



ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФЕКТА НА ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С НЕСИММЕТРИЧНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ*

А. А. ОСТСЕМИН, д-р техн. наук (Южно-Уральский научно-производственный центр, г. Челябинск, РФ)

На основе метода решения плоской задачи теории пластичности выполнена расчетная оценка статической прочности с несимметричной механической неоднородностью сварных соединений с поверхностным трещиноподобным дефектом. Исследовано напряженное состояние механически неоднородных стыковых соединений с поверхностным дефектом. Предложенная методика оценки статической прочности сварных соединений с несимметричной механической неоднородностью позволит определить несущую способность путем введения в расчетные формулы коэффициентов механической неоднородности.

Ключевые слова: дуговая сварка, стыковые соединения, относительная толщина, мягкая прослойка, поверхностная трещина, предельное растягивающее усилие, контактное упрочнение, несимметричная механическая неоднородность, касательные напряжения на линии сплавления шва, коэффициенты механической неоднородности

Сварные соединения с несимметричной механической неоднородностью распределения прочностных свойств часто встречаются на практике [1–5]. В соединениях из низколегированных сталей магистральных трубопроводов по обе стороны металла ЗТВ (участков мягкой прослойки) располагается участок с наибольшей прочностью (сварной шов) и менее прочный (основной металл) [1]. Мягкая прослойка хорошо определяется за мерами твердости.

В работе [4] показано, что на прочность сварных соединений при статическом нагружении оказывает влияние вид механической неоднородности. В сварных соединениях с несимметричной механической неоднородностью контактное упрочнение может реально проявляться как при статическом, так и циклическом нагружениях [5].

В сварном продольном стыке магистрального трубопровода сварной шов является самым прочным (СТ), основной металл имеет меньшую прочность (Т); между ними находится мягкая прослойка (М) [6]. Такой характер несимметричной механической неоднородности влияет в целом на свойства сварного соединения труб большого диаметра [7].

Существующие методы расчета на прочность таких соединений основаны на теории, что мягкая прослойка, ослабляющая сварной стык, окружена более прочным металлом с одинаковыми механическими свойствами [8, 9].

На основании экспериментальных исследований механических характеристик для сварных соединений с несимметричной механической неоднородностью (рис. 1) проводится расчет [3] по усредненному значению степени механической неоднородности сварных соединений

$$K_{в\text{ ср}} = \frac{K_{в1} + K_{в2}}{2},$$

где $K_{в1} = \sigma_{в}^{СТ} / \sigma_{в}^М$, $K_{в2} = \sigma_{в}^Т / \sigma_{в}^М$, $\sigma_{в}^{СТ}$, $\sigma_{в}^Т$, $\sigma_{в}^М$ — пределы прочности сварного шва, основного металла и металла ЗТВ.

При этом особенности совместного пластического деформирования более прочных (СТ и Т) и менее прочного (М) металлов рассматриваемых соединений не учитываются. При статических испытаниях сварных образцов на растяжение их разрушение при наличии пластической деформации, как правило, происходит по месту минимальной твердости металла ЗТВ, который характеризуется развитой структурной, химической и механической неоднородностью. При строительно-монтажных работах возникают различные отклонения от заданной технологии, появляются такие поверхностные дефекты, как несплавления, подрезы, трещины, кратеры, а также дефекты, обнаруженные в металле ЗТВ (надрезы, риски, трещины, царапины, задиры), на трубопроводах. Актуальной задачей является изучение влияния поверхностного плоскостного дефекта в металле ЗТВ труб, где пластичность (относительное удлинение δ и сужение ψ) достигает минимального значения.

Влияние поверхностного дефекта, расположенного в металле ЗТВ, на статическую прочность при симметричной механической неоднородности приведено в работе [10]. При этом установлено, что основным видом разрушения труб большого диаметра являются поверхностные трещины, расположенные рядом с линией сплавления сварного

* Работа поддержана грантом РФФИ 05.08.18179а.

