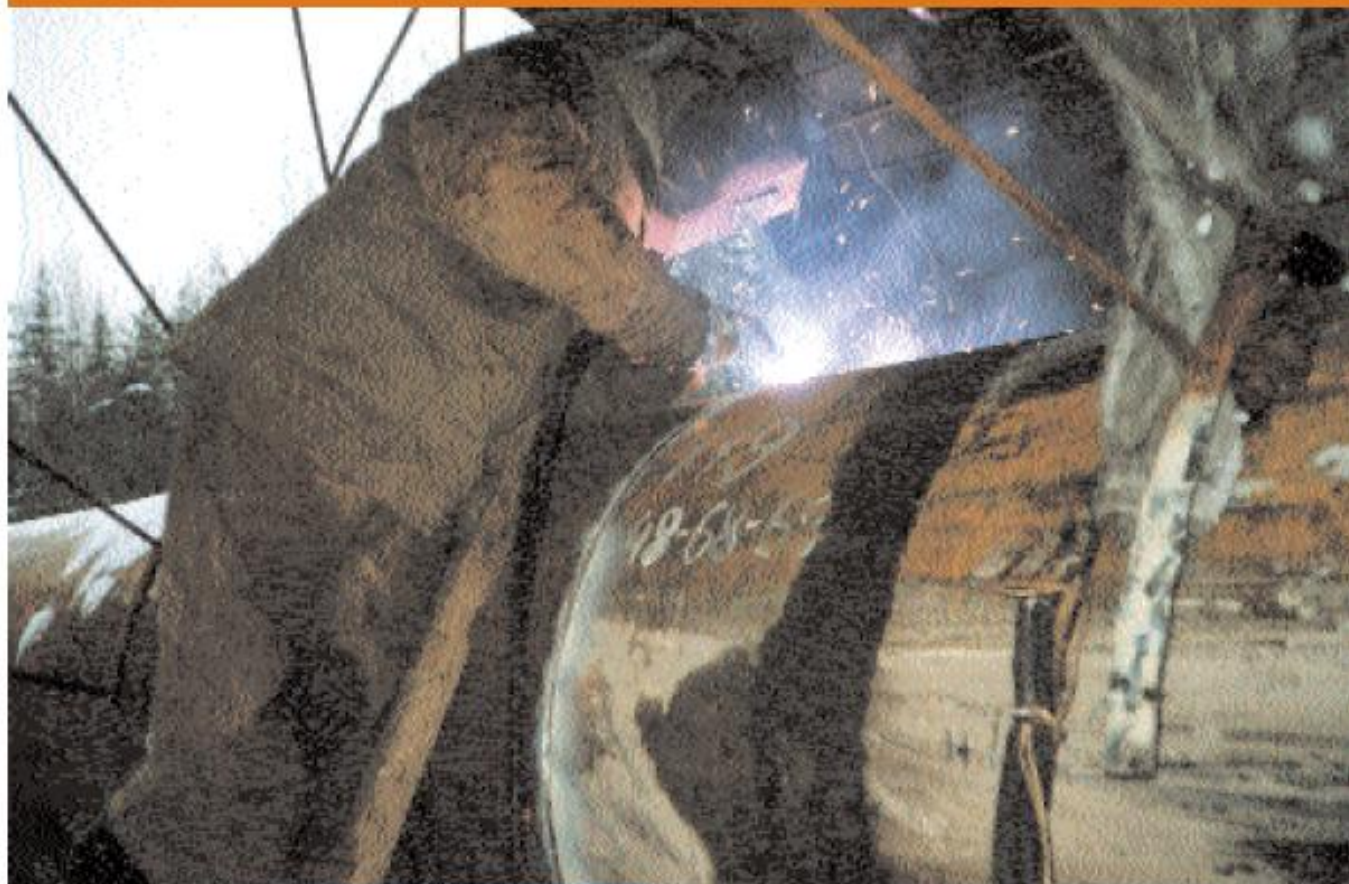


СВАРНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КАК КОНСТРУКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ТРУБОПРОВОДА



А.С. ЗАНДБЕРГ



Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ООО «Институт ВНИИСТ», Москва

Действующая нормативная документация рассматривает сварные соединения как равнопрочные металлу свариваемых труб, регламентируя применение электродов с более высокими, по сравнению с трубой, нормативными показателями. Принимая во внимание лишь нормативные уровни прочности по техническим условиям, часто оставляют без рассмотрения фактор статистического разброса по сертификатам, благодаря которому, в случае пересечения

интервалов разброса реальных механических свойств основного и наплавленного металла, в составе трубопровода появляются «мягкие» швы. Существование указанных сварных соединений подтверждается измерениями твердости при ремонте действующих нефтепроводов.

Таким образом, формально соответствующие требованиям сварные стыки фактически неравнопрочны основному металлу и нуждаются в дополнительной оценке несущей способности.

В настоящее время завершается разработка международного стандарта [1], приносящего элементы теории надежности в практику проектирования магистральных трубопроводов. Необходимость подобного шага назрела давно. Иллюстрацией тому может служить задача обеспечения несущей способности стыковых сварных соединений трубопроводов.

Рассмотрим изменения напряженного состояния трубопровода, вызываемые сварным соединением как конструктивным элементом с собственными размерами и механическими свойствами. Для количественной оценки использован математический аппарат балки на упругом основании [2], применяемый к склепанному сварному шву (РИСУНОК 1).

