

05.03.06

Р243

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Хрестоматия

На правах рукописи

РАСПОЛОВ Андрей Александрович

РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
МЕХАНИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ДАВЛЕНИЯ

Специальности 05.03.06 - "Технология и машины
сварочного производства"; 01.02.06 - "Динамика
и прочность машин, приборов и аппаратуры"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск 1992

Работа выполнена в Челябинском государственном техническом университете.

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор НАКН С.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук НАПРАСИКОВ В.В.; кандидат технических наук САПОЖНИКОВ С.Б.

Ведущее предприятие - Конструкторское бюро машиностроения.

Защита диссертации состоится "23" 06 1992 г.
на заседании специализированного совета К 053.13.07 Челябинского
государственного технического университета по адресу: 454060,
г.Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76, ЧГТУ, Ученый совет.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической
библиотеке ЧГТУ.

Ваші отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенных
печатью, просим высыпать по указанному выше адресу.

Автореферат разослан 15.05 1992г.

Ученый секретарь совета,
кандидат технических наук,
доцент

Шаламов
ШАЛАМОВ В.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Вопросы надежности работы, достоверной оценки прочности, совершенствования технологии изготовления и ремонта тонкоотенных оболочковых конструкций являются важнейшими на всех стадиях их создания и эксплуатации. Мировая практика свидетельствует о том, что одним из наиболее слабых звеньев оболочек давления являются их сварные соединения, уровень прочности которых лимитирует несущую способность всей конструкции.

Существующие методы оценки прочности сварных соединений оболочек давления являются консервативными и в ряде случаев могут привести к ошибочным результатам, так как не учитывают, как правило, наличие механической неоднородности данных соединений, влияния местоположения повреждений относительно неоднородных участков. Кроме того, большинство расчетных алгоритмов построено на основе одностороннего нагружения, хотя для оболочек давления характерным является плоское поле напряжений. Геометрическая форма корпуса конструкции и комбинация реальных нагрузок определяют соотношение компонент поля напряжений в ее стенке - показатель двухосности напряженного состояния, который оказывается на особенностях деформирования и исчерпания несущей способности оболочек, однако, его величина зачастую не учитывается в расчетах.

Анализ современных методик расчета сварных соединений оболочковых конструкций свидетельствует, что их арсенал недостаточен с точки зрения единого, комплексно учитывающего вышеописанные особенности, подхода. Поэтому развитие достоверных и доступных для инженерной практики методов расчета, которые бы основывались на реальных условиях нагружения сварных соединений и параметрах оболочковых конструкций, является актуальной задачей.

Настоящая работа является составной частью исследований, выполняемых кафедрой сварки Челябинского государственного технического университета по научно-технической проблеме 0.72.01, также соответствует задачам правительенного Постановления № 924 от 01.II.1989 г.

Цель работы состояла в разработке методик расчетной оценки несущей способности сварных соединений тонкостенных оболочек давления на основе изучения закономерностей их напряженно-деформированного состояния с учетом фактора механической неоднородности и дефектов. Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Выполнить теоретический анализ напряженного состояния и несущей способности механически неоднородных сварных соединений в составе оболочек давления.
2. Разработать основы рационального проектирования и изготовления сварных соединений тонкостенных оболочковых конструкций.
3. Исследовать напряженное состояние и прочность сварных соединений оболочек давления с учетом размеров и местоположения трещиноподобных дефектов (применительно к условиям вязкого и квазихрупкого разрушений).
4. Разработать методические основы нормирования дефектов сварных соединений тонкостенных оболочек.
5. Выполнить экспериментальную проверку основных результатов данных исследований.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке единого теоретического подхода и установлении на его основе для механически неоднородных сварных соединений тонкостенных сболовок давления количественных закономерностей, определяющих взаимосвязь их несущей способности с конструктивно-геометрическими параметрами соединений, степенью их механической неоднородности, показателем двухосности действующего поля напряжений, а также размерами и расположением трещиноподобных дефектов (применительно к условиям вязкого и квазихрупкого разрушений). Разработаны основы оптимального выбора конструктивных и геометрических параметров сварных соединений тонкостенных оболочек давления с точки зрения повышения их несущей способности. Предложены научно обоснованные методики нормирования трещиноподобных дефектов сварных соединений оболочек давления.

Практическая ценность и внедрение результатов работы. Разработанные расчетные алгоритмы оценки несущей способности механически неоднородных сварных соединений тонкостенных оболочковых конструкций с учетом реальных свойств материала соединений, их геометрических параметров, действительной нагруженности в составе конструкции, размеров и местоположения трещиноподобных повреждений позволяют рационально подойти к проектированию и изготовлению соединений, достоверно оценивать их техническое состояние в процессе эксплуатации и грамотно выполнять ремонтные работы. Получены методики нормирования дефектов, применение которых дает возможность в некотором ряде случаев исключить необоснованные затраты на выполнение ремонтов соединений, а в других - предотвратить допуск в экс-

плутацию непригодных конструкций. Разработанные методы использованы для оценки несущей способности поврежденных сварных соединений магистральных трубопроводов при восстановлении их служебных свойств бандажированием, а также при оптимизации давления опресковки сварных оболочковых конструкций.

