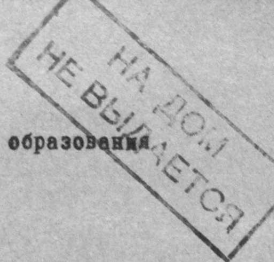


M 359604



Министерство высшего и среднего специального образования
СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ТАШКИНОВ Александр Васильевич

ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ
ПРИ ПОВТОРНЫХ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ

01.02.06 - Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА - 1980

Работа выполнена во Всесоюзном научно- исследовательском институте по монтажным и специальным строительным работам.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
МАЛИНИН Н.Н.

Научный консультант - кандидат технических наук, старший
научный сотрудник ХАЖИНСКИЙ Г.М.

Официальные оппоненты: доктор технических наук

ГРИГОРЬЯНИЦ А.Г.

кандидат технических наук, доцент

ЗЛОЧЕВСКИЙ А.Б.

Ведущий

ательский

ИНСТИТУТ

Защита

заседании

специализи

ность

машин" МВТ

107005, г.

С дис

ТУ имени

Н.Э.Баумана

Автор

Ученый

АЛФУТОВ Н.

М 359604

НТБ МТУ им. Н.Э.Баумана



1359604

Ташкинов А.В. Прочность сва

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

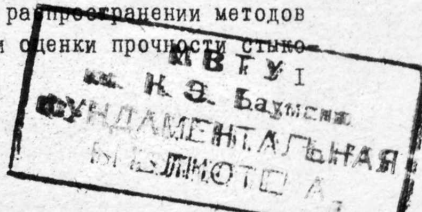
Актуальность темы. Современный уровень развития отечественной индустрии предъявляет высокие требования к эксплуатационной надежности всех элементов промышленных систем. Работоспособность предприятий нефтедобывающей и нефтехимической промышленности, энергетических комплексов, двигательных установок во многом определяется безотказным функционированием широких сетей трубопроводов различного назначения.

В целях обеспечения надежной работы трубопроводов на их изготовление и монтаж установлены жесткие технические нормативы. Однако, в ряде случаев нормативные требования разрабатывались без проведения соответствующих исследований прочности, что привело к их неоправданному завышению. В частности, это относится к допускам на смещение кромок свариваемых элементов в стыковых соединениях трубопроводов. При проведении сборочных работ на подгонку кромок в стыках расходуется до 15% трудозатрат. Уточнение нормативных требований позволяет значительно снизить трудоемкость монтажа, полностью обеспечивая при этом работоспособность конструкции. Для разработки новых допусков на смещение кромок необходимо проведение детального анализа прочности сварных стыковых соединений трубопроводов.

Цель работы. Исследовать влияние смещения кромок в сварном стыке труб из малоуглеродистых сталей на прочность соединения с учетом его реальной геометрии и возможного присутствия дефектов сборки и сварки.

Метод исследования. Изучение напряженно-деформированного состояния сварного стыка труб и анализ трещин в соединении проводились методами теорий упругости и пластичности с использованием положений механики разрушения. Расчеты осуществлялись по методу конечных элементов (МКЭ). Для приближенных оценок привлекалась теория цилиндрических оболочек вращения. В целях проверки точности расчетных алгоритмов использовались данные тензометрирования. Для получения кинетических характеристик усталостного роста трещин проводились гидравлические испытания натурных образцов соединений труб.

Научная новизна работы состоит в расширении методов линейной механики разрушения на случаи оценки прочности стыко-



вых соединений труб с дефектами сварного шва в условиях переменных нагрузжений. Наряду с результатами численных решений по МКЭ впервые в расчетной практике получено приближенное аналитическое выражение для коэффициента интенсивности напряжений в реальном сварном соединении труб с кольцевой радиальной трещиной в корне шва, учитывающее действие гидравлического давления и осевого усилия. Предложен способ вычисления коэффициента интенсивности напряжений по МКЭ с учетом остаточных сварочных напряжений путем замены их системой внешних нагрузок. Создан алгоритм автоматического построения при помощи ЭВМ сетки конечных элементов на рассчитываемой двумерной области. Разработана методика экспериментального получения кинетических характеристик усталостного распространения трещин в стыковых сварных соединениях труб и сосудов давления.