В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ ЗАВЕРШАЕТСЯ РАЗРАБОТКА МЕЖДУНАРОДНОГО СТАНДАРТА [1], ПРИВНОСЯЩЕГО ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ В ПРАКТИКУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ. НЕОБХОДИМОСТЬ ПОДОБНОГО ШАГА НАЗРЕЛА ДАВНО. ИЛЛЮСТРАЦИЕЙ ТОМУ МОЖЕТ СЛУЖИТЬ ЗАДАЧА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ.

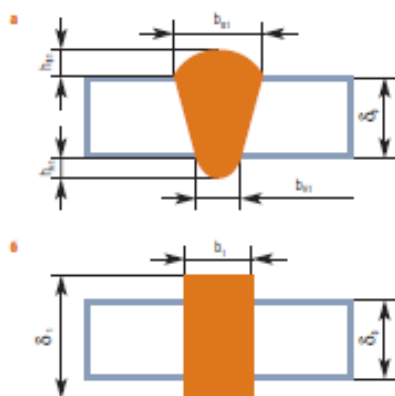


РИСУНОК 1. Реальное и стематизированное стыковое сварное соединение: а – реальное сварное соединение; б – стематизированное сварное соединение; δ_s – толщина стенки основной трубы (м); h_n, h_{in} – высота наружного и внутреннего усиления сварного шва (м); b_n, b_{in} – ширина наружного и внутреннего усиления сварного шва (м); b, b_i – толщина и ширина стематизированного сварного шва (м)

Толщина стематизированного сварного шва определена в виде суммы:

$$\delta_i = \delta_s + h_n + h_{in}, \quad (1)$$

где h_n, h_{in} – высота наружного и внутреннего усиления реального сварного шва (м);

δ_s – толщина стенки основной трубы (м).

Ширина стематизированного сварного шва задана на основе аппроксимации формы усиления реального шва квадратичной параболой и равенности поперечных сечений реального и стематизированного швов (РИСУНОК 1а, 1б):

$$b_i = \frac{b_n + b_{in}}{2} \cdot \frac{\delta_s}{\delta_i} + \frac{2}{3} \cdot \frac{h_n b_n + h_{in} b_{in}}{\delta_i}, \quad (2)$$

где δ_i – толщина стематизированного шва (м).

Все дальнейшие рассуждения относятся к стематизированному сварному шву.

Для моделирования взаимодействия шва с окружающим металлом использовали принцип «сшивания», иллюстрируемый на РИСУНОКЕ 2, где показаны изменения формы сварного соединения под действием растягивающего брутто-напряжения в стенке трубы.

Рассматривали трехосное напряженное состояние. Деформацию в направлении z полагали связанной с деформацией в направлении x следующими соотношениями:

$$\epsilon_z = k \epsilon_x, \quad (3)$$

$$\text{при } k = (1 - \mu) \frac{\sigma_z}{\sigma_x} - \mu,$$

где k – коэффициент напряженного состояния.

Случай $k = 0$ соответствует плоской деформации.

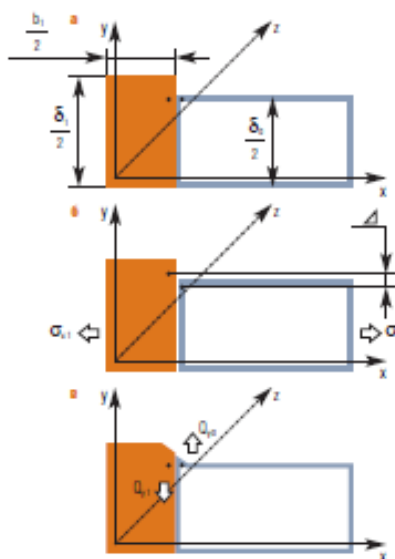


РИСУНОК 2. Этапы деформирования границы сварного шва и основной металла при растяжении: а – схема границы между сварным швом и основным металлом до растяжения; б – схема обособленного деформирования шва (индекс 1) и основного металла (индекс 0); в – схема сшивания шва и основного металла путем приложения дополнительных усилий по границе (σ_{x1} и σ_{x0})

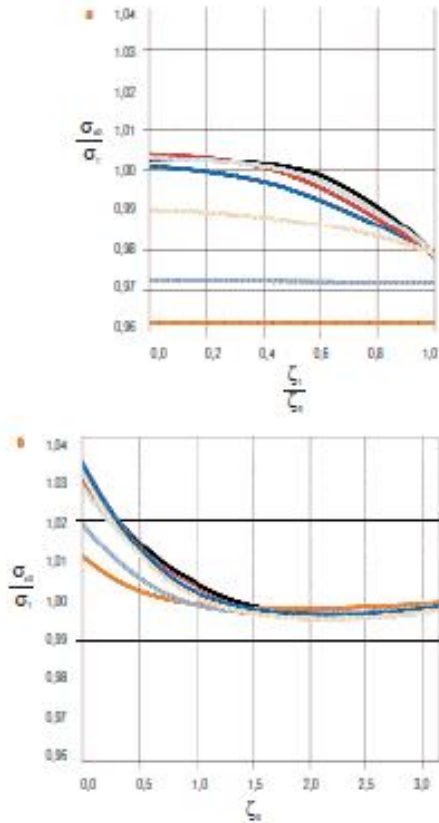


РИСУНОК 3. Условие пластичного течения сварного соединения при $\delta_1^* = 2\delta$
 график 1 — $C_0 = 0,05\pi$
 график 2 — $C_0 = 0,1\pi$
 график 3 — $C_0 = 0,3\pi$
 график 4 — $C_0 = 0,5\pi$
 график 5 — $C_0 = 0,7\pi$
 график 6 — $C_0 = 0,7\pi$
 график 7 — $C_0 = \pi$

а случай $-\mu < k < 0$ соответствует растяжению;
 μ — коэффициент Пуассона.

