621.791(043)
Б 744

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
Челябинский политехнический институт им.Ленинского комсомола

На правах рукописи

Аспирант Богомолова А.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ИХ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ В УСЛОВИЯХ ДВУХОСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ

Специальность 167 -
"Машины и технология сварочного производства"

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

621.791.05

Челябинск-1969

ЧПИ

Читальный зал
«Профессорский»

Уважаемый товарищ!

Челябинский политехнический институт направляет Вам для ознакомления автореферат аспиранта Богомоловой А.С.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Совета механико-технологического факультета по присуждению ученых степеней или прислать отзыв на автореферат в двух экземплярах.

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте на кафедре оборудования и технологии сварочного производства.

Научный руководитель работы -
доктор технических наук, профессор Бакши О.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Куркин С.А. и старший научный сотрудник, кандидат технических наук Шрон Р.З.

Ведущее предприятие - УралНИТИ

Автореферат разослан 15 мая 1969 г.

Защита диссертации состоится 18 июня 1969 г. на заседании Совета по присуждению ученых степеней при механико-технологическом факультете Челябинского политехнического института.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Наш адрес: г.Челябинск-44, пр.им.В.И.Ленина,76, ЧПИ, Совет по присуждению ученых степеней при механико-технологическом факультете.

Ученый секретарь Совета -
доцент, к.т.н. /Катков Н.П./

ЭОХ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР
Челябинский политехнический институт им.Ленинского
комсомола

На правах рукописи

Аспирант Богомолова А.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ИХ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ В УСЛОВИЯХ ДВУХОСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ

Специальность 167 -
"Машины и технология сварочного производства"
05.03.06

Автореферат диссертации на
соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинский
Политехнический институт
БИБЛИОТЕКА
Инв. № 675458

Челябинск-1969

Уважаемый товарищ!

Челябинский политехнический институт направляет Вам для ознакомления автореферат аспиранта Богомоловой А.С.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Совета механико-технологического факультета по присуждению ученых степеней или прислать отзыв на автореферат в двух экземплярах.

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте на кафедре оборудования и технологии сварочного производства.

Научный руководитель работы -
доктор технических наук, профессор Бакши О.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Куркин С.А. и старший научный сотрудник, кандидат технических наук Шрон Р.З.

Ведущее предприятие - УралНИТИ

Автореферат разослан 15 мая 1969 г.

Защита диссертации состоится 18 июня 1969 г. на заседании Совета по присуждению ученых степеней при механико-технологическом факультете Челябинского политехнического института.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Наш адрес: г.Челябинск-44, пр.им.В.И.Ленина, 76, ЧПИ, Совет по присуждению ученых степеней при механико-технологическом факультете.

Ученый секретарь Совета -
доцент, к.т.н.
/Катков Н.П./

Развитие химической, нефтеперерабатывающей, газовой, авиационной и ряда других отраслей промышленности, в которых широко используются сварные листовые конструкции, работающие в условиях двухосного растяжения, требует решения таких вопросов, как снижение веса конструкций, обеспечение их надежности и долговечности, повышение технологических параметров тонкостенных аппаратов (давление, температура и т.п.). Это, в свою очередь, вызывает необходимость создания новых высокопрочных материалов, разработки и всестороннего теоретического и экспериментального обоснования методов расчета на прочность, а также совершенствования технологии изготовления сварных листовых конструкций.

Решение этих задач связано с разработкой методов расчета сварных соединений, учитывающих как особенности работы металлов в условиях двухосного растяжения, так и особенности поведения сварных соединений по сравнению с основным металлом в указанных условиях. Опыт производства сварных конструкций показывает, что практически всем сварным соединениям свойственна механическая неоднородность. Трудами многих ученых доказано, что механическая неоднородность сварных соединений оказывает существенное влияние на их работоспособность и что сознательное регулирование неоднородности на основе расчетных методов создает новые возможности для отыскания оптимальных конструктивных и технологических решений. Разработаны методы расчета прочностных характеристик сварных соединений в условиях статического и динамического растяжений (сжатия), изгиба, кручения и других видов нагружения с учетом влияния фактора механической неоднородности.

Что касается расчетных методов оценки прочности сварных соединений в условиях двухосного растяжения, учитывающих влияние фактора механической неоднородности, а также особенности поведения металла и сварных соединений в указанных условиях, то этот вопрос пока мало изучен. Не изучен также вопрос о влиянии наличия второго контура в поперечном сечении сосудов (труб) не только в условиях двухосного, но и в условиях одноосного растяжения, т.к. указанные выше решения

выполнены применительно к элементам, обладающим одним контуром. Решение этого вопроса имеет большое самостоятельное значение в связи с тем, что трубчатые элементы находят все более широкое применение в сварных строительных и машиностроительных конструкциях в качестве стержней, работающих в условиях осевого растяжения (сжатия).

Основной целью настоящей работы являлось исследование особенностей поведения сварных соединений в условиях двухосного растяжения с учетом влияния фактора механической неоднородности и разработка расчетных методов оценки работоспособности соединений в указанных условиях.

Работа состояла из следующих этапов:

1. Теоретический анализ напряженного состояния и возможного характера разрушений сварных соединений с мягкой прослойкой в условиях одноосного (прослойка с двухсвязным контуром) и двухосного растяжения для следующих вариантов:

а) Труба с поперечной мягкой прослойкой под действием осевой растягивающей силы.