Практическая ценность работы заключается в том, что:

1. Разработана методика оценки прочности сварных стыковых соединений труб из малоуглеродистых сталей при повторно-статическом нагружении внутренним гидравлическим давлением и осевым растягивающим усилием. Использование этой методики позволяет проводить обоснование или пересмотр нормативных требований к геометрическим параметрам соединения, в частности - к смещениям кромок.

2. Разработана методика экспериментального получения характеристик усталостного роста трещин в сварном соединении труб и сосудов давления путем испытания натуральных образцов. На основании проведенных экспериментов были получены их значения для сварного соединения труб из малоуглеродистых сталей при воздействии малоагрессивных сред.

3. Создан единый алгоритм вычисления по МКЭ коэффициента интенсивности напряжений для трещин в стыковом соединении труб с учетом действия как внешних нагрузок (гидравлического давления и осевого усилия), так и полей остаточных сварочных напряжений.

4. Для кольцевой радиальной трещины в корне шва сварного стыкового соединения труб при действии гидравлического давления и осевого усилия предложена приближенная аналитическая зависимость, позволяющая находить коэффициент интенсивности напряже-

ний и проводить оценку прочности конструкции на уровне инженерных расчетов.

5. На основании методов теории оболочек для ряда характерных геометрических случаев соединения труб получены основные соотношения для анализа напряженно-деформированного состояния. Точность использования в подобных расчетах теории оболочек оценена сравнением результатов с данными, полученными при помощи МКЭ и при тензометрировании натуральных образцов.

6. Разработана методика нахождения по МКЭ сварочных остаточных напряжений в стыке труб из малоуглеродистых сталей с учетом нескольких сварочных проходов и механической неоднородности соединения.

7. Создан алгоритм автоматической неравномерной разбивки двумерной полигональной области на треугольные конечные элементы. Алгоритм позволяет значительно снизить объем подготовительных операций для расчетов по МКЭ, увеличивая тем самым возможность практической реализации метода.

8. Создана экспериментальная установка, позволяющая проводить испытания элементов трубопроводов и сосудов давления повторно-статическим воздействием внутреннего гидравлического давления при широком выборе рабочих сред.

Апробация. Результаты работы докладывались дважды на научном семинаре "Прикладная теория пластичности и ползучести" МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1978 и 1980 г.г., на научном Совете по комплексным проблемам энергетики при АН СССР (секция трубопроводных систем) в 1979 г., на XXXIX научно-технической конференции МИСИ им. В.В. Куйбышева в 1980 г., на конференции молодых ученых и специалистов Министерства монтажных и специальных строительных работ СССР в 1980 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 статей.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Изложена на 140 страницах машинописного текста, содержит 31 рисунок, 5 фотографий, 6 таблиц, 3 приложения и список использованной литературы из 177 наименований.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных методов анализа напряженно-деформированного состояния конструкций, широкое внедрение ЭВМ в расчетную практику, разработка прикладных вопросов механики разрушения позволяют значительно уточнить прочностные оценки конкретных сооружений и избежать неоправданно высоких коэффициентов запаса.

Как показывает статистика разрушений сварных стыковых соединений трубопроводов, основной их причиной является зарождение и рост кольцевых усталостных трещин от корня шва наружу. Повторные нагружения при этом создаются за счет пусков и остановов в работе трубопроводной системы, общее число которых за весь срок эксплуатации составляет несколько тысяч.

Для сварного стыкового соединения труб характерно присутствие целого ряда концентраторов напряжений: смещений кромок, усиления шва, непроваров, подрезов, пор и др. Они провоцируют зарождение трещины и во многом определяют скорость ее роста в процессе усталостного разрушения. При этом дополнительное влияние на работу соединения оказывают поля остаточных напряжений после сварки. Сложность напряженно-деформированного состояния стыка и специфика условий работы соединения приводят к необходимости использования современных методов исследования прочности конструкций с привлечением численных способов решения на ЭВМ, применением положений механики трещин, создания специального экспериментального оборудования.

Глава I. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ТРУБОПРОВОДАХ И СОСУДАХ ДАВЛЕНИЯ

Приведен краткий обзор методов изучения сопротивления конструкций усталостному разрушению при малом числе циклов нагружения.