Внедрение полученных результатов в ЦНИИКМ "Прометей" (г.Санкт-Петербург) и заводе стационарных глубоководных оснований (г.Баку) позволило определить требования к качеству сварных швов и снизить затраты по изготовлению сварных оболочек за счет сокращения объема ремонтных работ. Для предприятий ЦНИИКМ "Прометей" и КБМ (г.Миасс) обоснован по требуемому уровню прочности выбор конструктивно-геометрических параметров сварных соединений корпусных конструкций.

Результаты настоящих исследований использованы в ряде нормативно-технических документов (РД, строительные методики, технические инструкции, рекомендации), разработанных совместно с УРАЛНИТИ (г.Челябинск), ВНИИСПГнефть (г.Уфа), ЦСЛ "Трубнадзор" (г.Челябинск), в/ч 20346 (г.Мурманск). Экономический эффект от внедрения результатов работы составил 173 тысячи рублей.

Апробация работы. Диссертация заслушивалась и рекомендована к защите на научном семинаре кафедры сварки Челябинского государственного технического университета.

Основные результаты работы доложены на Международной конференции по сварным конструкциям (г.Киев, 1990 г.), восьми Воесовзывных научно-технических конференциях и семинарах (г.Уфа, 1987 г., г.Тула, 1988 г., г.Пермь, 1988 г., г.Киев, 1989 г., г.Волгоград, 1989 г., г.Свердловск, 1989 г., г.Липецк, 1990 г., г.Ленинград, 1991 г.), региональной конференции (г.Ижевск, 1989 г.), а также на научно-методической комиссии Госстандарта по механике разрушения (г.Москва, 1989 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 печатные работы.

Структура и объем диссертации. Дииссертация состоит из введения, пяти глав, списка использованных источников, трех приложений. Она содержит 144 страниц машинописного текста, 87 рисунков, 8 таблиц и 56 страниц приложения. Список литературы включает 220 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. Состояние вопроса. Обеспечение необходимого уровня прочности и надежности сварных оболочковых конструкций неразрывно

связано с достоверным прогнозированием несущей способности их сварных соединений. Первостепенная роль в этом принадлежит расчетным методам, которые лежат в основе проектирования, изготовления сварных соединений и используются при оценке их технического состояния в процессе эксплуатации конструкций. В этой связи большое значение имеют исследования по изучению влияния на работоспособность сварных соединений их механической неоднородности, которые содержатся в трудах О.А.Бакши, Р.З.Шрона, Н.А.Клыкова, А.Н.Моношкова, М.А.Дауниса, М.В.Шахматова, К.Сато, М.Тойода и других авторов. В данных исследованиях было показано, что несущая способность сварных соединений определяется в первую очередь, относительными размерами участков соединений, материал которых имеет пониженный уровень прочностных характеристик, а также степенью неоднородности соединения. При этом доказано, что выбор данных параметров позволяет управлять несущей способностью всего соединения. Однако, известные в настоящее время решения по оценке несущей способности механически неоднородных сварных соединений получены в основном для условий их одноосного нагружения. Тонкостенные оболочковые конструкции, работающие при нагружении внутренним давлением, имеют в своей структуре двухосное поле напряжений с компонентами G_1 и G_2 (напряжениями G_3 пренебрегают ввиду их малости). Величины данных напряжений и показатель двухосности нагружения $\Pi = \frac{G_2}{G_1}$ определяют напряженно-деформированное состояние оболочек, что требует конкретного учета при расчете данных конструкций.

Основной вклад в решение вопросов оценки несущей способности механически неоднородных сварных соединений определенных классов тонкостенных оболочек давления внесли О.А.Бакши, А.В.Бакиев, Р.С.Зайнуллин, Л.И.Гладышев, А.Н.Моношков и ряд других авторов. Однако, создание единого практически приемлемого подхода в решении данных задач с использованием показателя Π как переменной величины не было завершено.

С учетом упомянутых особенностей требуют практического решения и вопросы оценки влияния дефектов на прочность сварных соединений оболочек давления. В данном направлении наиболее известны работы С.А.Куркина, В.Ф.Лукьянова, В.В.Напрасникова, Г.П.Карзова, О.И.Стеклова, М.В.Шахматова, Ф.М.Бурдекина, В.А.Винокурова, И.И.Макарова, В.И.Макиенко и других исследователей. Однако, существующие расчетные модели либо не учитывают фактор неоднородности механических свойств сварных соединений, либо не восприимчивы к изменению показателя двухосности нагружения, что ограничивает их практическую пригодность.

2. Развитие методов оценки несущей способности механически неоднородных сварных соединений тонкостенных оболочковых конструкций. Основными параметрами, определяющими несущую способность механически неоднородных сварных соединений оболочек давления (рис. I) являются степень их механической неоднородности K_b , относительная толщина мягкой прослойки $\alpha = \frac{h}{t}$, показатель двухосности нагружения стенки конструкции μ . Для получения расчетной методики оценки напряженного состояния и статической прочности рассматриваемых соединений использовался метод линий скольжения (МЛС), который был усовершенствован для решения задач двухосного нагружения.

