

Прочность и напряженное состояние несимметричных механически неоднородных сварных соединений с непроваром в центре шва при двухосном нагружении

А. А. Остсемин

ООО «Южно-Уральский научно-производственный центр», Челябинск, Россия

Приближенное решение плоской задачи теории пластичности для магистральных трубопроводов, цилиндрических сосудов, оболочковых конструкций при двухосном нагружении позволяет предложить теоретический анализ для оценки прочности и напряженного состояния несимметричных механически неоднородных сварных соединений с непроваром в центре шва при вязком разрушении. Путем регулирования степени механической неоднородности и толщины мягкой прослойки можно достичь равнопрочности сварного соединения с непроваром и переноса разрушения на основной металл при двухосном растяжении. Определен диапазон размера непровара, обеспечивающий равнопрочность соединения с несимметричной механической неоднородностью сварного стыка с непроваром.

Ключевые слова: стыковые соединения, мягкая прослойка, непровар, предельное растягивающее усилие, контактное упрочнение, несимметричная механическая неоднородность, касательные напряжения на линии сплавления шва, коэффициенты механической неоднородности.

Долговечность и надежность сварных конструкций при эксплуатации определяются наряду с другими факторами наличием в них концентраторов напряжений и деформаций. К ним относятся непровары в середине шва при двухсторонней сварке встык и в корне шва при односторонней сварке, несплавления между слоями при многослойной сварке и по кромкам, подрезы, поры, шлаковые включения и включения окислов, а также дефектная форма усиления шва [1]. Такие технологические дефекты встречаются довольно часто при сварке конструкций и поэтому объективная оценка возможного влияния их на прочность соединения является актуальной задачей при проектировании и контроле сварных конструкций.

При статическом растяжении прочность однородных сварных соединений из низкоуглеродистых сталей и стали X18H9T определяется нетто-сечением [1–3]. Если механически неоднородные сварные соединения имеют участки с пониженным сопротивлением пластическому деформированию (мягкие стыковые швы), технологические дефекты сварки обуславливают сложный нелинейный характер изменения статической прочности [4, 5]. Это объясняется развитием объемного напряженного состояния в окрестности дефекта и в мягкой прослойке (шве) в целом, так как имеет место эффект контактного упрочнения последней [6, 7]. Известны экспериментальные [1, 8, 9] и теоретические [5, 10] исследования по оценке влияния непровара на прочность швов при одноосном растяжении.

В [1, 8] приведен обзор экспериментальных исследований о влиянии непровара на прочность сварных швов.

ного (T) участков металла и мягкой прослойки (M) (контактные поверхности) касательные τ_{xy} и нормальные σ_y, σ_x напряжения непрерывны; формулы для вычисления напряженного состояния и прочности соединения, полученные для жесткопластичных материалов, распространяются на упрочняемые материалы с заменой в них предела текучести σ_T пределом прочности σ_B .

Кроме того, полагаем, что более прочные участки CT и T соединения вовлечены в пластическую деформацию, поэтому касательные напряжения τ_{xy} на контактных поверхностях не достигают предела текучести при сдвиге K_c ($\tau_{xy}^K = \alpha K_c$). На основе теоретического анализа [16] напряженного состояния механически неоднородного сварного соединения в окрестности контактной поверхности получена зависимость параметра α от степени механической неоднородности $K_B = \sigma_B^T / \sigma_B^M$ (σ_B^T, σ_B^M – пределы прочности металла и мягкой прослойки) при $K_B < 2$:

$$\alpha_i = (K_{B_i} - 1) \left[1 + \frac{(K_{B_i} - 1)^2}{4} \right], \quad (1)$$

где $0 < \alpha \leq 1$; $i = 1, 2$ – постоянные поверхности CT – M и T – M сварного соединения.

При малой механической неоднородности ($K_{B_i} < 1,5$) параметр α_i с ошибкой 4% с учетом (1) равен

$$\alpha_i = K_{B_i} - 1, \quad (2)$$

где $K_{B_1} = \sigma_B^{CT} / \sigma_B^M$; $K_{B_2} = \sigma_B^T / \sigma_B^M$; $\sigma_B^{CT}, \sigma_B^T, \sigma_B^M$ – предел прочности участков CT, T и M соответственно.

Согласно теории контактного упрочнения [7, 17], вследствие сдерживания (стеснения) пластических деформаций металла и шва со стороны соседних (более прочных) участков T сварного соединения на контактных поверхностях $y = \pm h/2$ возникают касательные напряжения τ_{xy}^K , которые в предельном состоянии достигают максимального значения $\tau_{xy \max}^K$, и мягкая прослойка находится в объемном напряженном состоянии. Величина $\tau_{xy \max}^K$ определяется ориентацией плоскостей скольжения:

$$\tau_{xy \max}^K = K_M \sin 2\alpha, \quad (3)$$

где K_M – предел текучести металла мягкой прослойки при чистом сдвиге, получаемый на конусном образце по разработанной методике [15, 18]; α – угол между нормалью плоскости скольжения и направлением главных напряжений σ_1 .