Отмечено, что наибольшее распространение получили методы, основанные на критериях зарождения усталостных трещин. Основные вопросы этого направления были разработаны В.В.Новожиловым, С.В.Серенсенем, Р.М.Шнейдеровичем, Н.А.Махутовым, А.П.Гусенковым, В.В.Ларионовым, Мэнсоном, Коффином, Лэнджером и др. Показано,

что в этом случае период зарождения трещины оценивается на основании анализа циклического упруго-пластического деформирования материала.

Для большинства реальных конструкций зоны пластических деформаций локализованы в малых объемах. Это позволяет ограничиться при исследованиях прочности рассмотрением чисто упругого поведения материала. Развитие такого подхода применительно к трубопроводам и сосудам давления было сделано в работах Г.П.Карзова, А.Г.Камерштейна, Д.Л.Костовецкого, Лэнджера, Куистры, Никольса и др. При проведении расчетов находятся коэффициенты концентрации напряжений в опасных точках конструкции и используются диаграммы малоциклового разрушения.

Замечено, что для трубопроводов общего назначения допустимо присутствие в сварном соединении мелких дефектов типа непровара или подреза. Они приводят к появлению трещины уже на первых циклах нагружения. Поэтому при оценке прочности сварных соединений целесообразно не рассматривать период зарождения трещины и ограничиться изучением ее усталостного роста.

Рассмотрены основные положения механики трещин, разработанные и развитые в работах Г.И.Баренблатта, Г.П.Черепанова, В.В.Панасюка, Н.А.Махутова, Е.М.Морозова, В.З.Партонa, Б.А.Дроздовского, Г.С.Васильченко, Гриффитса, Ирвина, Орована, Райса, Коттрелла, Макклиттока, Уэллса, Пэриса, Екобори и др. Отмечено, что среди различных параметров линейной механики разрушения наибольшее распространение получил коэффициент интенсивности напряжений K . Для описания усталостного роста трещины большинством исследователей используется уравнение Пэриса

$$\frac{d\ell}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m, \quad (I)$$

где ℓ - длина трещины, N - число циклов нагружения, ΔK - размах коэффициента интенсивности напряжений за цикл, C и m - константы, зависящие от материала, характера напряженно-деформированного состояния, воздействия окружающей среды и др.

Отмечены работы А.П.Гусенкова, А.Б.Злочевского, С.А.Куркина,

И.В.Кудрявцева, В.В.Ларионова, В.П.Леонова, А.П.Махова, Л.Д. Чудновского, Мэддокса, Ииды, Хэслема и др, в которых исследовались процессы роста усталостных трещин в сварных соединениях малоуглеродистых сталей, а также в трубопроводах и сосудах давления. Однако, замечено, что константы уравнения Париса для стыковых соединений труб в них не определялись, а большое количество данных, полученных при испытаниях плоских образцов, лишь приблизительно отражают реальную картину процесса.

Рассмотрено влияние остаточных сварочных напряжений на прочность соединения. Замечено, что для малоуглеродистых сталей их величина не сказывается на скорости усталостного распространения трещины, если системой остаточных напряжений создается растяжение в окрестности ее кончика. Однако, при пониженных температурах их присутствие может способствовать хрупкому разрушению соединения.

Сделан обзор методов определения сварочных остаточных напряжений. Отмечен вклад, внесенный в их развитие Г.А.Николаевым, Н.О.Окороломом, Г.А.Бельчуком, В.А.Винокуровым, А.Г.Григорьянцем, В.С.Игнатьевой, В.И.Махненко, Я.С.Подстригачом, Н.Н.Прохоровым, Г.Б.Талыповым, Вайдьянатаном, Финни, Фридманом, Маркэлом Хиббитом и др. Приведено краткое изложение основных расчетных методик и показано, что для реальных конструкций с учетом особенностей их конфигураций лишь численные методы обеспечивают требуемую точность вычислений.

Отмечены основные аспекты использования МКЭ в задачах теории упругости и пластичности, а также при анализе трещин. Рассмотрены различные схемы его реализации, разработанные Л.А.Розинным, В.А.Постновым, И.Я.Хархуримом, А.Д.Квиткой, Е.М.Морозовым, Г.П.Никишковым, Аргирисом, Зенкевичем, Шарпфом, Хелленом и др.

