по оси кольцевого сварного шва. Она начинается от первичных дефектов (подреза, непровара, скопления пор и шлаковых включений), располагающихся преиму-

щественно в корневом слое или по границам сплавления. Стык может разрушаться по всему периметру или по свищу в зависимости от уровня действующих напряжений и механических свойств металла шва [8].

Опасность хрупкого разрушения возрастает с уменьшением зазора h_0 в корне шва из-за резкого увеличения максимальных напряжений σ_y^{\max} . Исходя из значения сопротивления R_y^M отрывы материала шва можно выполнить оценку возможности хрупкого разрушения сварного соединения. Зависимость коэффициента контактного упрочнения $K_\chi = \sigma_{cp}/2k_M$ от относительной толщины прослойки χ при различных углах скоса кромок ϕ для сварных соединений приведена на рис. 3. Значения K_χ уменьшаются с увеличением угла ϕ скоса кромок и относительной толщины χ мягкой прослойки. При $\phi = 35^\circ$ и $\chi_0 = 0$ (зазор в корне шва отсутствует) $K_\chi = 1$, что означает отсутствие контактного упрочнения в сварном соединении. Расчетные значения K_χ для пластин удовлетворительно соответствуют полученным по номограммам, приведенным в работе [1], и экспериментальным данным [6].

В работе [4] изложены результаты экспериментальных исследований. Сварные образцы были изготовлены из листов высокопрочной стали толщиной 16...20 мм. Пластины сваривали проволокой Св-10ГСМТ диаметром 1,6 мм в углекислом газе. Временное сопротивление металла шва составляло $\sigma_B^M = 600...700$ МПа. Ширина образцов равна 100 мм, что обеспечивало реализацию плоской деформации в мягких X-образных швах. Коэффициент механической неоднородности этих соединений, равный 2,2...2,4, достаточно велик, в связи с этим при вычислении расчетных значений K_χ^p вовлечение основного металла в пластическую деформацию не учитывали — $\alpha \approx 1$. Расчетные

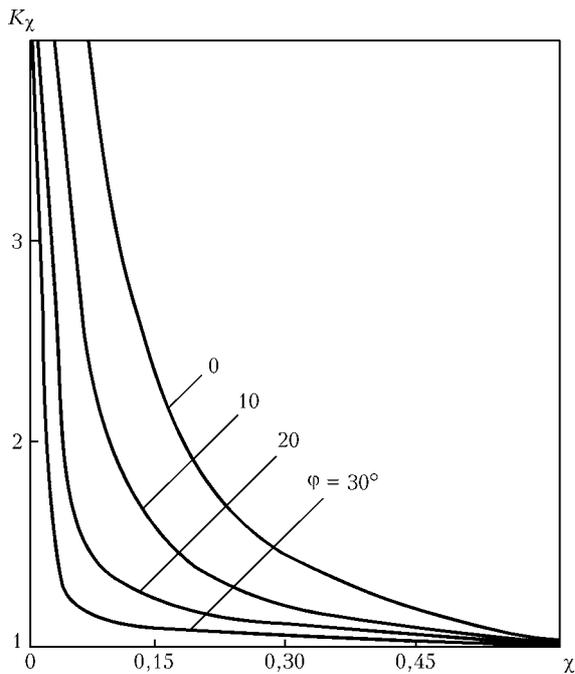


Рис. 3. Зависимость коэффициента контактного упрочнения K_χ от относительной толщины мягкой прослойки χ при различных углах ϕ наклона X-образной мягкой прослойки

χ	ϕ , град	$\frac{2}{\sqrt{3}} K_\chi^a$	$\frac{2}{\sqrt{3}} K_\chi^p$	$\frac{K_\chi^a - K_\chi^p}{K^a} \cdot 100\%$
0,15	26,0	1,30	1,282	1,4
0,45	12,4	1,29	1,156	10,3
0,10	28,0	1,29	1,298	0,6
0,25	21,0	1,29	1,253	2,8
0,17	22,3	1,32	1,310	0,7
0,25	19,3	1,25	1,268	1,4
0,22	20,8	1,25	1,270	1,6
0,11	27,5	1,25	1,290	3,2
0,09	34,6	1,20	1,256	3,3
0,34	21,0	1,20	1,193	0,6
0,17	30,0	1,20	1,200	0
0,22	25,6	1,22	1,240	1,6
0,25	30,5	1,19	1,200	0,8
0,10	35,7	1,13	1,230	8,8
0,06	36,8	1,11	1,240	11,7
0,54	27,0	1,08	1,060	1,8
0,15	41,3	1,10	1,190	8,4