Исследование особенностей напряженно-деформированного состояния механически неоднородных сварных соединений в двухосном поле напряжений было выполнено методом конечных элементов (МКЭ).

Расчеты МКЭ показали, что размер очага пластических деформаций (мягкая прослойка и при-

легающие участки твердого металла) практически не зависит от K_b , α и параметра μ и равен ширине соединения h . Рарапределение напряжений G_x , G_y , T_{xy} в очаге пластических деформаций имеет сложный характер и соответствует экспериментальным данным, полученным на образцах-моделях методом муаровых полос (ММП). Установлено, что при вовлечении участков более прочного металла T в процесс совместного деформирования с мягкими прослойками, предельное состояние соединений реализуется при величине касательных напряжений на контактных поверхностях T_{xy}^k , меньших предела текучести мягкого металла при чистом сдвиге k_T и зависящих от значения параметров K_b , α , μ .

Исходя из выявленных МКЭ, ММП закономерностей и уравнений связи нормальных и касательных напряжений с углами характеристик линий скольжения для рассматриваемых сварных соединений были построены

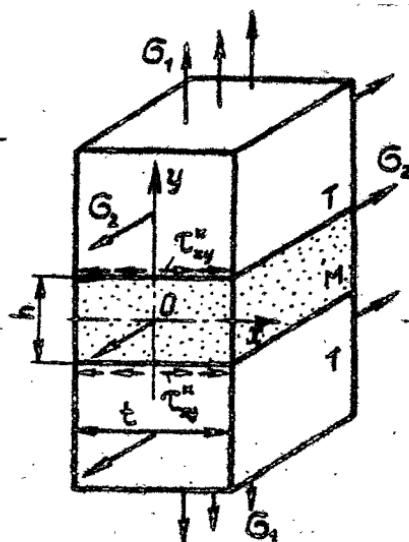


Рис. I.

Расчетная схема исследуемых сварных соединений

поля линий скольжения, с учетом зависимости наклона площадок скольжения от показателя Π . Используя полученные параметрические соотношения, уравнения линий скольжения и выражения, вытекающие из анализа кругов Мора, определены зависимости для компонентов напряженного состояния мягкой прослойки. На основе данных результатов средние предельные напряжения, характеризующие несущую способность сварных соединений, предлагается определять по формуле

$$G_{cp} = \beta_n G_b^m \left(K_b + \frac{K_{\alpha}-1}{K_b} K_{\alpha,n} \right), \quad (1)$$

где $K_{\alpha,n}$ - коэффициент контактного упрочнения мягкой прослойки,

$$K_{\alpha,n} = a_n + \frac{b_n}{\varpi} + c_n \varpi, \quad a_n = \frac{n+1}{3}, \quad b_n = \sqrt{\frac{(n+1)(2-n)}{6}}, \quad c_n = \sqrt{\frac{(2-n)}{6(n+1)}} \cdot \frac{2-n}{6}. \quad (2)$$

Параметр β_n определяет особенности потери устойчивости пластического деформирования мягкой прослойки, в составе оболочки давления, корректируя величину G_{cp} по уровню истинных предельных напряжений, отвечающих реализации условия $\frac{dP}{d\varepsilon} = 0$ (P - давление в оболочке, ε - истинная деформация стенки в зоне сварного соединения). Исследования показали, что параметр β_n определяется показателем двухосности Π и деформационными характеристиками материала мягкой прослойки δ , ψ , $\gamma = G_t^m/G_b^m$ и оценивается по формуле

$$\beta_n = \beta_{0.5} \left[1 + (\gamma_{0.5}^2 - 1) (2n - 1)^2 \right]^{-0.5}, \quad (3)$$

где $\beta_{0.5} = f(\delta, \psi, \gamma)$.

Из анализа зависимостей (1)-(3) следует, что контактное упрочнение мягкой прослойки имеет место при ее относительной толщине меньшей величины ϖ_k , где $\varpi_k = [(n+1)/(2-n)]^{0.5}$. В то же время при уменьшении относительных размеров мягкой прослойки до значений $\varpi_p = [(n+1)(2-n)]^{0.5} [2(3K_b + 2 - n)]^{-1}$ имеет место достижение соединением уровня прочности твердого металла.

Проверка полученных результатов проводилась испытаниями тонкостенных цилиндрических сосудов с продольными сварными швами. Степень механической неоднородности сварных соединений варьировалась за счет различного соотношения исходных свойств основного металла и стоящего в ЗТВ и составляла $K_b = 1,15$ и $1,3$. В результате управления тепловыми процессами при сварке ширина зоны разупрочнения в околосшовной зоне составляла $8,5...9,0; 4,1...4,3; 2,0...2,1$ мм, что соответствовало изменению относительной ширины мягкой прослойки ϖ от 1,4 до 0,33. Испытания проводили на машине

ZDMY-30 в соответствии с ГОСТ 3845-75 при вариации показателя двухосности π , за счет сочетания действия внутреннего давления и осевой силы. Результаты экспериментальных исследований подтвердили разработанную теоретическую модель оценки несущей способности механически неоднородных сварных соединений тонкостенных оболочковых конструкций.