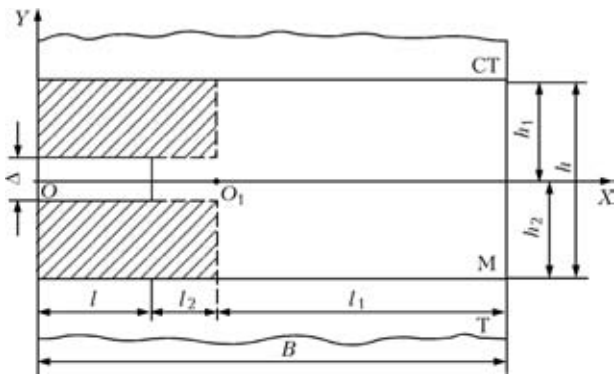


Рис. 1. Параметры мягкой прослойки с несимметричной механической неоднородностью и поверхностным трещиноподобным дефектом сварного шва (обозначения см. в тексте)

шва. В очаге разрушения обнаружены трещиноподобные дефекты в виде трещин, рисок, механических царапин. Все случаи разрушения стенок труб происходили при средних рабочих давлениях в металле ЗТВ вблизи концентраторов напряжений, поэтому теоретический анализ влияния поверхностных трещиноподобных дефектов в металле ЗТВ сварного шва на статическую прочность магистральных, промышленных трубопроводов при вязком разрушении имеет большое значение. Важное практическое значение имеет также оценка технологии сварки, эксплуатационной надежности сварных соединений труб при наличии поверхностных дефектов и разработка рекомендаций по определению степени опасности трещиноподобных дефектов.

Для получения более точного теоретического решения предлагается расчетная методика, основанная на закономерностях механического поведения влияния поверхностных дефектов соединений с несимметричной неоднородностью сварного шва. В данной работе, наряду с обычными предположениями и упрощающими условиями, которые принимаются при теоретическом изучении механически неоднородных соединений [10, 11], используется предположение [12], которое согласуется с теорией пластического слоя [13] и обобщает известное допущение Л. Прандтля — касательные напряжения τ_{xy} в мягкой прослойке зависят от расстояния от плоскости, на которой $\tau_{xy} = 0$ (рис. 1). Метод исследования основан на теоретическом решении плоской задачи теории пластичности [12, 14].

Целью данной работы является определение влияния поверхностного трещиноподобного дефекта на статическую прочность сварных соединений с несимметричной механической неоднородностью при вязком разрушении. Особенностью характера пластической деформации сварных соединений с трещиноподобным дефектом является наличие точки ветвления пластического течения мягкой прослойки O_1 (рис. 1). В зоне между свободным краем прослойки, содержащим де-

фект, и точкой O_1 , над и под дефектом (заштрихованная область) считается, что пластическое течение отсутствует, что согласуется с результатами работы [15].

В работе [16] на основе теоретического анализа напряженного состояния механически неоднородного сварного соединения в окрестности контактной поверхности получена зависимость параметра α от K_B , которая при малой механической неоднородности соединения ($K_B < 1,5$) с высокой точностью может быть представлена выражением $\alpha = K_B - 1$.

На контактной поверхности касательные напряжения $\tau_{xy}^{кон}$ не достигают предела текучести на сдвиг K_M вследствие вовлечения в пластическую деформацию основного металла и шва, поэтому для больших значений x , т. е. для точек, удаленных от оси OY (плоскости раздела течения) и находящихся вблизи контактной поверхности, граничные условия будут следующими [14]:

$$\tau_{xy}^{K_1} = \tau_{xy}(x_1 h_1) = \alpha_1 K \quad (0 < \alpha_1 \leq 1), \quad (1)$$

$$\tau_{xy}^{K_2} = \tau_{xy}(x_1 - h_2) = \alpha_2 K \quad (0 < \alpha_2 \leq 1), \quad (2)$$

где $\tau_{xy}^{K_1}$, $\tau_{xy}^{K_2}$ — соответственно касательные напряжения на поверхности контакта СТ–М и М–Т; h_1 , h_2 — соответственно расстояния от плоскости, на которой касательные напряжения равны нулю, до контактной поверхности СТ–М и М–Т ($h_1 + h_2 = h$, h — толщина мягкой прослойки); α_1 , α_2 — коэффициенты, характеризующие механическую неоднородность и зависимость соответственно от K_{B1} и K_{B2} .

Решение для касательного напряжения определяем в следующем виде [11]:

$$\tau_{xy}(x, y) = \varphi(x)y, \quad (3)$$

где $\varphi(x)$ — нечетная функция, требующая определения.