б) Тонкостенный цилиндрический сосуд с продольной мягкой прослойкой под действием внутреннего давления.

в) Тонкостенный цилиндрический сосуд с поперечной мягкой прослойкой под действием внутреннего давления и осевой растягивающей силы при различных соотношениях главных напряжений.

г) Сферический сосуд с экваториальной мягкой прослойкой под действием внутреннего давления.

2. Экспериментальная проверка полученных теоретических решений.

3. Разработка практических рекомендаций по конструированию и технологии изготовления сварных листовых конструкций, работающих в условиях двухосного растяжения.

Работа состоит из четырех глав. Кроме выводов по каждой главе, в конце работы приводятся общие выводы и практические рекомендации.

Первая глава диссертации содержит обзор литературы, касающийся причин возникновения механической неоднородности сварных соединений и ее влияния на их работоспособность при различных видах нагружения. Здесь же рассматриваются существующие методы испытаний материалов и сварных соединений на двухосное растяжение, а также особенности поведения металлов при указанном виде нагружения. Излагается цель и основные этапы исследования.

В работах О.А.Бакши, Н.О.Окерблома, Р.З.Шрона и др. показано, что характер и степень механической неоднородности сварных соединений зависят от химического состава основного металла, его исходного состояния, конструктивных форм соединения, способа и режимов сварки, состава присадочного металла, наличия последующей термической обработки, ее вида и т.д. Механическая неоднородность оказывает существенное влияние на работоспособность сварных соединений при различных видах нагружения. Наибольшее влияние оказывают так называемые мягкие прослойки, имеющие наименьшие по сравнению с соседними участками прочностные характеристики. При этом работоспособность сварных соединений в значительной мере определяется относительной толщиной мягкой прослойки. В зависимости от механических свойств металла прослойки и ее относительной толщины разрушение может носить вязкий или хрупкий характер, причем, с уменьшением относительной толщины прослойки прочность соединений увеличивается при том и другом характерах разрушения.

А.Д.Томленов, Я.Б.Фридман, С.А.Куркин, Д.А. Corrigan, R.E. Travis и др. показали, что поведение металла и сварных соединений при двухосном растяжении значительно отличается от их поведения при одноосном растяжении. Так, при двухосном растяжении повышается устойчивость процесса пластической деформации, но, вместе с тем, уменьшается деформационная способность и увеличивается склонность к хрупкому разрушению, особенно высокопрочных сталей. Повышается чувствитель-

ность последних к концентраторам напряжений. Что касается влияния фактора механической неоднородности на работоспособность сварных соединений в условиях двухосного растяжения, то он сказывается более существенно, чем при одноосном растяжении. При этом в литературе имеются весьма противоречивые мнения по вопросу о влиянии объемного напряженного состояния в мягкой прослойке на ее поведение в условиях двухосного растяжения. Одни полагают, что в мягкой прослойке в условиях двухосного растяжения действует эффект контактного упрочнения, другие полагают, что нет.

В т о р а я г л а в а диссертации посвящена теоретическому анализу напряженного состояния поперечной мягкой прослойки в цилиндрической трубе при осевом растяжении. Рассматриваемый случай представляет собой задачу осесимметричной деформации, но здесь прослойка, в отличие от случая сплошного стержня, рассмотренного в работах Л.М.Качанова, О.А.Бакши, Р.З.Шрона, обладает двумя контурами - наружным и внутренним. Решение выполнено методами теории малых упруго-пластических деформаций. Использованы следующие основные условия и допущения. Соединение состоит из двух изотропных материалов (основного металла и металла прослойки), обладающих одинаковыми упругими константами. Основной металл и металл мягкой прослойки идеально упруго-пластичны, но первый обладает существенно более высоким пределом текучести по сравнению со вторым. Относительная толщина прослойки $\varkappa = \frac{2h}{b-a} << 1$ (здесь $2h$ - толщина прослойки, b и a соответственно наружный и внутренний радиусы трубы). Собственные (остаточные) напряжения в соединении отсутствуют. В решении используется условие пластичности Р.Мизеса и гипотеза плоских сечений. Применяется цилиндрическая система координат r, z, φ.

При малых осевых растягивающих напряжениях все соединение работает упруго и находится в однородном линейном напряженном состоянии. При достижении средними осевыми напряже-

ниями величины предела текучести металла мягкой прослойки при осевом растяжении σ_T^M прослойка сразу и целиком переходит в пластическое состояние. Однако развитие пластических деформаций сдерживается соседними более прочными участками основного металла, которые продолжают работать упруго. В результате на контактных поверхностях возникают и с ростом нагрузки растут касательные напряжения τ_{rz}. Напряженное состояние прослойки становится трехосным и неоднородным. В соответствии с решением А.А.Ильюшина для случая сжатия пластического тонкого кольца между шероховатыми плитами, принимается, что независимо от соотношения между внутренним и наружным диаметрами прослойки максимальные осевые напряжения всегда действуют в волокнах, расположенных на срединной поверхности радиусом $r_м = \frac{a+b}{2}$.