3. Основы рационального проектирования и изготовления сварных соединений тонкостенных оболочек давления. На основе полученных результатов были разработаны подходы к оптимизации проектирования и изготовления механически неоднородных сварных соединений рассматриваемых конструкций, исходя из требования их равнопрочности основному металлу.

Размеры мягких равнопрочных прослоек (см. П.2) довольно малы. Для сварных швов данный диапазон часто является не технологичным. Кроме того, требования к условиям эксплуатации оболочковых конструкций ответственного назначения таковы, что не допускают их неупругое деформирование. В связи с этим, определен диапазон допустимых размеров мягких швов, исходя из обеспечения их несущей способности на уровне предела текучести более прочного основного металла:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathfrak{X} \leq \mathfrak{X}_{pt1} = \frac{\sqrt{(1+n)(2-n)}}{2 \left[3 \left(\frac{\delta_r K_B - 1}{K_B - 1} \right) - (1+n) \right]} , \quad K_B > \frac{1}{\delta_r} ; \\ \mathfrak{X} \leq \mathfrak{X}_{pt2} = \frac{1}{2} \sqrt{(1+n)(2-n)} , \quad K_B \leq \frac{1}{\delta_r} , \end{array} \right. \quad (4)$$

где $\gamma_r = G_{\tau}^{om} / G_B^{om}$.

Использование относительно мягких сварных швов для изготовления оболочковых конструкций при оптимально выбранных конструктивно-геометрических параметрах соединений позволяет получить высокий уровень их прочности и деформационной способности. Последняя обеспечивает выполнение требований по сопротивляемости швов хрупкому разрушению, их технологической прочности, дает возможность выполнения опрессовки оболочек для снятия остаточных напряжений и т.д. Однако, равнопрочности мягких швов основному металлу не достигнуть, если не будет обеспечен ресурс пластичности сварных швов в зонах с высокими показателем жесткости напряженного состояния Π . Искажение ресурса пластичности приводит к эффекту охрупчивания и преждевременному разрушению сварных соединений. Исходя из этого, выбор присадочных материалов необходимо осуществлять, используя законо-

мерности контактного упрочнения мягких прослоек, но с учетом ресурса пластичности их материала. Решение данного вопроса предложено на основе выполнения условия $\sigma_y^{\max} < R_{mc}$ (где σ_y^{\max} - максимальное значение напряжений, перпендикулярных прослойке, R_{mc} - сопротивление материала прослойки внутризеренному микроскопу),

$$R_{mc} = G_r^M \left\{ 1 + \ln \left[1 + 0,138 \left(\frac{m_y E \Lambda_p}{G_r^M} \right) \right] \right\} . \quad (5)$$

Здесь Λ_p - ресурс пластичности материала в текущей точке с координатой x прослойки,

$$\Lambda_p = \frac{3,25 G_r^M \sqrt{3} \sqrt{n^2 - n + 1}}{E (2-n)} \left(\exp \left[\frac{\frac{K_0 - 1}{K_0} \cdot \frac{2}{3} \sqrt{(n+1)(2-n)} \frac{x}{t} + \frac{K_0 - 1}{K_0} \frac{n-2}{3} + 1}{\gamma_H} - 1 \right] - 1 \right), \quad (6)$$

а параметр $m_y = \frac{1}{3} \frac{2-n}{\sqrt{n^2 - n + 1}}$. Зная диаграмму пластичности исследуемого материала присадка $\Lambda_p = \Lambda (\Pi_o)$, можно определить величину

R_{mc} и на данной основе обосновать выбор конкретного присадка для сварки рассматриваемой оболочковой конструкции, обеспечив требование равнопрочности сварного шва и ресурса пластичности его материала.

Описанные выше подходы легли в основу предлагаемой в работе методики выбора режимов опрессовки сварных тонкостенных сосудов давления.

4. Влияние трещиноподобных дефектов на несущую способность механически неоднородных сварных соединений оболочек давления.

В работе рассмотрены наиболее опасные трещиноподобные дефекты при характерных расположениях в сварных соединениях оболочковых конструкций (рис.2).

4.1. Условия вязкого разрушения. Теоретический анализ напряженного состояния и прочности рассматриваемых сварных соединений проводили на основе метода линий скольжения усовершенствованного для задач двухосного нагружения. Для построения полей линий скольжения в сварных соединениях с дефектами необходимо знать характер их пластического деформирования, для чего использовался метод муаровых полос на моделирующих образцах, изготовленных из Ст3. Материалом мягкой прослойки служил свинец С-І. Дефекты имитировали трещиноподобными пропилами. Анализ картин муаровых полос выявил особенности деформирования сварных соединений с каждым из рассматриваемых дефектов.