Согласно обобщенному закону Гука и формуле (3), радиальная (поперечная) деформация представима в виде двух слагаемых, первое из которых описывает операцию «сшивания», а второе — результат обособленного (без взаимодействия конструктивных элементов) деформирования:

$$\epsilon_r = \frac{1 - (1 - k)\mu^2}{E} \sigma_r - \frac{\mu - (1 + k + \mu)}{E} \sigma_\theta \quad (4)$$

где E — модуль нормальной упругости Юнга (МПа).

По условию симметрии положение срединной поверхности сварного соединения при нагружении осевой силой не изменяется (ось x РИСУНКА 2), поэтому данная поверхность служит жестким основанием для верхней части сварного соединения. Жесткое основание является частным случаем упругого основания, описываемого уравнением:

$$\frac{d^4 W_{\zeta_i}(x)}{dx^4} + 4k^2 W_{\zeta_i}(x) = 0, \quad (5)$$

где i — индекс, равный 0 для стенки трубы и 1 для шва;

W_{ζ_i} — поперечное перемещение (м);

$\frac{d^4 W_{\zeta_i}(x)}{dx^4}$ — производная от поперечного перемещения по координате x (м^{-4).

Получение решения для жесткого основания требует определения коэффициента при втором слагаемом, который связан с коэффициентом постели формулой:

$$k^2 = \frac{c}{4EJ}, \quad (6)$$

где J — момент инерции поперечного сечения балок единичной ширины (м^4);

E — модуль нормальной упругости соответствующей балки (МПа);

c — коэффициент постели (МПа/м).

Согласно гипотезе прямой пропорциональности перемещению, реакция жесткого основания определяется формулой:

$$p_r = -c W_{\zeta_i}, \quad (7)$$

где $p_r(x)$ — реакция со стороны жесткого основания (МПа).

В работе [2] было установлено, что распределение истинных поперечных напряжений по толщине стенки подчиняется закону кубической параболы:

$$p_r = -p \left[1 + 4\frac{y}{\delta} \right] \left[1 - 2\frac{y}{\delta} \right]^2, \quad (8)$$

где y меняется от 0 до $\frac{\delta}{2}$.

Исключая из (7) и (8) коэффициент постели и вычислив среднее по толщине стенки напряжение, найдем:

$$k = \frac{3,137}{\delta_1} \approx \frac{\pi}{\delta_2}. \quad (9)$$

Решая уравнение (5) для сварного шва (представляющего собой короткую балку), получим выражение для поперечных напряжений:

$$\frac{\sigma_{\zeta_i}}{\sigma_0} = \frac{1}{\delta_1^2} \left[\mu_0(1+k+\mu_0) \frac{E_1}{E_0} - \mu_0(1+k+\mu_0) \frac{1}{\delta_2^2} \right] \left\{ e^{\zeta_i} \left[\left(\frac{A_1^*}{\Delta} \right) \text{Cos} \zeta_i + \left(\frac{B_1^*}{\Delta} \right) \text{Sin} \zeta_i \right] + \dots \right. \\ \left. \dots + e^{-\zeta_i} \left[\left(\frac{A_2^*}{\Delta^*} \right) \text{Cos} \zeta_i - \left(\frac{B_2^*}{\Delta^*} \right) \text{Sin} \zeta_i \right] \right\}, \quad (10)$$

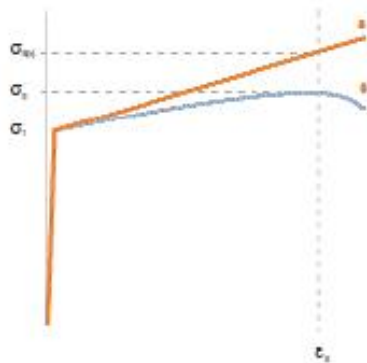


РИСУНОК 4. Диаграммы «напряжение-деформация» при простом растяжении: **а** – Netto-напряжение; **б** – брутто-напряжение; **ε_д** – деформация при максимальной нагрузке;

σ_н – предел текучести (МПа); **σ_б** – граничное сопротивление разрыву (МПа); **σ_{нп}** – временное сопротивление разрыву нетто (МПа)



где A_i^* , B_i^* — постоянные интегрирования;

$$\Delta^* = \left[\frac{\mu_0(1+k+\mu_0)}{2E_0} - \frac{\mu_1(1+k+\mu_0)}{2E_1} \frac{\delta_2}{\delta_1} \right] \sigma_{\infty}; \quad (11)$$

μ_0 — коэффициент Пуассона основного металла ($i=0$) и шва ($i=1$);

$\zeta_i = \pi \cdot \frac{x}{\delta_i}$ — безразмерная локальная координата сварного шва;

$$\delta_i^* = \frac{\delta_i}{\delta_0}$$

Для стенки трубы (представляющей длинную балку на жестком основании) решение имеет вид:

$$\frac{\sigma_{\infty}}{\sigma_0} = \left[\mu_0(1+k+\mu_0) - \mu_1(1+k+\mu_0) \frac{\delta_2 E_2}{\delta_1 E_1} \right] \dots \dots e^{-\zeta_i} \left[\left(\frac{C_2^*}{\Delta^*} \right) \cos \zeta_i + \left(\frac{D_2^*}{\Delta^*} \right) \sin \zeta_i \right], \quad (12)$$

где C_2^* , D_2^* — постоянные интегрирования;

$\zeta_i = \frac{\delta_2}{\delta_0} (\zeta_i - \zeta_0)$ — безразмерная локальная координата основного металла;

$\zeta_0 = k_i \frac{\delta_1}{\delta_0} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{b_1}{\delta_0}$ — безразмерная полуширина сварного шва.