Теоретически изучено напряженное состояние тонких мягких прослоек во всем их объеме и на всех стадиях нагружения. Напряженное состояние прослойки описывается следующими формулами:

$$\sigma_z = \sigma_T^M \left\{ \frac{1}{\sqrt{3}\varkappa(1-\gamma)} \left(\frac{1-\gamma}{c_*} - \frac{\sqrt{1+c^2(\rho-\gamma)^2}}{c} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{\sqrt{1+c^2(\rho-\gamma)^2}} + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{c_*} \arcsin c_* - \frac{c_*}{c(1-\gamma)} \right] \right\}. \qquad (1)$$

$$\sigma_z^{max} = \sigma_T^M \left\{ \frac{1}{\sqrt{3}\varkappa(1-\gamma)} \left(\frac{1-\gamma}{c_*} - \frac{1}{c} \right) + 1 + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{c_*} \arcsin c_* - \frac{c_*}{c(1-\gamma)} \right] \right\}. \qquad (2)$$

$$\sigma_z = \sigma_\gamma = \sigma_z = \sqrt{3} \cdot \sqrt{\kappa^2 - \tau_{rz}^2}, \qquad (3)$$

$$\tau_{zz} = \pm \kappa \frac{c(\rho - \gamma)}{\sqrt{1 + c^2(\rho - \gamma)^2}} \cdot \frac{\zeta}{\varkappa(1-\gamma)} \qquad (4)$$

В приведенных формулах:

σ_T^M – предел текучести материала прослойки при осевом растяжении,

$\kappa = \frac{\sigma_T^M}{\sqrt{3}}$ – предел текучести металла прослойки при чистом сдвиге,

$\gamma = \frac{a+b}{2b}$ – геометрическая характеристика трубы,

$\rho = \frac{z}{b}$ и $\zeta = \frac{z}{b}$ – безразмерные текущие координаты,

$$c_* = \frac{c - \gamma}{\sqrt{1 + c^2(1-\gamma)^2}},$$

c – безразмерный параметр, определяемый из условия статической эквивалентности, которое записывается в виде:

$$\frac{p}{\sigma_T^M} = \frac{1}{\sqrt{3}\varkappa c_*} - \frac{2}{3\sqrt{3}\varkappa(1-\gamma)(1-\gamma^2)}\left[\frac{(1-\gamma)^3}{c_*^3} - \frac{1}{c^3}\right] -$$

$$- \frac{\gamma}{\sqrt{3}\varkappa(1-\gamma)(1-\gamma^2)}\left\{\frac{(1-\gamma)^2}{c_*} + \frac{1}{c^2}\left[\ln(1-\gamma)(1+\frac{1}{c_*}) - \ln\frac{1}{c}\right]\right\} +$$

$$+ \frac{2}{c}\left(\frac{1-\gamma}{c_*} - \frac{1}{c}\right) \cdot \frac{1}{1-\gamma^2} + \frac{2\gamma}{c(1-\gamma^2)}\left[\ln(1-\gamma)(1+\frac{1}{c_*}) -\right.$$

$$\left. - \ln\frac{1}{c}\right] + \frac{1}{2}\left[\frac{1}{c_*}\operatorname{arcsin} c_* - \frac{c_*}{c(1-\gamma)}\right], \qquad (5)$$

где $p = \frac{P}{\pi(a^2 - a^2)}$ – средние осевые напряжения.

Нагрузка может увеличиваться до тех пор, пока на всей площади контактных поверхностей касательные напряжения не достигнут своего предельного значения – предела текучести на сдвиг κ. В этот момент начинается проскальзывание металла прослойки по контактным поверхностям, что отвечает началу ее вязкого разрушения. Значения средних и максимальных осевых напряжений, отвечающих предельному состоянию, соответственно равны:

$$p_{\infty} = \sigma_T^{M} \left[\frac{\pi}{4} + \frac{1+2\gamma}{3\sqrt{3}\,\varkappa(1+\gamma)} \right], \qquad (6)$$

$$\sigma_{\infty}^{max} = \sigma_T^{M} \left[\frac{\pi}{4} + 1 + \frac{1}{\sqrt{3}\,\varkappa} \right]. \qquad (7)$$

Анализ результатов решения показал, что в частях прослойки, расположенных вблизи срединной поверхности трубы, имеется область с жестким напряженным состоянием, приближающимся к равномерному всестороннему растяжению. Установлено, что, чем меньше относительная толщина прослойки $\varkappa$ и чем больше геометрическая характеристика трубы γ, тем более высокий уровень средних и максимальных напряжений требуется для достижения предельно-вязкого состояния. При этом, если до достижения предельно-вязкого состояния максимальные напряжения достигнут уровня сопротивления отрыву металла мягкой прослойки R_{σ}^{M}, происходит хрупкое разрушение. Уровень средних напряжений, отвечающих вязкому (или хрупкому) разрушению увеличивается с увеличением γ и уменьшением $\varkappa$. В случае хрупкого разрушения эта зависимость сказывается тем в большей степени, чем выше отношение $\frac{R_{\sigma}}{\sigma_T^{M}}$. В случае кольцевой мягкой прослойки с двухсвязным контуром развивается более жесткое напряженное состояние, чем в случае элементов компактного сечения и менее жесткое, чем в случае пластины. Степень контактного упрочнения, характеризуемая величиной $K_{\varkappa} = \frac{p_{\infty}}{\sigma_T^{M}}$, в рассматриваемом случае выше, чем при осесимметричной деформации элементов компактного сечения и ниже, чем при плоской деформации. Область действия эффекта контактного упрочнения в случае трубы определяется условием:

$$0 < \varkappa \leq \varkappa_{кр} \cong 0{,}9\,\frac{1+2\gamma}{1+\gamma} \qquad (8)$$