Зная параметры α_1 и α_2 , можно найти h_1 и h_2 [14]. Для этого в равенство (3) поочередно вводим $y = h_1$ и $y = -h_2$ и сравниваем полученные выражения с граничными условиями (1) и (2). Тогда $\alpha_1 h_2 = \alpha_2 h_1$, откуда

$$h_1 = \frac{\alpha_1 h}{\alpha_1 + \alpha_2}, \quad h_2 = \frac{\alpha_2 h}{\alpha_1 + \alpha_2}. \quad (4)$$

Положение нейтральной линии в прослойке (где $\tau_{xy} = 0$) не совпадает с геометрической осью симметрии и смещено в сторону менее прочного (Т) основного металла, что подтверждается экспериментальными исследованиями [5]. Сдерживание пластических деформаций мягкой прослойки тем больше, чем меньше относительная тол-



щина χ прослойки и чем прочнее окружающий ее металл. Если мягкую прослойку окружают металлы с различной прочностью (Т и СТ), то сдерживание пластических деформаций мягкого металла будет проявляться в большей мере на контакте с более прочным металлом (СТ). Поэтому участок ЗТВ, прилегающий к металлу с большей прочностью (СТ), становится более прочным и разрушение переносится в сторону металла с меньшей прочностью (Т).

Решая приближенно систему уравнений пластического равновесия при условии пластичности Губера–Мизеса с помощью результатов работы [12], получаем

$$\sigma_{x,i} = K_M \left\{ -0,5 \ln \operatorname{ch} \frac{2(\alpha_1 + \alpha_2) [x - (l + l_2)]}{h_i} + \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)^2}{h_i^2} y^2 + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2\chi} - 0,5 \ln 2 - \frac{1}{3}(\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2) \right\}, \quad (5)$$

$$\sigma_{y,i} = K_M \left\{ -0,5 \ln \operatorname{ch} \frac{2(\alpha_1 + \alpha_2) [x - (l + l_2)]}{h_i} + \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)^2}{h_i^2} \frac{y^2}{\operatorname{ch}^2 \left[\frac{2(\alpha_1 + \alpha_2)}{h_i} \chi \right]} + 2 - 0,5 \ln 2 + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2\chi} - \frac{1}{3}(\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2) \right\}, \quad (6)$$

$$\tau_{xy,i} = K_M \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{h_i} y \operatorname{th} \frac{2(\alpha_1 + \alpha_2) [x - (l + l_2)]}{h_i}, \quad (7)$$

где $-h_1 < y < h_2$, $i = 1, 2$.

Если $l + l_2 < x < B$ (l — длина трещиноподобного дефекта, l_2 — зона пластического слоя, B — ширина сварного соединения), то в формулах (5)–(7) следует принять $h_i = h_1$. В этом случае формулы (5)–(7) определяют компоненты тензора напряжений в мягкой прослойке справа от точки ветвления O_1 . Для зоны пластического слоя l_2 , расположенной между вершиной дефекта и точкой O_1 , т. е. $l < x < l + l_2$, принимаем $h_1 = h_2$. Координаты точки ветвления O_1 получим, если приравнять значения напряжений σ_x слева и справа от этой точки: $l_1/h_1 = l_2/h_2$. Далее приходим к системе уравнений относительно l_1 и l_2 (см. рис. 1):

$$l_1 + l_2 = B - l, \quad l_1 = \frac{h(B-l)}{h+\Delta},$$

или

$$l_1 \Delta = h_2 h, \quad l_2 = \frac{\Delta(B-l)}{h+\Delta}, \quad (8)$$

где h — толщина сварного соединения; Δ — ширина дефекта.

Для сварных соединений с непроваром $\Delta \leq 0,1$ мм согласно уравнению (8) смещение точки ветвления пластического течения l_2 от вершины дефекта мало по сравнению с шириной образца B . Можно считать, что точка ветвления O_1 находится на вершине непровара и снижение напряжений σ_y от их максимального значения σ_y^{\max} до предела текучести металла ЗТВ на свободной поверхности дефекта происходит скачком на малой базе $l_2 \rightarrow 0$. Такое допущение позволяет существенно упростить расчет средних предельных напряжений для сварных соединений с поверхностным дефектом в металле ЗТВ.

Используя условие статической эквивалентности суммарных напряжений σ_y внешнему усилию P и проинтегрировав их, найдем среднее предельное напряжение $\sigma_{y, \text{ср}}$. Затем получим суммарное усилие

$$P = P_1 + P_2, \quad P_1 = \int_{l+l_2}^{\beta} \sigma_y(x, h_1) dx, \quad P_2 = \int_l^{l+l_2} \sigma_y(x, h_2) dx.$$

Вычислив интегралы, получим

$$P_i = K_M l_i \left[-\frac{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + 0,2}{\alpha_1 + \alpha_2} \chi^{**} + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{4\chi^{**}} + 2 - \frac{1}{3}(\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2) \right], \quad (9)$$

где $\chi^{**} = \frac{2(h+\Delta)}{B-l}$.