Постоянные интегрирования для упругого сварного соединения ($\mu_0 = \mu_1 = \mu$ и $E_0 = E_1 = E$) определяются в результате решения системы линейных уравнений, получаемых из условия равновесия и условия сшивания по границе шва и трубы в соответствии с уравнением (4) и **РИСУНОК 2**.

Численные оценки напряжений показали, что узкий сварной шов подвергается большему по величине и равномерно распределенному по ширине шва поперечному (вертикальному) сжатию со стороны основного металла. При относительной полуширине шва $\zeta_0 \leq 0,1\pi$ поперечное напряжение неизменно по ширине шва.

Поперечные напряжения в основном металле возникают при наличии усиления сварного шва, носят растягивающий характер и быстро убывают по мере удаления от сварного шва. В окрестности швов с относительной толщиной $\delta_1^* = 1,2-2,0$ (т. е. с усилением) и шириной $\zeta_0 \geq 0,3\pi$ область действия поперечного напряжения простирается в основной металл на расстояние $\zeta_0 = 1,2-1,5$.

Потенциальную возможность перехода сварного соединения в состояние пластического (при равенстве пределов текучести шва и основного металла) течения оценивали по отношению продольного нагружающего напряжения к эквивалентному напряжению. На **РИСУНОК 3** приведены соответствующие распределения для шва и основного металла. Можно видеть, что в узких сварных швах с относительной шириной $b_1/\delta_0 \leq 0,2$ состояние течения возникает при продольном напряжении σ_{∞} на $(1+3)\%$ ниже предела текучести основного металла σ_0 . Пластическое течение начинается по всей ширине сварного шва (**график 1, 2 РИСУНОК 3а**). Сварные швы с большей относительной шириной $b_1/\delta_0 = 1,8-2,0$ вступают в состояние течения участками шириной до 50% от ширины шва, прилегающими к границе с основным металлом, при продольном напряжении σ_{∞} на $(0-2)\%$ ниже предела текучести основного металла σ_0 (**график 6, 7 РИСУНОК 3а**).

Основной металл рядом со сварным швом оказывается «упрочненным» на $(1+3)\%$ по сравнению с пределом текучести основного металла σ_0 (**график 1-7 РИСУНОК 3а**). Эффект «упрочнения» отодвигает пластическую зону от сварного шва на расстояние толщиной основного металла.

Таким образом, при наличии усиления участки сварного шва, прилегающие к основному металлу, подвержены более раннему вступлению в состояние пластического течения. Усиление сварного шва

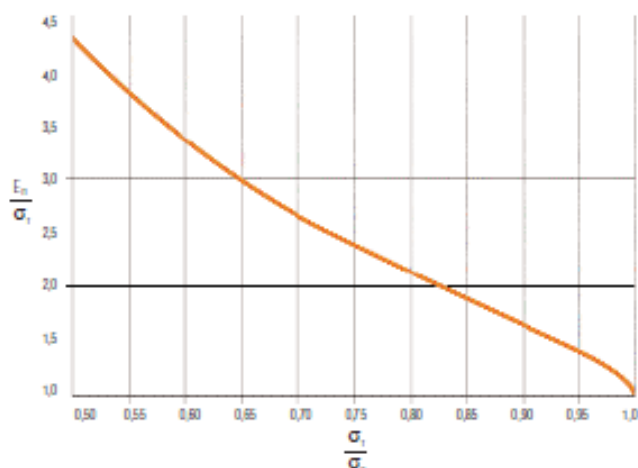


РИСУНОК 3. Зависимость модуля пластического упрочнения от отношения предела текучести к временному сопротивлению

подкрепляет примыкающий к шву основной металл и задерживает начало его пластического течения.

В реальных сварных стыках пределы текучести наплавленного и основного металла совпадают очень редко. Как правило, они различаются минимум на (5-7)%, даже когда их временные сопротивления одинаковы. Поэтому экспериментально подтвердить эффект упругого «упрочнения/разупрочнения» по моменту начала пластического течения не удастся. Тем не менее, обнаруженный эффект важен в методическом смысле, поскольку из него следует необходимость подбора сварочных материалов, гарантирующих превышение предела текучести наплавленного металла над пределом текучести основного металла.

Для оценки упругопластического поведения сварного соединения рассмотрим параметры пластического упрочнения. Исследования [3, 4] показывают, что для малоуглеродистых низколегированных сталей в пластической стадии нагружения характерна линейная зависимость между истинными напряжениями и деформациями:

$$\sigma_{\text{ин}} = \sigma_z + E_p \epsilon_p, \tag{13}$$

где $\sigma_{\text{ин}}$, ϵ_p — эквивалентное напряжение (МПа) и деформация;

E_p — модуль пластического упрочнения металла (МПа), определяемый по результатам испытания на разрыв (РИСУНОК 4).