В т р е т ь е й г л а в е рассматриваются некоторые наиболее характерные для практики случаи работы сварных

соединений в условиях двухосного растяжения, а именно: тонкостенный цилиндрический сосуд (труба) с продольной мягкой прослойкой под действием внутреннего давления, цилиндрический тонкостенный сосуд с поперечной мягкой прослойкой под действием внутреннего давления и осевой растягивающей силы с различным соотношением главных напряжений, а также шаровой тонкостенный резервуар под действием внутреннего давления.

Для теоретического анализа напряженного состояния мягкой прослойки в указанных случаях используются приведенные ранее основные условия и допущения аналогичные случаю осевого растяжения трубы. Кроме того, принимается, что толщина стенок сосудов значительно меньше внутреннего диаметра. Радиальные напряжения в упругой области принимаются равными нулю, а тангенциальные и осевые напряжения принимаются равномерно распределенными в соответствующих сечениях. В стадии пластического деформирования указанное допущение распространяется только на основной металл.

П р о д о л ь н а я мягкая прослойка в тонкостенном цилиндрическом сосуде, работающем под действием внутреннего давления, в упругой области находится, как и основной металл, в условиях плоского напряженно-деформированного состояния.

При достижении условия $\sigma_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T^M$ прослойка переходит в пластическое состояние. Развитие пластических деформаций в прослойке сдерживается прилежащим к ней основным металлом. На контактных поверхностях возникают касательные напряжения. Задача перестает быть осесимметричной. Основной металл по-прежнему находится в условиях плоского напряженно-деформированного состояния. Напряженное состояние прослойки становится трехосным и неоднородным при сохранении плоской деформации, т.е. напряженно-деформированное состояние прослойки становится аналогичным таковому в случае одноосного растяжения пластины с поперечной мягкой прослойкой. Поэтому напряженное состояние продольной мягкой прослойки в тонко-

стенном цилиндрическом сосуде (трубе), работающем под действием внутреннего давления, может быть описано формулами, полученными в решении Л.М.Качанова для случая плоской деформации тонкой пластичной прослойки и приведенными О.А.Бакши к виду, аналогичному случаю осесимметричной деформации элементов компактного сечения. При этом для анализа напряженного состояния мягкой прослойки используется вспомогательная прямоугольная система координат x, y, z с центром, расположенным в центре поперечного сечения прослойки. Напряжения $\sigma_z, \sigma_y, \sigma_x, \tau_{xy}$ в новых координатах обозначаются соответственно $\sigma_z, \sigma_y, \sigma_x, \tau_{xy}$.

При определении коэффициента контактного упрочнения k_x и области действия эффекта контактного упрочнения учитывается то обстоятельство, что в случае тонкостенного сосуда имеет место плоская деформация не только прослойки, а всего соединения. Формула для определения средних тангенциальных напряжений в предельном состоянии записывается следующим образом:

$$\rho_x^y = \sigma_T^M \cdot k_H \cdot k_x , \qquad (9)$$

где

$$k_H = \frac{2}{\sqrt{3}} , \qquad (10)$$

$$k_x = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{4x} . \qquad (11)$$

Критическое значение x, при котором (с уменьшением x) начинает действовать эффект контактного упрочнения определяется из условия $\rho_x^y = \sigma_T^M \frac{2}{\sqrt{3}}$ и равно

$$x_{kp} = \frac{1}{4\left(1 - \frac{\pi}{4}\right)} \approx 1{,}17 . \qquad (12)$$

Таким образом, коэффициент контактного упрочнения продольной мягкой прослойки в тонкостенном цилиндрическом сосуде, работающем под действием внутреннего давления, меньше, а область контактного упрочнения уже, чем в случае плоской деформации прослойки в пластине при осевом растяжении.

Поперечная тонкая мягкая прослойка в тонкостенном цилиндрическом сосуде, работающем под действием только внутреннего давления, когда продольные деформации из условия несжимаемости материала равны нулю, деформируется вплоть до разрушения одинаково с основным металлом. При этом контактное упрочнение прослойки отсутствует, а прочность сосуда определяется прочностными и деформационными характеристиками основного металла.

Поперечная мягкая прослойка в тонкостенном цилиндрическом сосуде, работающим под действием внутреннего давления и осевой растягивающей силы, в упругой стадии деформирования находится в напряженно-деформированном состоянии, аналогичном таковому в основном металле. При достижении условия $\sigma_i = \sigma_T^M$ (σ_i - интенсивность напряжений) прослойка переходит в пластическое состояние. Сдерживание пластических деформаций на контактных поверхностях приводит к появлению на них касательных напряжений τ_{zz} . Напряженное состояние прослойки, как и в случае одноосного растяжения, становится трехосным и неоднородным. Гипотеза плоских сечений и условие неразрывности смещений на контактной поверхности приводят к равенству на ней радиальных и тангенциальных напряжений в пластической области деформирования независимо от исходного напряженного состояния, т.е. от отношения $n = \frac{\sigma_z}{\sigma_\varphi}$ в основном металле. Показано, что напряженное состояние поперечной мягкой прослойки в тонкостенном цилиндрическом сосуде, работающем в условиях двухосного напряженного состояния, описывается формулами (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7). Величины p_* и σ_*^{max} в формулах (6),(7)

следует при этом заменить соответственно величинами ρ_*^z и $\sigma_*^{z\,max}$.