по (6) и экспериментальные значения параметров [4, 6], полученные канд. техн. наук В. П. Ерофеевым, приведены в таблице. Сравнение этих данных по несущей способности сварных соединений при изменении χ в диапазоне 0,10...0,54 и угле скоса кромок $\phi = 12...41^\circ$ показало их хорошее соответствие. Средняя погрешность составляет 3,5 %. Здесь $K_\chi^3 = \sigma_B^3 / \sigma_B^M$ и $K_\chi^p = \sigma_y^{cp} / \sigma_B^M$ — соответственно экспериментальные и расчетные значения коэффициентов контактного упрочнения, где σ_B^3 — экспериментальные значения временного сопротивления сварных образцов; σ_y^{cp} — расчетные средние предельные напряжения.

Предложенные соотношения для статической прочности механически неоднородных стыковых сварных симметричных соединений с X-образной разделкой кромок могут быть использованы на стадии конструктивно-технологического проектирования сварных конструкций.

Выводы

1. Разработанный на основе принадлежащего авторам метода решения плоской задачи (из теории пластичности) способ оценки прочности сварных соединений с X-образными симметричными мягкими швами дает возможность определять значения предельных напряжений в сварных соединениях из пластин в зависимости от зазора в корне шва и углов скоса свариваемых кромок.

2. Экспериментальные значения коэффициента контактного упрочнения хорошо сочетаются с расчетными (погрешность около 3,5 %).

3. Данные о влиянии зазора в корне шва, угла скоса кромок и степени механической неоднородности позволяют выбрать оптимальные геометрические размеры менее прочных швов, что обеспечивает прочностные характеристики металла сварных соединений на уровне основного металла.

1. Бакиш О. А., Ерофеев В. П. Напряженное состояние и прочность стыкового шва с X-образной разделкой // Свароч. пр-во. — 1971. — № 1. — С. 4–7.
2. Бакиш О. А. О напряженном состоянии мягких прослоек в сварных соединениях при растяжении (сжатии) // Вопросы сварочного производства. Тр. Челябин. политехн. ин-та. — 1965. — № 33. — С. 5–26.
3. Дильман В. Л., Остсемин А. А. Напряженное состояние и прочность сварных соединений с механической неоднородностью // Свароч. пр-во. — 1998. — № 5. — С. 15–17.
4. Шахматов М. В., Хмарова Л. И., Тюпышев Ю. А. Расчетная оценка статической прочности механически неоднородных сварных соединений с X-образной разделкой свариваемых кромок // Там же. — 1985. — № 9. — С. 33–35.
5. Остсемин А. А., Дильман В. Л. О сжатии пластического слоя двумя шероховатыми плитами // Пробл. прочност. — 1990. — № 7. — С. 107–112.
6. Ерофеев В. П. Исследования влияния геометрии мягких прослоек сварных соединений на их напряженно-деформированное состояние и прочность: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Челябинск, 1973. — 20 с.
7. Дильман В. Л., Остсемин А. А. О напряженно-деформированном состоянии при растяжении пластического слоя с двумя осями симметрии // Механика твердого тела. — 2001. — № 6. — С. 115–124.
8. Рахманов А. С., Тарлинский В. Д., Чабуркин В. Ф. Причины и механизм разрушения кольцевых сварных стыков // Стр-во трубопроводов. — 1971. — № 4. — С. 17.

Static strength of welded joints comprising a less strong weld on plates with the X-groove, compared with base metal, has been estimated by the method of solving the plane problem of the plasticity theory. The stressed state of mechanically inhomogeneous butt welded joints has been studied.

Поступила в редакцию 13.05.2005

ПОЛУАВТОМАТ М30 ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ МЕТОДОМ TIG



Полуавтомат состоит из подающего механизма, шланга с мундштуком и источника питания электромагнита. Подающий механизм обеспечивает подачу в зону сварки присадочной проволоки диаметром 1,0–1,5 мм с заданной скоростью. Электромагнит управляет пространственным положением сварочной дуги, перемещая ее относительно оси шва. Амплитуду перемещения дуги можно изменять в реальном масштабе времени в зависимости от величины зазора в стыке. Полуавтомат может использоваться с любым стандартным источником питания постоянного тока.

Назначение. Предназначен для механизированной сварки вольфрамовым электродом в аргоне в различных пространственных положениях, особенно в монтажных условиях, титана и сплавов на α основе, а также других немагнитных материалов.

Механизированная сварка с применением полуавтомата улучшает формирование швов при некачественной сборке деталей, сокращает потери присадочной проволоки, снижает требования к квалификации сварщиков.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Тел./факс: (38044) 287 13 66
E-mail: zamkov@paton.kiev.ua; ret99@ret99.kiev.ua