Модуль пластического упрочнения может быть оценен по диаграмме РИСУНКА 3 либо по формулам (14) и (15):

$$E_p \approx \left(2 \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{\sigma_z}{\sigma_2}} \right] \right)^{1,6} \tag{14}$$

$$E_p = \frac{\sigma_z}{1 - \epsilon_p}. \tag{15}$$

УПРУГИЙ ШОВ — ПЛАСТИЧЕСКИЙ ОСНОВНОЙ МЕТАЛЛ. Для случая простого растяжения ($k = -\mu$), когда $\sigma_z = \sigma_1 = 0$, будем полагать, что на момент начала пластического течения основного металла продольное напряжение в нем было равно пределу текучести основного металла, а продольное напряжение в шве задается выражением:

$$\sigma_{\text{осн}} = \frac{\delta_1}{\delta_2} \sigma_{\text{ш}} = \frac{\sigma_{\text{ш}}}{\delta_1^2}. \tag{16}$$

Формулы для поперечных напряжений имеют вид:

$$\sigma_{\text{ш}} = 0, \tag{17}$$

$$\frac{\sigma_{\text{ш}}}{\sigma_{\text{осн}} - \sigma_{\text{осн0}}} = \mu_{\text{ш}} \cdot e^{-\epsilon_z} \cos \epsilon_z - \sin \epsilon_z, \tag{18}$$

где $\mu_{\text{ш}}$ — коэффициент Пуассона основного металла на стадии пластического деформирования, равный 0,5.

Расчеты показывают: концентрация пластических деформаций происходит в основном металле, а потенциальное место вязкого разрушения удалено от сварного шва не менее чем на $\delta_1/4$, что согласуется с экспериментальными данными по растяжению сварных соединений с прочным швом.

ПЛАСТИЧЕСКИЙ ШОВ — УПРУГИЙ ОСНОВНОЙ МЕТАЛЛ.

Для случая плоской деформации ($k = 0$), когда $\sigma_z = 0$, $\sigma_1 = \mu \sigma_2$, на момент начала пластического течения сварного шва продольное напряжение в нем (при $\mu = 0,3$) было равно:

$$\sigma_{\text{осн0}} = 1,125 \cdot \sigma_{\text{ш}}. \tag{19}$$

Соответственно, начальное продольное напряжение в основном металле:

$$\sigma_{\text{осн}} = 1,125 \cdot \delta_1^2 \cdot \sigma_{\text{ш}}. \tag{20}$$

Начальные значения поперечных напряжений во всех случаях естественно принять равными $\sigma_{\text{ш0}} = \sigma_{\text{осн0}} = 0$.

При дальнейшем увеличении напряжений основной металл остается упругим, а металл шва вступает в состояние пластического течения. Можно показать, что величина модуля пластического упрочнения составляет $E_p \approx (1 - 2,25) \cdot \sigma_z$ и для применяемых сварочных материалов не превышает 1% модуля упругости E . Дополнительные напряжения описываются формулами:

$$\frac{\sigma_{\text{ш}}}{\sigma_{\text{осн}} - \sigma_{\text{осн0}}} = -\frac{\mu_{\text{ш}} (1 + \mu_{\text{ш}})}{\delta_1^2} \left\{ e^{\epsilon_z} \left[\left(\frac{A_1^2}{\Delta^2} \right) \cos \epsilon_z + \left(\frac{B_1^2}{\Delta^2} \right) \sin \epsilon_z \right] + \dots \right. \tag{21}$$

$$\left. \dots + e^{-\epsilon_z} \left[\left(\frac{A_2^2}{\Delta^2} \right) \cos \epsilon_z - \left(\frac{B_2^2}{\Delta^2} \right) \sin \epsilon_z \right] \right\},$$

$$\frac{\sigma_{\text{ш}}}{\sigma_{\text{осн}} - \sigma_{\text{осн0}}} = -\mu_{\text{ш}} (1 + \mu_{\text{ш}}) \frac{E_p}{E_{\text{ш}}} e^{-\epsilon_z} \left[\left(\frac{C_1^2}{\Delta^2} \right) \cos \epsilon_z + \left(\frac{D_1^2}{\Delta^2} \right) \sin \epsilon_z \right], \tag{22}$$

где $E_{\text{ш}}$ — модуль пластического упрочнения металла шва (МПа);

$E_p = E \cdot 2 \cdot 10^4$ МПа — модуль упругого упрочнения основного металла;

$\mu_{\text{ш}}$ — коэффициент Пуассона металла шва, равный 0,5;

$\mu_z = \mu = 0,3$ — коэффициент Пуассона основного металла.

Расчеты показывают, что на границе с основным металлом в сварном шве шириной $\zeta_s \leq \pi$ возникает поперечное растягивающее напряжение, равное 0,5 от приложенного дополнительного (сверх предела текучести сварного шва) осевого напряжения. Поперечное напряжение снижается при смещении от границы к центру сварного шва. Для сварных швов шириной $\zeta_s > 0,7\pi$ поперечное напряжение в центре шва близко к нулю. Для сварных швов, ширина которых находится в интервале $0,3\pi < \zeta_s < 0,5\pi$, поперечное напряжение в центре шва составляет 0,2-0,43 дополнительного осевого напряжения.

Заслуживает внимания тот факт, что пластическое деформирование «мягкого» шва вызывает поперечное сжатие слоев основного металла, прилегающих к границе. Чем шире сварной шов, тем больше абсолютная величина сжимающего напряжения. При ширине сварного шва $0,3\pi < \zeta_s < \pi$ сжимающее напряжение составляет 1,1–1,5 от дополнительного осевого напряжения.

Эквивалентное напряжение в центре «мягкого» сварного шва растет до (1,5–3,0)% медленнее, чем осевое растягивающее напряжение.

Эквивалентное напряжение в основном металле на границе с «мягким» швом увеличивается на (10–15)% быстрее, чем осевое напряжение и эквивалентное напряжение в середине шва, создавая предпосылки для более раннего перехода основного металла в состояние пластического течения.