Покажем, что ориентация плоскостей скольжения в изотропном идеально пластичном теле определяется формой его поперечного сечения. Выражения для углов скольжения в плоскостях симметрии тела имеют вид [19]

$$\begin{aligned}\cos 2\alpha_2 &= -\frac{1}{3} \nu_\sigma = \frac{\sigma_1 - 2\sigma_2 + \sigma_3}{3(\sigma_1 - \sigma_3)}; \\ \cos 2\alpha_3 &= \frac{\sigma_1 - 2\sigma_3 + \sigma_2}{3(\sigma_1 - \sigma_3)},\end{aligned}\quad (4)$$

где ν_σ – показатель вида напряженного состояния.

Зависимость (4) получена для случая идеально пластичного материала при коэффициенте поперечной деформации $\mu = 0,5$. Для определения направления локальных полос текучести в твердом теле с учетом его деформационного упрочнения ($\mu < 0,5$) используем конструкцию решения [19]. При этом исходили из того, что в случае упрочняемого материала, не являющегося несжимаемым, поскольку $\mu \neq 0,5$, линейная деформация ε_y в направлении скольжения равна объемной ε_0 , что соответствует минимуму работы пластической деформации. На основе теоретического анализа с использованием выражения для линейной деформации в направлении локальных полос текучести и компонент напряженного состояния σ_y и σ_x , действующих в направлении скольжения, получим выражение для определения наклона полос текучести по отношению к σ [20]:

$$\cos 2\alpha_2 = \frac{(3\mu - 1)(\sigma_1 + \sigma_3) - 2(1 - \mu)\sigma_2}{(1 + \mu)(\sigma_1 - \sigma_3)}, \quad (5)$$

где μ – коэффициент, определяемый по методике [21], $0,25 \leq \mu \leq 0,5$. Необходимо отметить, что зависимость (4) в [19] является частным случаем формулы (5) при $\mu = 0,5$.

Влияние деформационного упрочнения на наклон локальных полос текучести проявляется через коэффициент поперечной деформации μ .

Для цилиндрического сосуда показатель двухосности нагружения $n = \sigma_{\text{кол}} / \sigma_{\text{ос}}$ ($\sigma_{\text{кол}}$, $\sigma_{\text{ос}}$ – кольцевое и продольное напряжения) в зависимости от соотношения приложенной осевой нагрузки и внутреннего давления может изменяться в широких пределах (0...2). Аналогично работам [22, 23] принимаем, что в условиях двухосного нагружения цилиндрического сосуда со сварным соединением на контактных поверхностях $CT-M-T$ участков металла ($y = \pm h/2$) возникают касательные напряжения τ_{xy} , которые в предельном состоянии достигают максимального значения $\tau_{xy}^{K_c}$ по выражению (3). При плосконапряженном состоянии угол наклона полос текучести по отношению к σ_1 согласно выражению (5) при $\sigma_3 = 0$ равен

$$\alpha_{\text{ск}} = \frac{1}{2} \arccos \frac{(3\mu - 1) - 2(1 - \mu)n}{(1 + \mu)}. \quad (6)$$

Значение коэффициента K_c , зависящее от показателя двухосности нагружения n , с учетом выражений (3), (5) и (6) будет

$$K_c = K_{MA}, \quad (7)$$

где A – параметр, $A = \frac{2}{1+\mu} \sqrt{(1-\mu)(1+n)[2\mu - (1-\mu)n]}$. Заметим, что при $\mu = 0,5$ максимальное касательное напряжение $K_c = \frac{2}{3} \sqrt{(n+1)(2-n)} K_M$ равно таковому по выражению (1) из [23] и является частным случаем формулы (7), а по зависимости (6) получаем выражение (4) для $\cos 2\alpha_2$ из [19].

Следует отметить, что коэффициент K_c по формуле (7) при одноосном растяжении ($n=0$) равен $K_c = \frac{2}{1+\mu} \sqrt{(1-\mu)2\mu} K_M$ и при $\mu = 0,5 - K_c = 0,94K_M$, при $\mu = 0,3 - K_c = K_M$. При двухосном растяжении ($n=0,5$) получим $K_c = \frac{1}{1+\mu} \sqrt{3(1-\mu)(5\mu-1)} K_M$ и при $\mu = 0,5$ значения $K_c = K_M$ больше, чем $K_c = 0,94K_M$ при $n=0$, при $\mu = 0,3$ коэффициент $K_c = 0,78K_M$ уже меньше, чем при одноосном растяжении. При $n=1$ коэффициент $K_c = \frac{2}{1+\mu} \sqrt{2(1-\mu)(3\mu-1)} K_M$ и при $\mu = 0,5 - K_c = 0,94K_M$. Следовательно, коэффициент поперечной деформации μ существенно влияет на прочность сварных соединений.