В работе получены расчетные зависимости для поврежденных сварных соединений оболочек давления, которые показали, что их несущ-

щая способность определяется конструктивно-геометрическими параметрами соединений, размерами и местоположением дефекта, показателем двухосности нагружения соединения в составе конструкции.

На основе предложенных зависимостей выявлены диапазоны размеров дефектов, которые не влияют на изменение статической прочности соединений. Установлено наиболее опасное с точки зрения снижения несущей способности местоположение трещиноподобного дефекта – центральная часть мягкой прослойки (рис.26).

Выполненный анализ использован для разработки методики нормирования дефектов сварных соединений оболочек давления (для условий вязкого разрушения) на основе наиболее неблагоприятного случая. В результате предложено соотношение:

$$0 \leq \frac{f}{t} \leq \left(\frac{f}{t} \right)_{A_0} = 1 + \left[1 + (K_b - 1) A_n - \sqrt{\left[1 + (K_b - 1) A_n \right]^2 - 4 (K_b - 1)^2 B_n C_a + \frac{4 B_n}{N} (K_b - 1) K_b} \right] \cdot \frac{1}{2 \left[2 B_n (K_b - 1) \right]} N^{-1}, \quad (7)$$

где N – суммарное значение коэффициента запаса для рассматриваемого класса конструкций. Выражение (7) позволяет оценить относительную глубину дефекта, при котором сварное соединение к нему нечувствительно.

С использованием (7) можно нормировать как глубину, так и протяженность трещиноподобных дефектов сварных соединений. Например, для магистральных трубопроводов предложены зависимости:

$$\begin{cases} \frac{f}{D} \leq 1, \left[1 - \frac{f}{t} \left(\frac{f}{D} \right)^{0.3} \right]^{-1} = \frac{1}{K_b} + \frac{K_b - 1}{K_b} \left[\frac{A_n (1 - \frac{f}{t}) + \frac{B_n}{N} (1 - \frac{f}{t})^2 + C_a \cdot \varepsilon}{1 - \frac{f}{t}} \right]; \\ \frac{f}{D} > 1 \end{cases} \quad (8)$$

согласно (7),

где L – протяженность дефекта, D – диаметр трубопровода.

Для практических инженерных расчетов в работе приводятся nomogramмы.

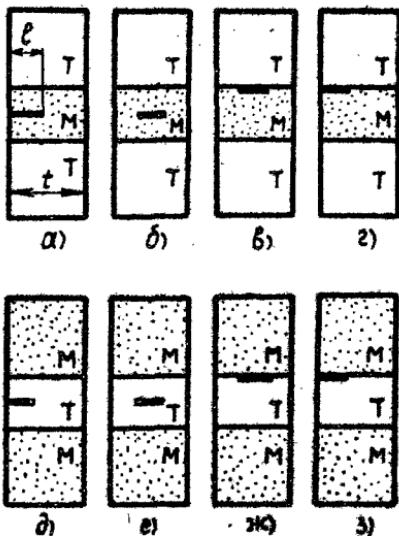


Рис.2.

Схемы дефектов сварных соединений оболочек давления

– условий вязкого разрушения

на основе наибольшего неблагоприятного случая.

В результате предложено соотношение:

$$0 \leq \frac{f}{t} \leq \left(\frac{f}{t} \right)_{A_0} = 1 + \left[1 + (K_b - 1) A_n - \sqrt{\left[1 + (K_b - 1) A_n \right]^2 - 4 (K_b - 1)^2 B_n C_a + \frac{4 B_n}{N} (K_b - 1) K_b} \right] \cdot \frac{1}{2 \left[2 B_n (K_b - 1) \right]} N^{-1}, \quad (7)$$

где N – суммарное значение коэффициента запаса для рассматриваемого класса конструкций. Выражение (7) позволяет оценить относительную глубину дефекта, при котором сварное соединение к нему нечувствительно.

С использованием (7) можно нормировать как глубину, так и протяженность трещиноподобных дефектов сварных соединений. Например, для магистральных трубопроводов предложены зависимости:

$$\begin{cases} \frac{f}{D} \leq 1, \left[1 - \frac{f}{t} \left(\frac{f}{D} \right)^{0.3} \right]^{-1} = \frac{1}{K_b} + \frac{K_b - 1}{K_b} \left[\frac{A_n (1 - \frac{f}{t}) + \frac{B_n}{N} (1 - \frac{f}{t})^2 + C_a \cdot \varepsilon}{1 - \frac{f}{t}} \right]; \\ \frac{f}{D} > 1 \end{cases} \quad (8)$$

согласно (7),

где L – протяженность дефекта, D – диаметр трубопровода.

Для практических инженерных расчетов в работе приводятся nomogramмы.

4.2. Условия квазихрупкого разрушения. Распространение трещин в реальных конструкционных материалах всегда сопровождается развитием пластических деформаций в области предразрушения. Многими авторами показано, что при упругопластическом разрушении тонколистовых конструкций оболочкового типа эффекты, связанные с двухосностью нагружения их стенки, реализуются именно через зону пластических деформаций в вершине концентратора. Данные моменты послужили основой решения поставленной задачи.