Таким образом, для сварных швов с относительной шириной менее толщины основного металла ($\zeta_s < 0,5\pi$) создаются условия торможения пластических деформаций во всем объеме сварного шва, что приводит к повышению разрушающего напряжения по отношению к временному сопротивлению наплавленного металла. Упрочняющий эффект тем больше, чем уже «мягкий» сварной шов.

Будем оценивать максимальное брутто-напряжение в центре «мягкого» шва при плоской деформации и начальных напряжениях, соответствующих моменту вступления металла шва в состояние пластического течения. Связь между брутто- и нетто-напряжением в условиях пластического течения определим с учетом несжимаемости материала в состоянии пластического течения:

$$\sigma = \sigma_{0y} \cdot \exp(-\varepsilon_x) = \sigma_{0y} \cdot \exp(\varepsilon_x + \varepsilon_y), \quad (23)$$

где ε_x — продольная деформация образца;

σ — брутто-напряжение (МПа);

σ_{0y} — нетто-напряжение (МПа).

Ограничимся рассмотрением компонента нормальных напряжений:

$$|\sigma_{0y}| = \sigma_{0y} \cdot \{\alpha_x; \alpha_y; \alpha_z\}, \quad (24)$$

$$|\sigma_{0x}| = \sigma_{0x} \cdot \{\beta_x; \beta_y; \beta_z\}, \quad (25)$$

где σ_{0y} — начальное напряжение (МПа). В данном случае это напряжение в направлении x в момент вступления металла шва в состояние пластического течения;

σ_{0x} — дополнительное напряжение (МПа). В данном случае это приращение напряжения в направлении x , начиная с момента вступления металла шва в состояние пластического течения;

α_x, β_x — коэффициенты начальных и дополнительных напряжений соответственно. Для рассматриваемого случая $\alpha_x = \beta_x = 1; \alpha_y = 0; \alpha_z = 0,5; \beta_x = (\beta_x + \beta_y) : 2; \beta_y$ — определится с использованием формулы (22).

Полные напряжения равны сумме начальных и дополнительных:

$$|\sigma_{0y}| = |\sigma_{0y}| + |\sigma_{0x}|, \quad (26)$$

где $|\sigma_{0y}|$ — компоненты полных нетто-напряжений.

Полагая справедливым обобщенный закон Гука для дополнительных напряжений и деформаций в материале с линейным пластическим упрочнением, определим поле деформаций:

$$\{\varepsilon_{0y}\} = \varepsilon_{0y} \cdot \{\gamma_x; \gamma_y; \gamma_z\}, \quad (27)$$

$$\{\varepsilon_{0x}\} = \varepsilon_{0x} \cdot \{\theta_x; \theta_y; \theta_z\}, \quad (28)$$

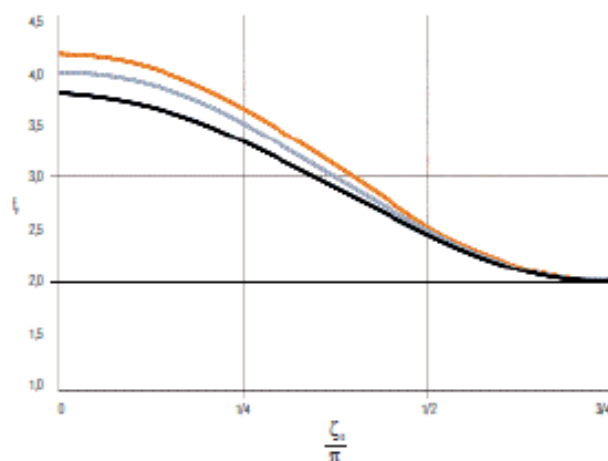


РИСУНОК 6. Зависимость коэффициента упрочнения от относительной ширины и отношения предела текучести к временному сопротивлению разрыву «мягкого» шва: график 1 — $\alpha_x/\alpha_y = 0,7$; график 2 — $\alpha_x/\alpha_y = 0,5$; график 3 — $\alpha_x/\alpha_y = 0,3$

где ε_{0y} — начальная деформация. В данном случае это деформация в направлении x в момент вступления металла шва в состояние пластического течения; ε_{0x} — дополнительная деформация. В данном случае это деформация в направлении x , начиная с момента вступления металла шва в состояние пластического течения;

γ_x, θ_x — коэффициенты начальных и дополнительных деформаций соответственно. Для рассматриваемого случая $\gamma_x = \theta_x = 1; \gamma_y = -1; \theta_y = -(\theta_x + \theta_z); \theta_z$ — определится с использованием формулы (22) и обобщенного закона Гука.

Полные деформации равны сумме начальных и дополнительных:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{0y}\} + \{\varepsilon_{0x}\}, \quad (29)$$

где $\{\varepsilon\}$ — компоненты полных нетто-напряжений.

Уравнение для оценки эквивалентного напряжения, соответствующего максимальному брутто-напряжению в середине «мягкого» сварного шва при плоской деформации, имеет вид:

$$\psi \cdot (G^2 - \sqrt{D} \cdot G + \eta) + \varphi \cdot \sqrt{\eta + G^2} = 0, \quad (30)$$

$$\text{где } G = \frac{\sigma_{0y(\max)}}{E_{0y}}, \quad (31)$$

$\sigma_{0y(\max)}$ — эквивалентное напряжение, соответствующее максимальному брутто-напряжению в середине «мягкого» сварного шва при плоской деформации (МПа);

E_{0y} — модуль пластического упрочнения металла шва (МПа).