Экваториальная прослойка в тонкостенном сферическом ресервуаре работает аналогично поперечной прослойке в цилиндрическом ресервуаре при $n = 1$. Поэтому сказанное выше в равной мере относится и к этому случаю.

Анализ возможных мест и характера разрушений тонкостенных сосудов показывает, что в случае двухосного растяжения одна величина ρ_*^z или ρ_*^y еще не определяет характера и места разрушения тонкостенного сосуда. Направление магистральной трещины, а также место разрушения (прослойка или основной металл) существенно зависят от напряженно-деформированного состояния основного металла, определяемого величиной n, от положения прослойки относительно оси сосуда и ряда других факторов. Необходимо учитывать более высокую устойчивость пластической деформации основного металла, способствующую концентрации деформаций главным образом в прослойке. В условиях двухосного растяжения вид разрушения сварного соединения с прослойкой в значительной мере определяется анизотропией механических свойств основного металла (особенно при n, близких к 1).

В реальных конструкциях металлы, входящие в соединение, подвержены деформационному упрочнению (наклепу). Следовательно, упрочнение прослойки происходит как за счет контактного, так и за счет деформационного упрочнения (наклепа), для реализации которых необходимы определенные условия. Влияние таких факторов, как анизотропия и др. пока не может быть учтено количественно, поэтому в качестве первого приближения в диссертации предлагается вести расчет вязкой прочности сварных соединений с учетом только контактного упрочнения и наклепа.

В случае продольной мягкой прослойки в тонкостенном цилиндрическом сосуде (трубе)

$$\sigma_{\text{в}}^{y} = \sigma_{\text{в}}^{M} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sqrt{3}}{4} + \frac{1}{4\alpha} \right), \qquad (13)$$

и в случае поперечной мягкой прослойки в тонкостенном цилиндрическом сосуде под действием внутреннего давления и осевой растягивающей силы или одной растягивающей силы, т.е. при $0,5 < n \leq \infty$

$$\sigma_{в}^{z} = \sigma_{в}^{м} \left[\frac{\pi}{4} + \frac{1+2\gamma}{3\sqrt{3}\,\varkappa(1+\gamma)} \right] \qquad (14)$$

Последняя формула предлагается также для определения вязкой прочности экваториальной мягкой прослойки в тонкостенном шаровом резервуаре под действием внутреннего давления.

Зная величины $\sigma_{в}^{y}$ или $\sigma_{в}^{z}$, а также соотношение главных напряжений в основном металле, можно определить величины напряжений $\sigma_{zт}$ и $\sigma_{yт}$ в основном металле, соответствующие предельному состоянию прослойки, что дает возможность судить о виде и месте разрушения сосуда.

В четвертой главе приводятся методика и результаты экспериментального исследования работоспособности сварных соединений с мягкой прослойкой в условиях одноосного и двухосного растяжений. Целью экспериментальных исследований являлась проверка теоретических положений, выдвинутых в предыдущих главах.

Программа экспериментальных исследований включала:

А. Испытание толстостенных трубчатых образцов (a =6мм; γ =0,71) с высокой степенью механической неоднородности ($k_{в} = \frac{\sigma_{в}^{т}}{\sigma_{в}^{м}}$ =1,53; $k_{s} = \frac{\sigma_{т}^{т}}{\sigma_{т}^{м}}$ =1,93) на одноосное растяжение.

Б. Испытание тонкостенных трубчатых образцов (a =64 мм; γ =0,96) с высокой степенью механической неоднородности ($k_{в}$=1,94; k_{s}=1,86) в различных условиях одноосного и двухосного растяжения ($n=\infty$; n=2; n=1; n =0,75; n =0,5).

В. Испытание тонкостенных трубчатых образцов (a =38 мм; γ =0,94) с малой степенью механической неоднородности ($k_{в}$=1,07) при наличии рядом с прослойкой "подкрепляющих" участков, более прочных, чем основной металл, в различных

условиях одноосного и двухосного растяжения ($n=\infty$; $n=2$; $n=1$; $n=0,5$).

Во всех случаях варьировалась относительная толщина прослойки $\varkappa$. Прослойка из мягкой стали вваривалась контактной сваркой или сваркой трением между заготовками из более твердой стали. В качестве материала мягкой прослойки использованы сталь 20 и сталь 10. В качестве основного материала использованы сталь 45Х, сталь 45 и сталь 20. "Подкрепляющие" участки в образцах группы "В" представляют собой участки упрочненного при сварке основного металла. Образцы этой группы не подвергались термической обработке. Остальные образцы после механической обработки подвергались закалке и отпуску.

Испытания образцов производились на специальной установке, включающей машину ГМС-50, насос, обеспечивающий давление до 2000 атмосфер, и приспособления и приборы для крепления образцов, замера давления и деформаций образцов в процессе нагружения. При испытаниях одновременным действием внутреннего давления и осевой растягивающей силы осуществлялось ступенчатое нагружение, достаточно близкое к простому.