Для оценки сопротивляемости рассматриваемых сварных соединений квазихрупкому разрушению был выполнен анализ особенностей их напряжено-деформированного состояния, выбран критерий разрушения и метод решения.

За базовый вариант расчетной схемы было принято расположение трещиноподобного дефекта на границе неоднородных участков (рис.2в, г, ж, з), как наиболее общий и сложный случай. Особенности напряжено-деформированного состояния в окрестности вершины дефекта, расположенного на границе неоднородных участков, исследовали МКЭ, который показал наличие пластического течения металла как в мягкой, так и в твердой зонах. Численно подтверждено сдерживание пластических деформаций металла М более твердым и наличие касательных напряжений в локальной области пластического деформирования. Это позволило описать характер пластического течения и распределение напряжений в области предразрушения методом линий скольжения, на основе предоставления в виде пластических полос, наклоненных под углами:

$$\Omega_m = f_m(n, K_b) \text{ и } \Omega_t = f_t(n, K_b) \text{ к границе раздела.}$$

Анализ прочности рассматриваемых сварных соединений был выполнен на основе механики хрупкого разрушения. Для этого использовали конструкцию решения, согласно которой локальные полосы текучести в окрестности вершины дефекта заменяли узкими разрезами, к берегам которых приложены нормальные $\sigma_o^{\prime\prime}$, $\sigma_o^{\prime\prime}$ и касательные $\tau_o^{\prime\prime}$, $\tau_o^{\prime\prime}$ удельные усилия, являющиеся реакцией плаотически деформируемого металла на упругую область. Данные силовые факторы соответствуют компонентам напряженного состояния на линиях скольжения.

На основе выражений по определению раскрытия берегов данного дефекта получены зависимости для критических напряжений сварных соединений G_k , соответствующих моменту страгивания трещины:

$$G_k = 0.9 \left(\frac{E G_b^{\prime\prime}}{(1-\mu^2) \pi L} f_n \right)^{0.5} \cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{L}{E} \right), \quad (9)$$

где f_n определяется из выражений:

$$\begin{cases} \frac{\delta_c^M}{Z_M} = \frac{\delta_c^M}{\Phi_n^M \left[\frac{2}{3} \sqrt{(n+1)(2-n)} \right]^{-1} + \Psi_n^M \left[1 + 2 \sqrt{\frac{(n+1)(2-n)}{1+5n(1-n)}} \cdot \varphi_M \right]^{-1}} \\ f_n = \min \left(\frac{\delta_c^T \cdot K_B}{Z_T} \right) = \frac{\delta_c^T \cdot K_B}{\Phi_n^T \left[\frac{2}{3} \sqrt{(n+1)(2-n)} \right]^{-1} + \Psi_n^T \left[1 - 2 \sqrt{\frac{(n+1)(2-n)}{1+5n(1-n)}} \cdot \varphi_T \right]^{-1}} \end{cases} \quad (10)$$

где Φ_n^M , Φ_n^T , Ψ_n^M , Ψ_n^T , φ_M , φ_T - функции от параметров K_B и n . Для практического пользования в работе приводятся таблицы выбора основных параметров и nomogramмы по определению величины

В случае расположения дефекта в пределах однородного участка (на удалении от границы раздела) получена зависимость, вытекающая из вышеописанного решения:

$$G_K = \left[\frac{2E \cdot G_T \cdot \delta_c}{(\tau_m)^2 \cdot E \cdot \pi \cdot \varphi_m} \right]^{0.5} \cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\ell}{t} \right), \quad (II)$$

где φ_m - поправка на зону пластичности в устье дефекта, определяемая по выражению

$$\varphi_m = \frac{\cos^2 \theta}{1 - \cos \theta} + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\cos \theta} - \cos 2\theta \right), \quad (12)$$

где $\theta = f(K_B, n)$.

На основе данного алгоритма расчета сварных соединений оболочек давления с трещиноподобными дефектами предложена методика нормирования последних, которая устанавливает диапазоны размеров

$0 < \frac{\ell}{t} \leq \left(\frac{L}{t_A} \right)$ дефектов, не приводящих к квазихрупким разрушениям.