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{A}}, \quad (32)$$

$$\varphi = -\frac{\alpha_x}{E_{0y}} \cdot \frac{B-1}{2A}, \quad (33)$$

$$\eta = \frac{1}{4A} \cdot \left[B \frac{\sigma_x}{E_{0y}} \right]^2 - C \cdot \left[\frac{\sigma_x}{E_{0y}} \right], \quad (34)$$

$$A = \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=x,y,z} (\beta_j - \beta_x) (\alpha_j - \alpha_x), \quad (35)$$

$$B = \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=x,y,z} (\beta_j - \beta_x) (\alpha_j - \alpha_x), \quad (36)$$

$$C = \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=x,y,z} (\alpha_j - \alpha_x), \quad (37)$$

$$D = \frac{1}{2 \cdot (1 + \mu_n)^2} \cdot \sum_{\theta_1, \theta_2} (\theta_1 - \theta_2) \quad (38)$$

Первое приближение нелинейного уравнения (30) имеет вид:

$$\frac{\sigma_{s(0.5s)}}{E_n} \approx 1 - \frac{\varphi}{\psi} \cdot \frac{(\eta + 1) + \sqrt{\eta + 1} \cdot (\eta + 1 - \sqrt{D})}{\varphi + \sqrt{\eta + 1} \cdot (2 - \sqrt{D})} \quad (39)$$

По сравнению с напряженно-деформированным состоянием при испытании на разрыв стандартных образцов из однородного материала состояние плоской деформации характеризуется, по крайней мере, еще одним дополнительным растягивающим напряжением, перпендикулярным направлению основного усилия. Это дополнительное напряжение создает более стесненные условия для удлинения материала в направлении действия основного усилия, в результате чего для достижения одного и того же удлинения однородного материала при плоско-деформированном напряженном состоянии придется прикладывать большее усилие, чем при простом растяжении. Согласно критерию Мизеса, переход материала из упругого состояния в пластическое происходит при плоской деформации при значении основного растягивающего напряжения, равном 1,125 от значения предела текучести материала. Если материал обладает достаточным запасом пластичности, то, как показывают расчеты в соответствии с критерием устойчивости процесса пластического формирования, отраженным в предшествующих соотношениях, максимум нагрузки при общей пластичности в плоско-деформированном состоянии должен достигаться при брутто-напряжении, примерно в 1,4 превосходящем временное сопротивление разрыву. Материалы, относительное сужение которых, определенное при испытании на простое растяжение, не превышает $0,45 \div 0,55$, условно можно отнести к малопластичным, поскольку их деформационная способность недостаточна для обеспечения условия равенства нулю первой производной брутто-напряжения при плоской деформации. Они разрушаются при меньших нагрузках.

Таким образом, конструкционный фактор, выражающийся в наличии плоско-деформированного состояния, сам по себе обеспечивает условия для упрочнения однородного материала. Понятно, что, если не учитывать этот фактор и сравнивать максимальное сопротивление неоднородного материала, в частности, сварного соединения, в составе конструкции с характеристиками его отдельных компонентов при простом растяжении, можно впасть в ошибку, относя на граничные эффекты между швом и основным металлом слишком большое «упрочнение», получаемое от плоской деформации. В связи с этим, приводимые ниже данные о коэффициентах упрочнения шва относятся к максимальному сопротивлению шва и характеристикам однородного материала шва или основного металла для плоской деформации.

Под коэффициентом упрочнения в этом случае будем понимать отношение максимального брутто-напряжения в середине шва к максимальному

брутто-напряжению того же материала в пластическом состоянии при отсутствии влияния эффекта границы:

$$f_r = \frac{\sigma_{sm}}{\sigma_{s(0.5s)}} \quad (40)$$

где σ_{sm} — максимальное брутто-напряжение в середине «мягкого» шва (МПа);

$\sigma_{s(0.5s)}$ — максимальное брутто-напряжение того же металла при плоской деформации (МПа).

Результаты расчетов приведены на РИСУНКЕ 11. Данные численных расчетов хорошо воспроизводятся следующей функцией:

$$f_r = 1 + 1,312 \cdot \left(1 - \frac{\tau}{\sigma_s}\right)^{0,75} \cdot \left[1 + \text{Cos} \left(\frac{4}{3} \zeta_s\right)\right] \quad (41)$$

Анализ этих данных обнаруживает сильную зависимость максимального сопротивления материала в центре шва от ширины шва и более слабую — от отношения предела текучести к временному сопротивлению. Косинусоидальный множитель определяет уровень максимального упрочнения и наибольшую ширину, при которой граничный эффект упругих границ достигает середины «мягкого» шва. Степенной множитель выражает влияние отношения предела текучести к временному сопротивлению. Это влияние ограничено 10%.

Полученные зависимости свидетельствуют об утере влияния упругих границ на центр «мягкого» шва при значении безразмерной полуширины шва $\zeta_s = 3\pi/4$. Когда $\zeta_s < \pi/4$, коэффициент упрочнения достигает максимальных значений около 3. Двойной запас прочности имеет место при безразмерной полуширине $\zeta_s = \pi/8$. При $\zeta_s = \pi/2$ коэффициент упрочнения составляет не менее 1,4.

РЕАЛИЗУЕМЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ УПРОЧНЕНИЯ. Автор не известен случай, когда бы сварные швы трубопроводов выполнялись материалами с прочностью менее 70% прочности основного металла, т. е. при отношении предела текучести основного металла к пределу текучести металла шва, называемом коэффициентом механической неоднородности, более $f_m = 1,4$.