Таким образом, разрушающие напряжения при двухосном нагружении $\sigma_p^{дв}$ больше, чем при одноосном $\sigma_p^{одн}$. Это подтверждается экспериментальными исследованиями на сварных трубках $\varnothing 14$ мм из стали 15ХГ2СФР Новокузнецкого трубного завода с различной термической обработкой: $\sigma_p^{дв} / \sigma_p^{одн} = 1,03...1,07$ [24]. В металле разупрочненных зон при нагружении обнаружено более раннее, чем у основного металла, развитие пластических деформаций и более интенсивное их нарастание. Металл мягких прослоек сварных соединений при упругопластическом деформировании в случае двух- и одноосного растяжения значительно упрочняется. Зоны разупрочнения способствуют резкому уменьшению степени пластического течения основного металла, коэффициентов α_i , вычисленных по формуле (2), и общих деформаций. В металле мягких прослоек обнаруживаются ранние появления пластических деформаций и более интенсивное упрочнение в сравнении с основным металлом. Прочность металла мягкой прослойки повышается как при одно-, так и при двухосном растяжении.

Особенностью характера пластической деформации сварных соединений с непроваром является наличие двух точек O_1 и O_2 ветвления пластического течения металла мягкой прослойки (рис. 1). В зонах между этими точками над и под непроваром (на рис. 1 заштрихованные области) принимается, что пластическое течение отсутствует. Это предположение экспериментально методом муаровых полос подтверждается результатами работы [9]. Поэтому напряжение в металле мягкой прослойки (в зоне между вершиной непровара и правым свободным краем пластического слоя) для несимметричного механически неоднородного сварного соединения может быть вычислено так [25]:

$$\sigma_{x_i} = K_M \left\{ -0,5 \operatorname{lnch} \frac{2(\alpha_1 + \alpha_2)[x - (d + l_2)]}{h_i} \right\} + \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)^2}{h_i^2} y^2 + C; \quad (8)$$

$$\sigma_{y_i} = K_M \left\{ -0,5 \operatorname{lnch} \frac{2(\alpha_1 + \alpha_2)[x - (d + l_2)]}{h_i} \right\} - \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{h_i^2} \frac{y^2}{\operatorname{ch}^2 \left[\frac{2(\alpha_1 + \alpha_2)}{h_i} x \right]} + 1 + C; \quad (9)$$

$$\tau_{xy} = K_M \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{h_i} y \operatorname{th} \frac{2(\alpha_1 + \alpha_2)[x - (d + l_2)]}{h_i}, \quad (10)$$

где

$$C = -0,5 \ln 2 - \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{2\chi} - \frac{1}{3}(\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2) + e^{-2(\alpha_1 + \alpha_2)\chi};$$

$-h_i < y < h_i$; $i = 1, 2$; $h_1 + h_2 = h_i$; h_1 и h_2 – расстояние от плоскостей, на которых касательные напряжения равны нулю, до контактной поверхности $CT-M$ и $T-M$ соответственно; α_1 и α_2 – параметры, зависящие от коэффициентов механической неоднородности K_{B_2} и K_{B_1} и определяемые по формуле (2); $\chi = h/B$ – относительная толщина мягкой прослойки; h и B – ширина и толщина мягкой прослойки; d – длина непровара.

При $i = 1$ по формулам (8) и (10) можно определить компоненты тензора напряжений в зоне справа от точки ветвления O_1 (рис. 1). В этом случае получим

$$\frac{B}{2} + l_2 < x < B; \quad -\frac{h}{2} < y < \frac{h}{2}.$$

Для определения напряжений в зоне мягкой прослойки между вершиной непровара и точкой ветвления O_1 (рис. 1) в формулы (8) и (10) следует подставить $i = 2$.

Вычислим разрушающее усилие P_i в образце без дефекта:

$$P_i = 2B\sigma_{y_{\text{ср}}}^{K_i} = 2 \int_{-B/2}^{B/2} \sigma_{y_i}(x, h_i) dx. \quad (11)$$

Проинтегрируем выражение (11) с учетом (9) для определения напряжения $\sigma_{y_{\text{ср}}}$. С использованием разложения функций $\operatorname{th} x$, $\operatorname{lnch} x$ и e^{-x} в виде степенных рядов Маклорена получим выражение для средних напряжений $\sigma_{y_{\text{ср}}}$ из формулы (11) в широком диапазоне изменения толщины мягкой толстой прослойки ($0,25 < \chi < 1,0$):

$$\sigma_{y\text{cp}}^{K_i} = \beta \sigma_B^M \left[-\frac{\alpha_i^2 + 0,2}{2(\alpha_1 + \alpha_2)} \chi - \frac{1}{8\chi} (\alpha_1 + \alpha_2) + 1 - \frac{1}{6} (\alpha_1^2 - \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2^2) + \left[1 + \frac{\chi}{4(\alpha_1 + \alpha_2)} \right] e^{-2(\alpha_1 + \alpha_2)/\chi} \right], \quad (12)$$

где $\beta = 1,0 \dots 1,15$ – переменный коэффициент.