Например, для дефекта на границе неоднородных участков величина $\left(\frac{L}{t_A} \right)$ находится из соотношения

$$\frac{1}{\beta_n^2} \cdot \frac{E}{(\tau_m)^2} \cdot \frac{G_T}{G_K^M} \cdot \frac{\delta_c^T \cdot K_B}{Z_T} = \frac{2\pi \frac{\ell}{t}}{\cos(\pi \cdot \frac{\ell}{t} + \epsilon)} \quad (13)$$

4.3. Экспериментальное исследование влияния трещиноподобных дефектов сварных соединений на несущую способность оболочек давления. Для проверки расчетных зависимостей проводили испытания внутренним давлением цилиндрических сосудов, выполненных из прямых сварных труб. Материалом конструкций являлась углеродистая сталь ВСтЗпс. Анализ кривых твердости сварных соединений и основного металла труб, а также механические испытания по определению склонных свойств показали, что сварной шов является более прочным

по отношению к основному металлу, со степенью механической неоднородности $K_b = 1,25$. Дефекты наносили механическим путем с вариацией глубины $\frac{1}{4}$ и протяженности ядоль образующей $\frac{1}{D}$. Сосуды в испытательной камере нагружали гидравлическим насосом УНГР-2000 вплоть до разрушения. Вязкое разрушение сосудов с развитыми пластическими деформациями и образованием выступов происходило во всех случаях при температуре испытаний $T = 20^{\circ}\text{C}$. Условия квазихрупкого разрушения моделировались охлаждением конструкций до $T = -60 \pm 10^{\circ}\text{C}$, для чего сосуды предварительно помещали в криокамеру с хладагентом — смесью жидкого азота с бензином.

Сопоставление полученных экспериментальных данных с теоретическими позволило убедиться в практической пригодности последних для оценки влияния дефектов на прочность сварных соединений тонкостенных оболочковых конструкций.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1) Несущая способность оболочковых конструкций, работающих под действием внутреннего давления, зависит от ресурса прочности их сварных соединений, которые являются наиболее ответственным звеном вследствие присущих им особенностей (механическая неоднородность, наличие дефектов и геометрических несовершенств и т.д.).

Механическое поведение сварных соединений в составе тонкостенных оболочек давления определяется их конструктивно-геометрическими параметрами, степенью механической неоднородности, характером и уровнем действительной нагруженности стенки конструкции, размерами и расположением дефектов в соединениях.

2) Усовершенствование метода линий скольжения для случая двухосного нагружения тонкостенных конструкций позволило с единых теоретических позиций рассмотреть напряженное состояние механически неоднородных сварных соединений в составе оболочек давления с учетом всех вышеупомянутых факторов и получить практически приемлемые расчетные методики для оценки несущей способности данных соединений применительно к условиям вязкого разрушения.

3) Теоретические и экспериментальные результаты послужили основой подходов к рациональному проектированию и изготовлению сварных соединений рассматриваемых конструкций.

Выбор конструктивно-геометрических параметров и материала сварных соединений оболочек давления должен осуществляться исходя из требований по уровню их несущей способности и возможностей его повышения за счет действия контактного упрочнения, но с учетом ресурса пластичности материала соединений. При этом расчет необходимо выпол-

ять для реальных силовых условий работы соединений в составе конкретной конструкции, которые определяются величиной максимальных действующих напряжений и показателем двухосности нагружения стенки оболочки.

4) Исследовано влияние трещиноподобных дефектов на несущую способность сварных соединений оболочковых конструкций применительно к условиям вязкого и квазихрупкого разрушений. Рассмотрены характерные случаи расположения данных повреждений. Наиболее опасными, с точки зрения снижения прочности, местами расположения дефектов являются: для условий вязкого разрушения - центральная часть срединной плоскости мягкой прослойки соединения, для условий квазихрупкого разрушения - на границе участков соединения, имеющих различный уровень прочностных характеристик.

На основе выполненного анализа поведения дефектов предложены методики нормирования трещиноподобных дефектов сварных соединений тонкостенных оболочковых конструкций.

5) Поведение дефектов в неоднородных сварных соединениях оболочек давления не является однозначным. Несущая способность данных соединений во многом зависит не только от размеров повреждения, но и от места его расположения. Это в ряде случаев приводит к тому, что имеется диапазон таких размеров дефектов, при которых соединение является нечувствительным к последним (относится к условиям вязкого разрушения).

Анализ области предразрушения в вершине трещиноподобного дефекта сварных соединений оболочек давления (применительно к условиям квазихрупкого разрушения) показал, что локальное деформирование материала, определяющее достижение критического состояния поврежденного соединения, зависит от механических характеристик материала, где распространена локальная пластическая область, величины их соотношения и показателя двухосности нагружения стенки конструкции. На данной основе создан общий подход к определению критического давления в оболочке, при котором происходит старт трещины от вершины дефекта сварного соединения.

6) Установленные закономерности механического поведения рассматриваемых сварных соединений подтверждаются результатами экспериментальных исследований на моделях методом муаровых полос и линейными испытаний внутренним избыточным давлением сварных оболочковых конструкций.

7) Результаты работы внедрены на ряде предприятий с общим экономическим эффектом в 173,5 тысячи рублей, о чем свидетельствуют:

акты, приложенные к настоящей работе. Разработанные расчетные методики использованы при создании нормативно-технической документации, инструкций, рекомендаций и РД.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ерофеев В.В., Распопов А.А. Несущая способность механически неоднородных сварных стыковых соединений в условиях двухосного нагружения //Вопросы сварочного производства: Сб. науч. тр. - Челябинск: Челяб. политехн. ин-т, 1987. - С.28-35.