С учетом формул (5)–(9) вычислим среднее напряжение для несимметричной механической

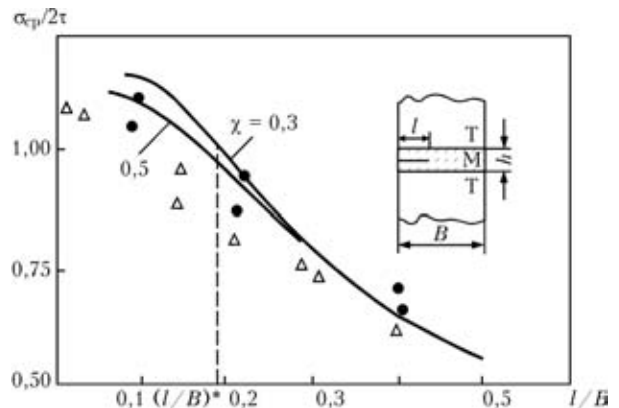


Рис. 2. Сравнение теоретических (сплошные кривые) по формуле (13) при $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$ и экспериментальных данных по прочности сварных соединений при $\chi = 0,3$ (●) и $0,5$ (Δ) [17] и $K_B = 1,33$; $(l/B)^* = 0,19$



неоднородности сварного соединения с поверхностным трещиноподобным дефектом длиной l , используя представления функций th и \ln , ch в виде степенных рядов, игнорируя малые члены, с точностью 1...2 %:

$$\sigma_{y, \text{cp}}^{K, i} = K_M \left(1 - \frac{l}{B} \right) \left[- \frac{\alpha_i^2 + 0,2}{(\alpha_1 + \alpha_2)} \chi^* + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{4\chi^*} + 2 - \frac{1}{3}(\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2) \right]. \quad (10)$$

Для трещин при $\Delta = 0$ получаем $\chi^* = \frac{\chi}{1 - l/B}$.

С учетом замены K_M на $\sigma_B^M/\sqrt{3}$ формула (10) для поверхностных трещин принимает вид

$$\sigma_{y, \text{cp}}^{K, i} = \frac{\sigma_B^M}{\sqrt{3}} \left\{ \left[\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{8\chi} \left(1 - \frac{l}{B} \right)^2 - \left[1 - \frac{\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2}{6} \right] \times \left(1 - \frac{l}{B} \right) - \frac{\alpha_i^2 + 0,2}{2(\alpha_1 + \alpha_2)} \chi \right] \right\}, \quad (11)$$

где $\chi^* = \frac{h + \Delta}{B - l}$; $\chi = \frac{h}{B}$.

Следует отметить, что при отсутствии дефекта в формуле (11) $l = \Delta = 0$, получим формулы, приведенные в работе [14]. Из формулы (11) определяем допустимый диапазон относительных критических размеров трещин, для которых сварное соединение равнопрочно основному металлу без дефекта при условии $\sigma_{y, \text{cp}} = 2K_M$:

$$\left(\frac{l}{B} \right)^{\text{кр}} = 1 - \frac{2\chi}{\alpha_1 + \alpha_2} \left\{ 1 - \frac{\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2}{6} + \sqrt{\left(1 - \frac{\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2}{6} \right)^2 + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2\chi} + \frac{\alpha_i^2 + 0,2}{4}} \right\}. \quad (12)$$

Для симметричной механической неоднородности при $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$ выражение (12) принимает вид формулы, полученной в работе [10]. С уменьшением коэффициентов механической неоднородности K_{B1} и K_{B2} критическое значение поверхностного дефекта в металле ЗТВ уменьшается.

При условии $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$ формула (11) превращается в зависимость для средних нормальных напряжений $\sigma_{y, \text{cp}}^{K, i}/2K_M$ сварных соединений с симметричной механической неоднородностью с поверхностным дефектом в металле ЗТВ, полученную в работе [10]

$$\sigma_{y, \text{cp}}^{K, M} = 2K_M \left[\frac{\alpha}{2\chi} \left(1 - \frac{l}{B} \right)^2 - \left(1 - \frac{\alpha^2}{6} \right) \left(1 - \frac{l}{B} \right) - \frac{\alpha_i^2 + 0,2}{4\alpha} \chi \right]. \quad (13)$$