Наибольшего значения напряжение σ_y на контактной поверхности со стороны мягкой прослойки достигает при $|\chi| = d/2 + l_2$, т.е. в абсциссах точек ветвления O_1 и O_2 (рис. 2), наименьшего вблизи контактной поверхности – на свободной поверхности и на краю непряра:

$$\sigma_y \left(B; \frac{h}{2} \right) = \sigma_y \left(\frac{l}{2}; \frac{\Delta}{2} \right) = K^M \left(1 - \frac{\alpha_1^2 - \alpha_2 \alpha_2 + \alpha_2^2}{6} - \frac{2(\alpha_1 + \alpha_2)^2}{\text{ch}^2 \frac{2(\alpha_1 + \alpha_2)}{\chi^*}} \right), \quad (13)$$

где $\chi^* = \frac{1 + \Delta/h}{1 - d/B} \chi$; Δ – толщина непряра.

Графики напряжений τ_{xy} и σ_y при $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2 = 0,5$ схематично приведены на рис. 2. Координаты точки ветвления O_1 получим, если приравняем значения напряжений σ_y (или σ_x) слева и справа от точки O_1 .

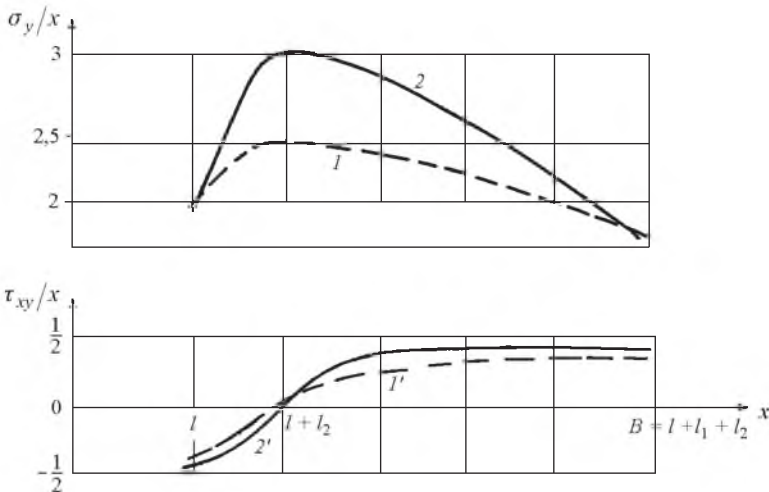


Рис. 2. Нормальное σ_y (1, 2) и касательные τ_{xy} (1', 2') напряжения на контактной поверхности со стороны мягкой прослойки при $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2 = 0,5$: 1 – $\chi = 0,5$; 2 – $\chi = 0,25$.

Из выражения (10) следует [5, 25] $l_1/h_1 = l_2/h_2$, $h_i/l_i = \chi^*$ ($i = 1, 2$). С использованием обозначений, приведенных на рис. 1 ($2h_1 = h_i$; $2h_2 = \Delta$; $l_1 + l_2 = 1/[2(B - l)]$), получим положение точки ветвления O_1 , определяемое отрезком l_1 [5, 25]:

$$l_1 = \frac{h}{h + \Delta} \frac{B - d}{2} = \frac{1 - d/B}{2} \frac{u}{u + 1}, \quad u = \frac{h}{\Delta}. \quad (14)$$

При сопоставлении расчетных значений l_1^p по выражению (14) с экспериментальными l_1^3 , определенными непосредственно по картинам муаровых полос [19], погрешность составила менее 5%. Полученные на основе теоретического анализа напряженного состояния значения σ_x , σ_y и экспериментальные данные [9] свидетельствуют о хорошем соответствии распределения напряжений как в анализируемом случае, так и при статическом растяжении механически неоднородных сварных соединений при изменении толщины непровара в диапазоне $\Delta/h = 0,15 \dots 0,5$ в центре шва.

С использованием выражения (14) можно определить параметр непровара:

$$l_2 = \frac{1 - d/B}{2\chi} \frac{1}{u + 1}. \quad (15)$$

Для реальных геометрических размеров шва и непроваров согласно зависимости (15) получим $l_2/\Delta \leq 4$. Для сварных соединений с непроваром ($u > 15$, $h > 5$ мм, $\rho = 2\Delta^2/d \leq 0,1$ мм – радиус непровара) согласно формуле (14) смещение точки ветвления пластического течения l_1 от вершины непровара мало по сравнению с толщиной образца B (рис. 3). Практически можно полагать, что точка ветвления O_1 находится в вершине непровара, и снижение напряжений σ_y от их максимального значения до предела текучести металла шва, равного $2K_M$, на свободной поверхности дефекта происходит скачкообразно на малой базе, $l_1 \rightarrow 0$. Данное обоснование позволяет упростить вычисление средних предельных напряжений сварных механически неоднородных соединений с непроваром в центре шва.