2. Ерофеев В.В., Распопов А.А., Шахматов М.В. О рациональном проектировании сварных соединений сосудов высокого давления //Надежность оборудования, производств и автоматизированных систем в химических отраслях промышленности: Тез. докл. I Всесоюз. науч.-техн. конф. - Уфа: Уфимск. нефт. ин-т, 1987. - С.104-105.

3. А.С. I349929 СССР, МКИ⁴ В 23 К I5/00. Способ устранения дефектов сварного шва /Баранов В.В., Распопов А.А. //По заявке № 4045135 от 07.01.1986 г.

4. Распопов А.А. К вопросу о несущей способности сварных стыковых соединений оболочковых конструкций //100-летие изобретения сварки по методу Н.Г.Славянова и современные проблемы развития сварочного производства: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Пермь: Пермск. политехн. ин-т, 1988. - Ч.2. - С.38-39.

5. Ерофеев В.В., Распопов А.А., Голиков В.Н. Расчет несущей способности сварных соединений низколегированных сталей с разупрочненными участками //Автоматическая сварка, 1989. - №3. - С.70-71.

6. О влиянии технологических дефектов сварки на сопротивляемость крупному разрушению сосудов нефтехимической аппаратуры /Ерофеев В.В., Распопов А.А., Шахматов М.В., Зайнуллин Р.С. //Повышение эффективности и качества оборочно-сварочных работ в химическом и нефтяном машиностроении: Тез. докл. УП Всесоюз. науч.-техн. конф. - Волгоград: ВНИИПТхимнефтеаппаратурн, 1989. - С.29-30.

7. Ерофеев В.В., Шахматов М.В., Распопов А.А. Влияние дефектов сварки на несущую способность сварных труб большого диаметра и их формирование //Диагностика и работоспособность магистральных трубопроводов: Сб. науч. тр. - Уфа: ВНИИСПТнефть, 1989. - С.43-52.

8. Методика оценки опасности дефектов труб нефтепроводов /Зайнуллин Р.С., Гумеров К.М., Ерофеев В.В., Распопов А.А. - Уфа: ВНИИСПТнефть, 1989. - 16 с.

9. Ерофеев В.В., Распопов А.А., Шахматов М.В. Оценка несущей способности поврежденного участка трубопровода, усиленного бандажом //Вопросы сварочного производства: Сб. науч. тр. - Челябинск:

Челяб. политехн. ин-т, 1989. - С.3-8.

10. Ерофеев В.В., Распопов А.А., Шахматов М.В. О некоторых особенностях использования метода линий скольжения (применительно к задачам двухосного нагружения) //Проблемы прочности, 1990. - № 3. - С.63-68.

11. Об особенностях конструктивно-технологического проектирования сварных соединений тонкостенных оболочковых конструкций из высокопрочных материалов /Ерофеев В.В., Шахматов М.В., Распопов А.А., Михайлов В.И. //Сварочное производство, 1990. - № 9. - С.23-24.

12. Ерофеев В.В., Распопов А.А., Шахматов М.В. Совершенствование методов расчета на прочность сварных соединений оболочек давления с дефектами //Сварные конструкции: Тез. докл. Международной науч.-техн. конф. - Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 1990. - С.186.

13. Бакши О.А., Распопов А.А., Ерофеев В.В. К вопросу о влиянии технологических дефектов на прочность неоднородных сварных соединений оболочковых конструкций //Сварка разнородных, композиционных и многослойных материалов: Сб. науч. тр. - Киев: ИЭС им.Е.О.Патона, 1990. - С.15-19.

14. Распопов А.А., Ерофеев В.В., Шахматов М.В. О выборе присадочных материалов для сварки ответственных оболочковых конструкций //Повышение эффективности сварочных работ: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Липецк. политехн. ин-т, 1990. - С.3-6.

15. Распопов А.А., Ерофеев В.В., Шахматов М.В. Об оценке со- противляемости хрупкому разрушению сварных соединений тонкостенных оболочек давления //Механика разрушения и прочность и прочность сварных конструкций: Материалы Всесоюз. науч.-техн. школы-семинара - Л.: ДЛТИ, 1991. - С.81-87.

16. Распопов А.А., Ерофеев В.В., Шахматов М.В. О несущей способности сварных тонкостенных оболочек давления с разупрочненными участками //Изв. ВУЗов. Машиностроение, 1991. - № 7-8. - С.20-23.

17. Методика оценки допустимой дефектности нефтепроводов с учетом их реальной нагруженности /Гумеров А.Г., Гумеров Р.С., Гумеров К.М. и др. - Уфа: ВНИИСТНефть, 1991. - 25 с.

18. Оценка допустимой дефектности нефтепроводов с учетом их реальной нагруженности /Шахматов М.В., Ерофеев В.В., Распопов А.А. и др. //Строительство трубопроводов, 1991. - № 12. - С.37-41.

Начерт

Подписано к печати 12.05.92. Формат 60Х90 I/16. Печ. л. 1.
Уч.-изд. л. 0,9. Тираж 100 экз. Заказ II2/303.

УОП ЧГТУ. 454060. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.