На рис. 2 приведена теоретическая зависимость по формуле (13) и экспериментальные значения

[17] для титановых сплавов (сварные соединения размером $100 \times 95 \times 25$ мм, $\sigma_B^T = 875$ МПа, $\sigma_B^M = 600$ МПа, $K_B = 1,33$, $\alpha = 0,33$ при $\chi = 0,3$ и $\chi = 0,5$). Наружный односторонний поверхностный дефект имитировали острыми надрезами. С уменьшением относительной толщины мягкой прослойки χ от 0,5 до 0,3 средние нормальные напряжения $\sigma_{y, \text{cp}}^{K, i}$ увеличиваются за счет контактного упрочнения мягкой прослойки. Получено хорошее соответствие новых теоретических результатов и экспериментальных исследований [17].

Новые теоретические формулы можно использовать для оценки прямошовных труб большого диаметра с поверхностным дефектом, расположенным в металле ЗТВ при коэффициенте механической неоднородности $K_B = 1,1 - 1,2$. Для этого в формулах [18] необходимо заменить временное сопротивление металла труб σ_B на средние напряжения $\sigma_{y, \text{cp}}$ по формуле (11).

Приравняв $\sigma_{y, \text{cp}}$ по формуле (11) значению $\sigma_{\text{cp}} = 2K_T(1 - l/B)$ прочности сварного шва с поверхностным дефектом l/B , определим χ_p с учетом контактного упрочнения сварного соединения, при которой прочность сварного соединения СТ-М-Т равна прочности основного металла:

$$\chi_{p, i} = \left\{ - \left[\sqrt{3} K_{B, i} + \left(1 - \frac{\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2}{6} \right) \left(1 - \frac{l}{B} \right) \right] + \sqrt{\left[\sqrt{3} K_{B, i} + \left(1 - \frac{\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2}{6} \right) \left(1 - \frac{l}{B} \right) + (\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + 0,2) \left(1 - \frac{l}{B} \right)^2 \right]} \right\} \times \frac{2(\alpha_1 + \alpha_2)}{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + 0,2}. \quad (14)$$

По формуле (14) при $K_B = 1,33$ ($l/B = 0$) получаем $\chi_p = 0,18$, что хорошо соответствует теоретическим результатам ($\chi_p = 0,181$) [7] и экспериментальным данным [17].

Исходя из обеспечения несущей способности сварных соединений труб большого диаметра с несимметричной механической неоднородностью на уровне прочности основного металла установлены оптимальные диапазоны размеров ЗТВ. Диапазон относительных размеров мягких прослоек, при которых прочность сварного соединения СТ-М-Т равна прочности основного металла, довольно узок ($\chi_p = 0,15 \dots 0,17$), т. е. максимальный размер ЗТВ при толщине трубы 22 мм равен 3,74 мм, что не отвечает размерам разупрочненных участков труб большого диаметра ($\chi_p = 0,3 \dots 0,5$) [1] из-за широкого сварного шва, высокой погонной энергии сварки q/v и применяемого сварочного оборудования.

Если участки СТ, Т и М сварного соединения склонны к упрочнению, то для определения средних разрушающих напряжений σ_{cp} в формулах



(10) и (11) необходимо заменить K_M на $(\beta\sigma_B^M)/2$, где β — параметр, характеризующий неустойчивость процесса пластического деформирования сварного соединения (для идеального упругопластического тела $\beta = 2/\sqrt{3}$). Проведенный теоретический анализ показывает, что с уменьшением погонной энергии сварки q/v снижается степень разупрочнения K_B и ширина разупрочненного участка χ , поэтому прочность сварного соединения $\sigma_{y,ср}$ повышается за счет контактного упрочнения и при некоторых режимах и технологиях сварки может быть достигнута равнопрочность сварного соединения с несимметричной механической неоднородностью при вязком разрушении основному металлу.

Данные результаты могут быть использованы при экспертизе аварий [18, 19], внутритрубной диагностике магистральных трубопроводов, экспертной оценке сварного шва для повышения эксплуатационной надежности магистральных газо-, нефтепроводов.

Выводы

1. Получены формулы для вычисления тензора напряжений, предельных растягивающих усилий и средних разрушающих напряжений с несимметричной механической неоднородностью сварных соединений с поверхностным трещиноподобным дефектом, которые являются обобщениями соответствующих формул для симметричных сварных соединений и хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

2. Предложенная методика оценки статической прочности сварных соединений с несимметричной механической неоднородностью позволит определить несущую способность путем введения в расчетные соотношения коэффициентов механической неоднородности K_{B1} и K_{B2} .