Для вычисления средних предельных напряжений несимметричных механически неоднородных сварных соединений с непроваром в центре шва используем условие эквивалентности суммарных напряжений σ_y внешнему усилию P . Получим усилие при одноосном растяжении плоского образца:

$$P_i = 2K_M l_2 \left[-\frac{\alpha_i^2 + 0,2}{2(\alpha_1 + \alpha_2)} \chi^* + \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{8\chi^*} + 1 - \frac{1}{6}(\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2) \right], \quad i = 1, 2, \quad (16)$$

где

$$P_1 = 2 \int_{d/2+l_2}^B \sigma_y(x, h_1) dx; \quad P_2 = 2 \int_{d/2}^{d/2+l_2} \sigma_y(x, h_2) dx.$$

Сумма P_1 и P_2 с учетом выражений (16) равна

$$P = K_M (B - d) \left[-\frac{\alpha_i^2 + 0,2}{2(\alpha_1 + \alpha_2)} \chi^* + \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{8\chi^*} + 1 - \frac{1}{6}(\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2) \right]. \quad (17)$$

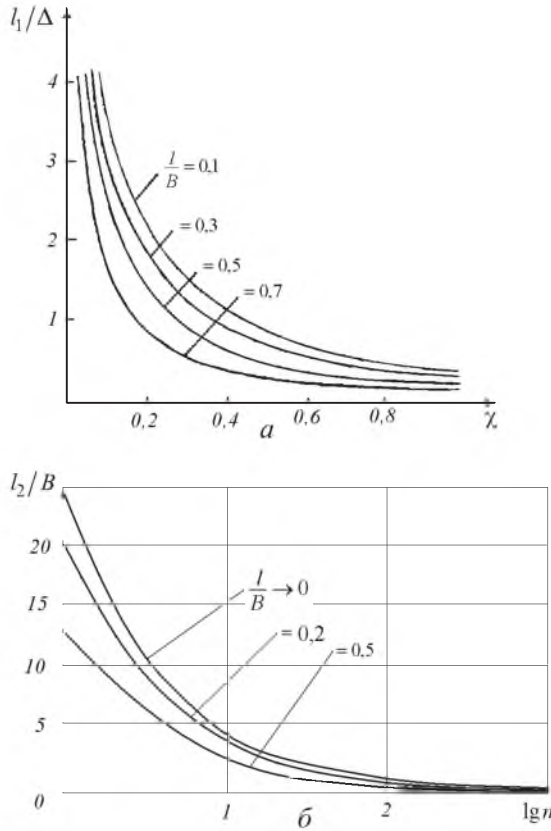


Рис. 3. Зависимость параметра l_1/Δ (а) и смещения точки ветвления l_2/B (б) от относительной толщины мягкой прослойки χ , размера непровара d/L и $u = h/\Delta$.

Для толстых мягких прослоек ($0,25 < \chi < 1,0$) при одноосном растяжении с учетом формулы (17) получим среднее предельное напряжение $\sigma_{y\text{cp}}$ для сварного соединения с непроваром в центре шва:

$$\sigma_{y\text{cp}} = \beta \sigma_B^M \left(1 - \frac{d}{B}\right) \left[-\frac{\alpha_i^2 + 0,2}{2(\alpha_1 + \alpha_2)} \chi^* + \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{8\chi^*} + 1 - \frac{1}{6}(\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2) \right]. \quad (18)$$

Отметим, что при отсутствии дефекта ($l = \Delta = 0$) формула (18) преобразуется к виду (12).

Подставив в формулу (18) χ^* из (13) при $\Delta = 0$, можно получить среднее предельное напряжение для плоских трещиноподобных дефектов (несплавлений, трещин).

Формула (18) применима при $\chi^* < 1$, т.е. при $1 - d/B > \chi$. Тогда правая часть формулы (18) положительна при любых значениях $0,05 < \alpha_i \leq 1$. Нетрудно заметить, что при $\chi \geq (1 - d/B)$ в сварном соединении с непроваром эффект контактного упрочнения отсутствует, и прочность соединения определяется прочностью металла шва.

На рис. 4 приведена теоретическая зависимость, полученная по формуле (18), и экспериментальные значения [26] прочности сварных соединений с непроваром в центре шва размером $400 \times 95 \times 25$ мм, основной металл которых – сплав системы титан–алюминий–ванадий с пределом прочности $\sigma_B^T = 875$ МПа, а мягкий сварной шов выполнен при щелевой разделке кромок с использованием присадки из сплава ВТ5 ($\sigma_B^M = 660$ МПа) при $K_B = 1,33$ и $\chi = 0,32 \dots 0,37$. Внутренний дефект в центре шва создавался вследствие непровара. Получено хорошее соответствие между теоретическими и экспериментальными данными.