Выше указывалось, что эквивалентное напряжение в основном металле σ_{m0} на границе с «мягким» сварным швом растет быстрее, чем осевое напряжение σ_{s0} . В результате этого реализуемый коэффициент упрочнения $f_p = \sigma_{sm} / 1,125\sigma_n$ намного меньше, чем описываемый формулой (41). Можно показать справедливость следующих формул:

$$f_p \cdot f_m \approx \frac{f_m - 1}{1 + m \cdot \text{Sin}(\zeta_s)} + 1 \text{ при } \zeta_s < \frac{\pi}{2} \quad (42)$$

$$f_p \cdot f_m \approx \frac{1}{2} \left[1 + \frac{f_m - 1}{1 + m}\right] \cdot \left[1 + \text{Cos} \left(4 \left[\zeta_s - \frac{\pi}{2}\right]\right)\right] \text{ при } \frac{\pi}{2} \leq \zeta_s \leq \frac{3}{4}\pi, \quad (43)$$

где $f_m = \delta_1 / \delta_2$ — коэффициент геометрической неоднородности стыкового шва;

m — коэффициент, равный 2,7 для $E_m / E_s = 0,01; 2,15$ для $E_m / E_s = 0,05$.

Анализ полученных зависимостей показывает, что, какой бы ни была ширина «мягкого» шва, произведение коэффициентов реализуемого упрочнения и геометрической неоднородности не превышает коэффициента механической неоднородности. Следовательно, прочность «мягкого» шва (по пределу

текучести) не превышает прочности основного металла. Иными словами: сопротивляемость пластическому деформированию «мягкого» шва в составе конструкции выше, чем «мягкого» металла при простом растяжении, но ниже прочности основного металла. Большая сопротивляемость шва достигается при меньшей его ширине.

ВЫВОДЫ:

1. При реализации условия равнопрочности сварного соединения основному металлу часто оставляют без внимания фактор статистического разброса реальных свойств, благодаря которому, в случае пересечения интервалов разброса прочности основного и наплавленного металла, в составе трубопровода появляются «мягкие» швы. В связи с этим формально соответствующие требованиям сварные стыки фактически неравнопрочны основному металлу и нуждаются в дополнительной оценке несущей способности.
2. Проведенное исследование показало, что при упругом деформировании усиление сварного шва приводит к возникновению поперечных напряжений: отрицательных — в сварном шве и положительных — в основном металле. Чем шире сварной шов, тем меньше абсолютная величина поперечного напряжения. Растягивающее поперечное напряжение основного металла увеличивается с увеличением относительной ширины сварного шва до 0,75. Пла-

стическое течение сварного шва наступает прежде, чем продольное напряжение сравняется с пределом текучести. Чтобы избежать вовлечения в пластическую деформацию сварного шва, предел текучести наплавленного металла должен быть выше предела текучести основного металла как минимум на 4%.

3. Твердый сварной шов препятствует поперечной деформации основного металла. Место потенциального разрушения расположено в основном металле на удалении от границы шва, равном четверти толщины основного металла.

4. Мягкий сварной шов первым вступает в состояние пластического течения. До момента вступления основного металла в пластическую деформацию сопротивление сварного шва выше сопротивления наплавленного металла при простом растяжении (эффект контактного упрочнения). Получены аналитические выражения, позволяющие с инженерной точностью оценить прочность «мягкого» шва в этом случае. Показано, что прочность мягкого шва в составе конструкции превосходит прочность наплавленного металла при простом растяжении, однако не превышает прочность основного металла.

[1] ISO/DIS 16708 Нефтегазовая промышленность // Транспортировка по трубопроводам. Методы предельного состояния, ориентированные на надежность / Проект международного стандарта, ISO Copyright Office, 2004.

[2] Кузнецов В.И. Упругое основание. Расчеты балок, плит и рам. М.: Государственное издательство по строительству и архитектуре, 1952.

[3] Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическим деформаци-

ям. М.: Машиностроение, 1978.

[4] Диксон У., Меллер П. Теория пластичности для инженеров. М.: Машиностроение, 1979.

15-17
НОЯБРЯ

РОСТОВ-НА-ДОНУ
КВЦ «ВЕРТОЛЕТСКОГО»



Организатор: ВЦ «Вертолет»



Три площадки:
Академия энергетического транспорта Трансэнерго Роснефтегаз и ЮКО
Академия промышленности и энергетики Ростехнадзора
Академия энергетического машиностроения Губительского Филиала
Одесского федерального округа «Югэнерго» Югэнерго
Национального университета Украины «Львівський Політехнік»
Тернопільський національний технічний університет

ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ ЮГА РОССИИ
форум-выставка

- НЕФТЕГАЗ - НЕФТЕХИМИЯ - АВТОЗАПРАВочный КОМПЛЕКС
- ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА - ТРАДИЦИОННЫЕ ВИДЫ И ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ - АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА
- ОТОПЛЕНИЕ - ВЕНТИЛЯЦИЯ - КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ
- ЭНЕРГОРЕСУРСООБЪЕДИНЕНИЕ
- ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ, ПРИСОУДУИ УЧЕТА И КОНТРОЛЯ, СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ
- ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ - СРЕДСТВА БЕЗОПАСНОСТИ И ПРОТИВОПОЖАРНАЯ ТЕХНИКА
- ТРАНСПОРТНАЯ ТЕХНИКА И УСТРОЙСТВА
- СИСТЕМЫ СВЯЗИ ДЛЯ ТЭК
- БАНКИ, СТРАХОВЫЕ КОМПАНИИ

СОНОВНИЦА:
ЭКОНОМИКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ
И ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СЕКТОРА

Ростов-на-Дону, пр. М. Никитина, 30, тел. (863) 237 25 66, 292 40 55, email: netlegaz@vertoexpo.ru, exhibition@vertoexpo.ru, www.vertoexpo.ru