Экспериментальная проверка показала, что как в случае одноосного, так и в случае двухосного ($n=2$; $n=1$; $n=0,75$), растяжения сварных соединений с мягкой прослойкой действует эффект контактного упрочнения. В случаях вязкого разрушения получена удовлетворительная сходимость опытных значений $\sigma_в^z$ с расчетными, определенными по формуле (14), как в случае одноосного так и в случаях двухосного растяжений. Результаты опытов показывают, что как при одноосном, так и при двухосном растяжении возможно достижение (при малых $\varkappa$) равнопрочности сварных соединений основному металлу. Критическая величина, при которой достигается равнопрочность основному металлу, может быть определена из равенства

$$m\sigma_в^т = \sigma_в^м K_\varkappa , \qquad (15)$$

0194733

где $m = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{n} + \frac{1}{n^2}}}$.

Наличие в соединении "подкрепляющих" участков, более прочных, чем основной металл, способствует более полной реализации эффекта контактного упрочнения и переносу разрушения с прослойки на основной металл.

Результаты экспериментов показывают также, что поведение сварных соединений при двухосном растяжении существенно отличается от одноосного. Так, вследствие повышенной устойчивости процесса пластической деформации при двухосном растяжении, несмотря на наличие подкрепляющих участков, затрудняется перенос разрушения на основной металл. Анизотропия свойств основного металла в случае двухосного растяжения (особенно в случае $n = 1$) оказывает влияние как на вид, так и на место разрушения основного металла. Наличие дефектов в прослойке в виде местных ее сужений ведет к увеличению действия эффекта контактного упрочнения и концентрации напряжений в указанных местах. В случае малых α, когда при незначительном уменьшении α резко возрастает величина K_α, в местах концентрации напряжений максимальные напряжения могут достигнуть величины σ_u^z (σ_u^y) или R_σ^M. В этих случаях произойдет местное вязкое или хрупкое разрушение в момент, когда средние напряжения в соседних участках прослойки еще не достигли предельного значения, т.е. когда контактное и деформационное упрочнение прослойки еще не реализовались.

В случае одноосного растяжения появление местных надрывов не оказывает практически влияния на дальнейшую деформацию образца и на величину прочностных характеристик. В случае же двухосного растяжения с использованием внутреннего давления появление местных надрывов ("свищей") приводит к невозможности дальнейшего увеличения давления и практической потере несущей способности соединения.

Результаты экспериментального исследования показали, что в случаях $n = \infty$; $n = 1$ и $n = 2$ эффект контактного упрочнения действует и в области $\alpha > \alpha_{кр}$, что не учиты-

вается формулой для тонких прослоек и идет в запас прочности. Результаты испытаний образцов внутренним давлением показали, что прочность тонкостенных цилиндрических сосудов с поперечной мягкой прослойкой, работающих под действием внутреннего давления, определяется прочностными и деформационными характеристиками основного металла (20 образцов из 21 испытанных разрушились по основному металлу). Вместе с тем, искажение образующей цилиндра в пластической области деформирования основного металла может изменить соотношение в нем главных напряжений и вызвать появление продольных деформаций. В этом случае при больших $\varkappa$ или при наличии дефектов в прослойке возможно разрушение по прослойке поперек образца.

Характер зависимости деформационной способности толстостенных трубчатых образцов, определяемой величинами относительного удлинения (δ) и относительного сужения (ψ) от относительной толщины прослойки $\varkappa$ примерно такой же как в случаях элементов компактного сечения и пластины. Кривая $\delta(\varkappa)$ имеет резко выраженный минимум, наличие которого объясняется следующими обстоятельствами. С уменьшением $\varkappa$ уменьшается база деформации прослойки, а значит и величина δ. Кроме того, сказывается действие контактного эффекта. При некотором значении $\varkappa$ средние осевые напряжения в прослойке становятся равными пределу текучести основного металла и последний вовлекается в пластическую деформацию, что ведет к увеличению δ с уменьшением $\varkappa$ в области

$$\varkappa \leq \varkappa^{s}_{\kappa\beta} = \frac{1+2\gamma}{3\sqrt{3}(1+\gamma)\left(\kappa_{s\delta}-\frac{\pi}{4}\right)}, \qquad (1\text{г})$$

где

$$\kappa_{s\delta} = \frac{\sigma^{T}_{T}}{\sigma^{M}_{\delta}}.$$

Кривая $\psi(\varkappa)$ также имеет минимум, наличие которого связано с тем, что при малых $\varkappa$ основной металл вовлекается в пластическую деформацию, за счет чего напряженное состояние

Челябинский Политехнический институт БИБЛИОТЕКА Инв. № 675458

прослойки несколько смягчается, что способствует некоторому увеличению ψ с уменьшением $\varkappa$. Деформационная способность тонкостенных образцов зависит от величины n, степени механической неоднородности, наличия "подкрепляющих" участков. Эксперименты показали, что характер деформации прослойки как в случае одноосного, так и двухосного ($n=1$, $n=2$) растяжения соответствует схеме, принятой при анализе напряженного состояния.

В главе IУ диссертации приводятся также анализ экспериментальных данных других авторов с позиций теоретических положений, выдвинутых в настоящей работе.