3. Участком предполагаемого разрушения прямых труб большого диаметра при превышении предельного давления является линия, расположенная в ЗТВ рядом с линией сплавления сварного шва.

1. Анучкин М. П., Горицкий В. Н., Мирошниченко Б. И. Трубы для магистральных трубопроводов. — М.: Недра, 1986. — 231 с.
2. Дуговая сварка неповоротных стыков магистральных трубопроводов / И. К. Походня, М. З. Шейкин, В. Н. Шлепаков и др. — М.: Недра, 1987. — 190 с.

3. Астафьев А. С., Навоев В. С. Сварка термически упрочненной низколегированной стали // Свароч. пр-во. — 1965. — № 3. — С. 1–4.
4. Оценка прочности сварных соединений из термоупрочненных сталей / О. А. Бакши, Б. П. Пиксаев, Т. В. Кульневич и др. // Вопр. свароч. пр-ва. — 1968. — № 63. — С. 84–93.
5. Клыков Н. А., Решетов А. Л. Прочность сварных соединений с несимметричной механической неоднородностью // Автомат. сварка. — 1979. — № 12. — С. 29–32.
6. Остсемин А. А., Шахматов М. В., Ерофеев В. В. Влияние дефектов сварки, расположенных на границе сплавления, на прочность сварного стыка труб большого диаметра // Пробл. прочности. — 1984. — № 8. — С. 111–116.
7. Остсемин А. А., Дильман В. Л. Оценка влияния механической неоднородности на прочность термоупрочненных труб большого диаметра и пластин с дефектами в сварных швах // Вест. машиностроения. — 2004. — № 9. — С. 23–28.
8. Остсемин А. А. Прочность и напряженное состояние мягкой прослойки в тонкостенном цилиндрическом сосуде при двухосном нагружении // Автомат. сварка. — 1994. — № 5/6. — С. 18–20.
9. Бакши О. А. Об учете фактора механической неоднородности сварных соединений при испытании на растяжение // Свароч. пр-во. — 1985. — № 7. — С. 32–34.
10. Остсемин А. А., Дильман В. Л. Статическая прочность механически неоднородных сварных соединений с односторонним поверхностным дефектом при вязком разрушении // Хим. и нефт. машиностроение. — 2005. — № 10. — С. 9–12.
11. Дильман В. Л., Остсемин А. А. Напряженное состояние и прочность сварных швов труб большого диаметра // Там же. — 1998. — № 4. — С. 16–20.
12. Остсемин А. А., Дильман В. Л. О сжатии пластического слоя двумя шероховатыми плитами // Пробл. прочности. — 1990. — № 7. — С. 107–112.
13. Теорияковки и штамповки / Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров и др. — М.: Машиностроение, 1992. — 720 с.
14. Дильман В. Л., Остсемин А. А. Напряженное состояние и прочность сварных соединений с механической неоднородностью // Свароч. пр-во. — 1998. — № 5. — С. 15–17.
15. Дильман В. Л., Остсемин А. А. Прочность механически неоднородных сварных соединений с щелевидным дефектом // Там же. — 1999. — № 2. — С. 12–15.
16. Дильман В. Л., Остсемин А. А., Воронин А. А. Несущая способность прямошовных труб большого диаметра с дефектами на границе сплавления сварного шва // Там же. — 2002. — № 3. — С. 3–7.
17. Шахматов М. В. Несущая способность сварных соединений с дефектом в твердых и мягких швах // Автомат. сварка. — 1988. — № 6. — С. 14–17.
18. Остсемин А. А., Заварухин В. Ю. Прочность нефтепровода с поверхностными дефектами // Пробл. прочности. — 1993. — № 12. — С. 51–59.
19. Остсемин А. А. Анализ несущей способности действующего магистрального нефтепровода при наличии дефектов в продольном шве // Свароч. пр-во. — 1998. — № 9. — С. 11–15.

A design evaluation of static strength with non-axisymmetric mechanical non-uniformity of welded joints with a surface cracklike defect is performed based on the method of solving a plane problem of the theory of plasticity. Stressed state of mechanically non-uniform butt joints with a surface defect was studied. The proposed procedure for evaluation of static strength of welded joints with non-symmetrical mechanical non-uniformity will allow determination of the load carrying capacity by introducing the mechanical non-uniformity coefficients into the calculation formulas.

Поступила в редакцию 13.04.2006