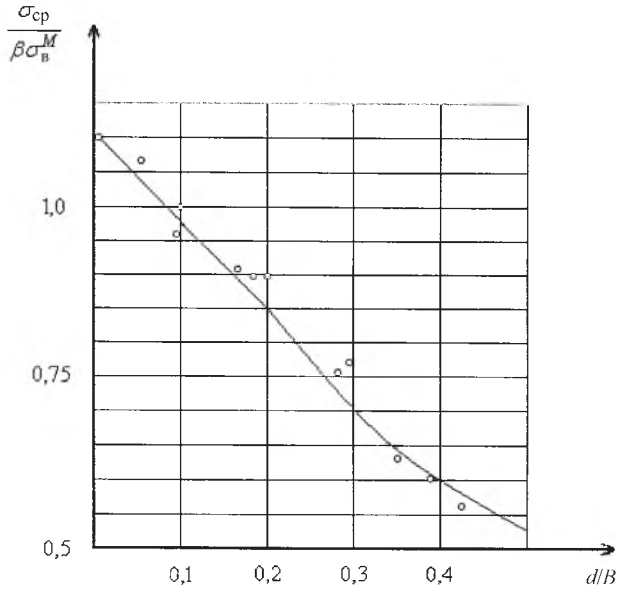


Рис. 4. Сравнение теоретических по формуле (18) – линия и экспериментальных – точки значений прочности сварных соединений с непроваром в центре шва: $K_B = 1,33$; $\chi = 0,32 \dots 0,37$; $d/L = 0,07 \dots 0,1$.

При определенном значении χ , равном χ_p , прочность сварного соединения $\sigma_{ср}$ достигает уровня прочности основного металла σ_B^T .

Статическая прочность несимметричных механически неоднородных сварных соединений с непроваром в центре шва при двухосном растяжении с учетом формул (2), (3), (6), (7), (13) и (18) равна

$$\sigma_{ср} = \beta\sigma_B^M A \left(1 - \frac{d}{B}\right) \left\{ -\frac{\alpha_1^2 + 0,2}{2(\alpha_1 + \alpha_2)} \left(\frac{1 + \frac{\Delta}{h}}{1 - \frac{d}{B}} \right) \chi + \frac{1}{8} \left[\frac{(\alpha_1 + \alpha_2) \left(1 - \frac{d}{B}\right)}{\chi \left(1 + \frac{\Delta}{h}\right)} + 1 - \frac{1}{6}(\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2) \right] \right\}. \quad (19)$$

Решая квадратное уравнение (19), для плоскостных дефектов при $\Delta = 0$ получаем допустимый диапазон относительных критических размеров непровара, для которых сварное соединение с несимметричной механической неоднородностью равнопрочно основному металлу при условии $\sigma_{\text{ср}} = 2K_T$:

$$\frac{d}{B} = 1 - \frac{4\chi}{\alpha_1 + \alpha_2} \left[-C + \sqrt{C^2 + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2\chi} \left(\frac{\alpha_i^2 + 0,2\chi}{2(\alpha_1 + \alpha_2)} + \frac{K_B}{A\beta} \right)} \right], \quad (20)$$

где $C = 1 - \frac{1}{6}(\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2)$. При $K_B = 1,1$ и $\chi = 0,24$ по формуле (20) получим, что непровар отсутствует при $n = 0$, $\beta = 1$, $A = 1$, при $K_B = 1,33$ и $\chi = 0,32$ относительный размер непровара будет $d/B = 3\%$. При двухосном растяжении и коэффициенте Пуассона $\mu = 0,3$ непровар в центре шва отсутствует ввиду уменьшения параметра A .

При симметричной механической неоднородности сварного соединения ($K_{B_1} = K_{B_2} = K_B$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$) получим критический диапазон размеров плоскостного дефекта, при которых сварное соединение равнопрочно основному металлу при условии $\sigma_{\text{ср}} = 2K_T$:

$$\left(\frac{d}{B}\right)^x = 1 + \frac{2\chi}{\alpha} - \frac{\alpha\chi}{3} - \frac{2\chi}{\alpha} \sqrt{\left(1 - \frac{\alpha^2}{6}\right)^2 + \frac{\alpha^2 + 0,2}{4} + \frac{\alpha K_B}{\chi \beta}}. \quad (21)$$

Эта формула является более точной по сравнению с выражением из [5]. Например, при $K_B = 1,5$ и $\chi = 0,1$ допустимыми являются плоскостные дефекты с относительными размерами $(d/B)^x \leq 0,28$, в сварных соединениях при $K_B = 1,5$ и $\chi = 0,15$, а также $K_B = 1,15$ и $\chi = 0,5$ допустимых дефектов в виде непровара в центре шва нет.

Отсутствие плоскостного дефекта определяется по соотношению (21) максимальными значениями: относительной толщиной мягкой прослойки ($\chi \leq 0,35$) при степени механической неоднородности $K_B \leq 1,35$. При $K_B = 1,15$ и $\chi = 0,35$ непровар в центре шва не допускается.