Анализ экспериментальных данных Е.М.Кузмака, А.В.Бакиева, В.А.Щеглова и др., показывает, что в случае испытаний сварных плоских образцов с диаметральной мягкой прослойкой методом гидростатического выпучивания также действует эффект контактного упрочнения. Данные опытов А.В.Бакиева удовлетворительно совпадают с расчетными значениями, определенными по формуле, полученной в настоящей работе для случая экваториальной мягкой прослойки в тонкостенном сферическом сосуде, работающем под действием внутреннего давления.

Результаты экспериментов, проведенных УралНИТИ, ЧПИ, ЧТПЗ, а также результаты экспериментов Л.И.Гладштейна и А.Б.Злочевского согласуются с положениями, выдвинутыми в главе Ш, относительно работоспособности тонкостенных цилиндрических прослоек с продольными мягкими прослойками и подтверждают возможность использования в этом случае формулы (13).

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. На основе анализа напряженного состояния мягкой прослойки в сварном соединении в условиях одноосного (элементы с двухсвязным контуром) и двухосного растяжения получены формулы, описывающие напряженное состояние прослойки во всем объеме и на всех стадиях нагружения, включая предельно-вязкое или хрупкое состояние; разработаны методы расчетного

827479

определения вязкой и хрупкой прочности мягкой прослойки для следующих вариантов конструкций и видов нагружения:

а) труба с поперечной мягкой прослойкой под действием осевой растягивающей силы;

б) тонкостенный цилиндрический сосуд с поперечной мягкой прослойкой под действием внутреннего давления и осевой растягивающей силы с различным соотношением главных напряжений в основном металле;

в) тонкостенный сферический сосуд с экваториальной мягкой прослойкой под действием внутреннего давления;

г) тонкостенный цилиндрический сосуд с продольной мягкой прослойкой под действием внутреннего давления.

Результаты экспериментальной проверки дают основание рекомендовать полученные формулы для приближенного расчета прочности сварных соединений с мягкой прослойкой для указанных вариантов конструкций и видов нагружения.

2. Объемное напряженное состояние, возникающее в мягкой прослойке вследствие действия контактного эффекта при двухосном растяжении, так же как и при одноосном, приводит к упрочнению прослойки. Эффект контактного упрочнения в этом случае существенно зависит от относительной толщины прослойки, от геометрической характеристики сосуда или трубы (при осесимметричной деформации прослойки с двухсвязным контуром) от степени механической неоднородности, а также от напряженно-деформированного состояния основного металла. При достаточно малых значениях относительной толщины прослойки, как и при одноосном растяжении, возможно достижение равнопрочности сварного соединения основному металлу. Получены формулы для определения критических величин относительной толщины прослойки, определяющих область действия эффекта контактного упрочнения, условие вовлечения основного металла в пластическую деформацию и условие равнопрочности сварного соединения с мягкой прослойкой основному металлу. Степень реализации эффекта контактного упрочнения, как и при

одноосном растяжении, возрастает при наличии в соединении "подкрепляющих участков", более прочных, чем основной металл и заключенных между мягкой прослойкой и основным металлом.

3. Деформационная способность тонкостенных сосудов и труб, как и прочность, существенно зависит от напряженно-деформированного состояния основного металла, степени механической неоднородности сварного соединения, степени контактного упрочнения прослойки и наличия "подкрепляющих" участков.

4. Анализ возможных мест и характера разрушения тонкостенных сосудов с продольными и поперечными сварными швами, работающих в условиях двухосного растяжения, показал, что место и направление (вдоль или поперек образующей) разрушения сосуда (трубы) зависят не только от величины напряжений, отвечающих предельно-вязкому состоянию прослойки, но и от напряженно-деформированного состояния основного металла, расположения шва относительно оси сосуда, степени механической неоднородности, анизотропии свойств основного металла и наличия "подкрепляющих" участков. В случае двухосного растяжения перенос места разрушения с мягкой прослойки на основной металл при достижении их равнопрочности (за счет действия эффекта контактного упрочнения) затрудняется по сравнению с одноосным растяжением даже при наличии "подкрепляющих" участков. Это объясняется более высокой устойчивостью процесса пластической деформации основного металла при двухосном растяжении, чем при одноосном.

5. Прочность тонкостенного цилиндрического сосуда с тонкой поперечной мягкой прослойкой (из металла более пластичного, чем основной металл), работающего под действием только внутреннего давления при отсутствии осевых деформаций определяется прочностью и деформационной способностью основного металла. Однако нарушение плоского напряженно-деформированного состояния основного металла вследствие искривления образующей сосуда в процессе пластического деформирования

основного металла приводит к появлению осевых деформаций. При этом условия работы мягкой прослойки (соединения) становятся аналогичными случаю одновременного действия внутреннего давления и осевой растягивающей силы. При неблагоприятных условиях (наличие дефектов, большая относительная толщина прослойки и т.п.) может иметь место разрушение поперек сосуда (трубы), по прослойке.

Поэтому при проектировании конструкции и разработке технологии изготовления тонкостенных сосудов (труб), предназначенных для работы под действием внутреннего давления, необходимо учитывать механическую неоднородность не только продольных, но и поперечных швов.

Если учесть, что в процессе эксплуатации тонкостенных сосудов, и особенно труб, кроме внутреннего давления могут действовать другие нагрузки, носящие иногда случайный характер и не всегда поддающиеся точному расчету, то этот фактор тем более должен учитываться.