Несимметричная механическая неоднородность сварного стыкового соединения уменьшает допустимый критический размер непровара в центре шва.

С уменьшением χ и увеличением коэффициентов механической неоднородности K_{B_1} и K_{B_2} критическое значение $(d/B)^{\text{кр}}$ для плоскостного дефекта уменьшается согласно выражению (20). Из формулы (21) при $K_{B_1} = K_{B_2} = 1,33$, $\chi = 0,32 \dots 0,37$ диапазон относительных размеров плоскостных непроваров равен $(d/B)^{\text{кр}} = 0,04$. Это теоретическое значение хорошо соответствует экспериментальным данным $(d/B)^{\text{кр}} = 0,07$ [26]. Таким образом, проведен теоретический анализ критического размера непровара в корне шва с учетом механической неоднородности сварных соединений титановых сплавов.

Заметим также, что непровар в центре шва существенно влияет на относительные удлинение δ и сужение ψ плоских образцов. С увеличением размеров непровара при одинаковой относительной толщине χ менее прочного участка (мягкая прослойка) показатели пластичности δ , ψ сварного соединения уменьшаются в два–пять раз.

На основании полученных теоретических результатов можно дать рекомендации по уточнению и изменению жестких норм на недопустимые дефекты сварки (непровары), что приведет к сокращению отбраковки сварных швов и снижению больших объемов ремонтных работ при подварке дефектов. Статистика и причины появления опасных дефектов вблизи отремонтированных участков сварных швов приведены в [27, 28]. Небольшие непровары незначительно уменьшают несущую способность и не опасны [3]. Выбор неоправданно жестких норм оценки качества сварных соединений при статическом нагружении и удаление единичных мелких непроваров не всегда целесообразно, так как при этом в зонах ремонта могут появиться более опасные дефекты в виде трещин, надрывов, расслоений.

Разработанный алгоритм оценки влияния непровара на прочность сварных соединений и экспериментальные данные [29] о влиянии поверхностных дефектов в сварных швах действующего магистрального нефтепровода могут быть использованы при экспертизе аварий, внутритрубной диагностике магистральных газонефтепроводов и продуктопроводов, разработке технологических регламентов и нормативно-технической документации.

Разработка расчетных методов оценки работоспособности сварных соединений при вязком разрушении с учетом фактора несимметричной механической неоднородности и особенностей пластического поведения металла и сварных соединений, расположения дефектов для типов V, X и других видов разделки кромок стыковых соединений в условиях двухосного растяжения требует проведения дальнейших исследований для предотвращения опасных аварий.

Выводы

1. Приближенное решение системы уравнений равновесия и условия пластичности Губера–Мизеса для цилиндрических сосудов, труб, оболочечных конструкций при двухосном нагружении позволяет предложить теоретические зависимости для оценки прочности напряженного состояния при вязком разрушении несимметричных механически неоднородных сварных соединений с непроваром в центре шва.

2. Теоретически определен критический размер непровара при вязком разрушении механически неоднородных стыковых соединений, исходя из уровня допустимых напряжений, степени механической неоднородности $K_{\text{в}i}$ и относительной толщины мягкой прослойки χ . Это позволяет проводить нормирование непроваров в статически нагруженных сварных конструкциях.

3. Разработан метод оценки прочности тонкостенных цилиндрических оболочек с мягкими кольцевыми прослойками, работающих при статическом двухосном растяжении.

Резюме

Наближений розв'язок плоскої задачі теорії пластичності для магістральних трубопроводів, циліндричних посудин, оболонкових конструкцій при двовісному навантаженні дозволяє запропонувати теоретичний аналіз для оцінки міцності і напруженого стану несиметричних механічно неоднорідних зварних з'єднань із непроваром у центрі шва при в'язкому руйнуванні. Шляхом регулювання механічної неоднорідності і товщини м'якого прошарку можна досягти рівномірності зварного з'єднання з непроваром та перенесення руйнування на основний метал при двовісному розтязі. Визначено діапазон розміру непровару, що забезпечує рівномірність з'єднання з несиметричною механічною неоднорідністю зварного шва з непроваром.

1. Макаров И. И., Емельянова Т. И. Влияние технологических дефектов на долговечность и надежность сварных соединений // Надежность сварных соединений и конструкций. – М.: Машиностроение, 1967. – С. 47 – 63.
2. Николаев Г. А., Румянцев С. В. Влияние дефектов сварки на механические свойства сварных соединений // Вопросы прочности металлов и конструкций. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – С. 82 – 91.
3. Жемчужников Г. В., Котенко Э. В., Гиренко В. С. Влияние непровара на статическую прочность стыковых соединений при низких температурах // Автомат. сварка. – 1968. – № 2. – С. 29 – 33.
4. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. и др. Исследование прочности сварных конструкций // Изв. вузов. Машиностроение. – 1968. – № 9. – С. 144 – 153.
5. Дильман В. Л., Остсемин А. А. Прочность механически неоднородных сварных соединений с щелевидным дефектом // Сварочное пр-во. – 1999. – № 2. – С. 12 – 15.
6. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
7. Бакиш О. А., Шрон В. З. Прочность при статическом растяжении сварных соединений с мягкой прослойкой // Сварочное пр-во. – 1962. – № 5. – С. 6 – 10.
8. Немчинский А. Л. О влиянии дефектов на прочность сварных швов // Сварка. – 1958. – № 1. – С. 95 – 102.
9. Бакиш О. А., Шахматов И. В., Ерофеев В. В. Напряженно-деформированное состояние сварных соединений с дефектом в центре мягкого стыкового шва // Автомат. сварка. – 1982. – № 3. – С. 9 – 11.
10. Nao S., Cornec A., and Schwabbe K. H. Plastic stress-strain fields and limit loads of a plane strain cracked tensile panel with a mismatched welded joint // Int. J. Solids Struct. – 1997. – 34, No. 3. – P. 297 – 326.
11. Зайнуллин Р. С. Несущая способность сварных сосудов с острыми поверхностными дефектами // Сварочное пр-во. – 1981. – № 3. – С. 5 – 7.

12. *Остсемин А. А.* Напряженное состояние и статическая прочность механически неоднородных сварных соединений. Сообщ. 1. Оценка влияния значительной механической неоднородности на статическую прочность сварных соединений // Пробл. прочности. – 1991. – № 4. – С. 35 – 38.
13. *Остсемин А. А.* Влияние компактности поперечного сечения механически неоднородных сварных соединений на их напряженно-деформированное состояние и прочность // Там же. – 1992. – № 1. – С. 65 – 70.
14. *Прандтль Л.* Примеры применения теоремы Генки к равновесию пластических тел // Теория пластичности / Под ред. Ю. Р. Работнова. – М.: Изд-во иностр. лит., 1948. – С. 102 – 113.
15. *Остсемин А. А.* Определение предела текучести сварного соединения // Сварочное пр-во. – 1987. – № 6. – С. 42 – 43.
16. *Дильман В. Л., Остсемин А. А.* Анализ методом линий скольжения вязкой прочности сварного соединения с подрезом прямошовных труб большого диаметра // Пробл. прочности. – 2004. – № 3. – С. 72 – 82.
17. *Бакиш О. А.* О напряженном состоянии мягких прослоек в сварных соединениях при растяжении (сжатии) // Вопр. сварочного пр-ва. – 1965. – № 33. – С. 5 – 26.
18. *Остсемин А. А., Лукин В. А.* Кручение конического стержня из упрочняющегося материала // Пробл. прочности. – 1985. – № 6. – С. 60 – 64.
19. *Островский А. А.* О направлении локальных слоев текучести при сложном напряженном состоянии // Прикл. механика. – 1974. – Вып. 2. – С. 112 – 115.
20. *Шахматов М. В., Ерофеев В. В., Остсемин А. А.* О влиянии деформационного упрочнения на направление локальных слоев текучести в зоне предразрушения // Пробл. прочности. – 1985. – № 3. – С. 46 – 49.
21. *Давиденков Н. Н., Васильев Д. М.* О коэффициенте поперечной деформации // Завод. лаб. – 1952. – № 5. – С. 596 – 599.
22. *Бакиш О. А., Богомолова А. С.* Прочность механически неоднородных сварных соединений при двухосном растяжении // Сварочное пр-во. – 1971. – № 5. – С. 3 – 6.
23. *Остсемин А. А.* Прочность и напряженное состояние мягкой прослойки в тонкостенном цилиндрическом сосуде при двухосном нагружении // Автомат. сварка. – 1994. – № 5-6. – С. 18 – 20.
24. *Гладштейн Л. И., Злочевский А. Б.* Прочность механически неоднородных сварных соединений высокопрочной стали при одноосном и двухосном растяжении // Сварочное пр-во. – 1969. – № 9. – С. 8 – 12.
25. *Остсемин А. А.* Влияние поверхностного дефекта на прочность сварных соединений с несимметричной механической неоднородностью // Автомат. сварка. – 2007. – № 5. – С. 31 – 35.
26. *Шахматов М. В.* Несущая способность сварных соединений с дефектами в твердых и мягких швах // Там же. – 1988. – № 6. – С. 14 – 18.

27. Волков А. С. Причины появления дефектов вблизи исправленных участков сварных швов // Сварочное пр-во. – 1974. – № 8. – С. 33 – 35.
28. Остсемин А. А., Дильман В. Л. Влияние дефектов сварки, расположенных на границе сплавления, на прочность сварного соединения // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 21 – 26.
29. Остсемин А. А. Анализ несущей способности действующего магистрального нефтепровода при наличии дефектов в продольном шве // Сварочное пр-во. – 1988. – № 9. – С. 11 – 15.

Поступила 05. 01. 2009