6. Местные уменьшения толщины прослойки по периметру (длине) сосуда сопровождаются концентрацией напряжений в этих местах вследствие локального увеличения эффекта контактного упрочнения, действие которого, как показано, возрастает с уменьшением относительной толщины прослойки по гиперболическому закону. Это может привести к местному вязкому или хрупкому разрушению в тот момент, когда средние напряжения по всему сечению еще не достигли предельного значения, т.е. компактное и деформационное упрочнение соседних более толстых участков прослойки не успели реализоваться.

В случае одноосного растяжения тонкостенного сосуда (трубы) указанное явление не оказывает существенного влияния на величину разрушающих нагрузок. При двухосном растяжении появление местных разрушений не позволяет увеличивать внутреннее давление, а следовательно, приводит к преждевременной потере несущей способности конструкции.

В связи с этим при разработке технологии сварки тонкостенных конструкций, предназначенных для работы под действием

внутреннего давления и осевой растягивающей силы необходимо обеспечивать равномерность толщины мягкой прослойки по периметру (длине) сосуда (трубы), а также отсутствие в прослойке дефектов, вызывающих концентрацию напряжений.

Выполнение этих требований особенно важно для поперечных швов, т.к. осевые деформации обычно равномерны по периметру сосуда (трубы). Особое внимание на равномерность толщины прослойки и отсутствие в ней дефектов должно обращаться при малых значениях относительной толщины прослойки, когда малейшее ее уменьшение приводит к резкому увеличению контактного упрочнения.

7. "Подкрепляющие участки", способствующие более полной реализации эффекта контактного упрочнения в условиях двухосного растяжения, могут играть не только положительную, но и отрицательную роль в зависимости от положения сварного шва относительно оси ресервуара, напряженно-деформированного состояния основного металла и деформационной способности металла "подкрепляющих" участков.

Так, в случае продольных швов при наличии осевой деформации "подкрепляющие" участки вследствие низкой деформационной способности могут стать источником разрушения. Кроме того, и продольные и поперечные "подкрепляющие" участки вызывают искажение геометрии сосуда и изменение напряженно-деформированного состояния, особенно в пластической стадии деформирования основного металла.

8. При проектировании и разработке технологии изготовления сварных листовых конструкций необходимо учитывать как влияние фактора механической неоднородности, так и особенности поведения металлов при двухосном растяжении. При экспериментальной проверке работоспособности сварных соединений в условиях двухосного растяжения необходимо стремиться к тому, чтобы напряженно-деформированное состояние основного металла, а также положение сварного шва относительно направлений главных напряжений в основном металле соответствовали реальным условиям работы конструкции. При моделировании свар-

ных листовых конструкций необходимо стремиться к обеспечению геометрического подобия сварного соединения и соответственных его зон у модели и реальной конструкции, а также идентичности механических характеристик металлов соответственных зон. Существующая практика оценки работоспособности сварных соединений в условиях двухосного растяжения по образцам, вырезанным из конструкции и испытанным на одноосном растяжение, является неправильной и может в некоторых случаях привести к серьезным ошибкам.

x x
x

Учитывая, что результаты теоретических решений, полученных в настоящей работе, удовлетворительно согласуются с результатами экспериментальных исследований, проведенных в настоящей работе и другими авторами, их можно рекомендовать для включения в межведомственные указания-рекомендации по конструктивно-технологическому проектированию сварных конструкций, разрабатываемые по заданию Госкомитета по науке и технике при Совете Министров СССР.

Полученные расчетные зависимости могут быть также использованы для дальнейшего исследования работоспособности сварных соединений при двухосном растяжении в различных температурных условиях, при различных скоростях нагружения и т.п.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Богомолова А.С. Некоторые вопросы прочности сварных соединений с тонкой мягкой прослойкой при плоском напряженном состоянии, сб.трудов ЧПИ, № 63, 1968.
2. Богомолова А.С. О напряженном состоянии тонкой поперечной мягкой прослойки в цилиндрической трубе при осевом растяжении, сб."Неоднородность сварных соединений и ее влияние на их работоспособность". Краткое изложение докладов тематического координационного совещания), Челя-

бинск, 1968.
3. Богомолова А.С. Расчетная оценка прочности сварной цилиндрической трубы с поперечной мягкой прослойкой при осевом растяжении. Сб.трудов ЧПИ, № 63, 1968.
4. Бакши О.А., Богомолова А.С. Работоспособность сварных цилиндрических труб с поперечной мягкой прослойкой при осевом растяжении. - "Сварочное производство", № 4, 1969.

Результаты работы доложены:

а) на Координационном тематическом совещании "Неоднородность сварных соединений и ее влияние на их работоспособность" (Челябинск, 1968),
б) на XXI научно-технической конференции ЧПИ (1968),
в) на симпозиуме по вопросам теории и практики сварочного производства, прочности сварных конструкций и методики преподавания сварочных дисциплин в ВУЗах (Челябинск, 1969).

ФБ 02302 13/У-69г. Сдано в печать 14/У-69г. Формат бум. 60x90/16. Объем 1,5 п.л. Отпечатано на ротапринте ЧПИ
ТИРАЖ 120 экз. Заказ № 98