На основании сделанных обзоров намечены основные направления данного исследования: анализ напряженно-деформированного состояния стыка труб, разработка методов вычисления коэффициентов интенсивности напряжений при появлении трещины в наиболее опасном месте соединения - корне шва, определение по результатам испытаний натурных образцов констант уравнения Париса. Было признано возможным при рассмотрении действия внешних силовых

факторов ограничиться учетом лишь гидравлического давления и осевого усилия. Принято, что концентраторы напряжений имеют осесимметричную форму; это предположение идет в запас прочности конструкции.

Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В СВАРНЫХ СТЫКАХ ТРУБ

Рассмотрены вопросы, предшествующие анализу трещин в соединении: исследовано влияние различных геометрических параметров стыка на концентрацию напряжений, определены поля сварочных остаточных напряжений и проанализировано их взаимодействие с внешними нагрузками.

Основным инструментом решения являлся МКЭ. Учет пластических деформаций осуществлялся по теории течения с использованием пошаговой схемы расчета и итерационной процедуры метода переменных параметров упругости. Материал считался упруго-идеально-пластическим. При анализе текущего шага влияние предшествующих выражалось начальными деформациями ϵ_{ij}^e и ϵ_{ij}^t , характеризующими упругую и температурную составляющие в конце предыдущего шага. В основном разрешающем уравнении МКЭ эти деформации учитывались дополнительной системой узловых сил $\{F_o^{et}\}$, действующих помимо сил от внешних нагрузок $\{F\}$ и температур $\{F^t\}$ данного шага:

$$[k] \cdot \{\Delta u\} = \{F\} + \{F^t\} + \{F_o^{et}\}. \quad (2)$$

Здесь $[k]$ - глобальная матрица жесткости, $\{\Delta u\}$ - приращения узловых перемещений за шаг. Применялись кольцевые конечные элементы треугольного поперечного сечения с линейной зависимостью перемещений от координат.

Численный анализ геометрических концентраторов в сварном стыковом соединении труб показал, что при рабочих уровнях внешних нагрузок пластические зоны либо отсутствуют, либо очень малы. Поэтому в дальнейшем исследование концентрации напряжений при действии внешних нагрузок проводилось в предположении упругого поведения материала. Для основных геометрических случаев

стыковки труб (смещение срединных поверхностей, разнотолщинность свариваемых элементов, присутствие короткого выступа или выреза) были получены решения по известным методикам теории оболочек. Для ряда конкретных соединений сопоставлялись результаты расчетов по МКЭ и теории оболочек с данными тензометрирования натуральных образцов. Эксперименты проводились совместно с сотрудниками лаборатории автоматизации экспериментальных исследований МИСИ им. В. В. Куйбышева. Использовались тензодатчики с базой измерения 1 мм. Была показана высокая точность расчетов по МКЭ и отмечено, что теория оболочек также дает удовлетворительные результаты в подобных задачах за исключением малых областей острых концентраторов.

При нахождении полей сварочных остаточных напряжений использовалась гипотеза одновременности наложения шва по всему периметру, и упруго-пластический расчет проводился для результирующей геометрии стыка. При двух- трехпроходной сварке рассматривался только последний проход, а роль предыдущих сводилась к повышению начальной температуры соединения. Сварочное температурное поле описывалось по известным аналитическим зависимостям для случая сварки тонких пластин. В расчетах пренебрегали явлением кратковременной ползучести, структурными превращениями в металле, а также зависимостью модуля Юнга и коэффициента Пуассона от температуры. Эти допущения позволяют значительно упростить вычислительную процедуру, не внося при этом существенных погрешностей в результирующие значения остаточных напряжений, что было подтверждено последующими расчетами. Экспериментально изучалось изменение предела текучести в сварочных зонах, и полученные результаты использовались при вычислениях.

Сделано сопоставление подсчитанных полей остаточных деформаций для случая двухпроходной сварки труб из стали 20 полуавтоматом в среде CO_2 при V-образной разделке кромок с экспериментальными данными В. А. Винокурова. Была подтверждена хорошая точность расчетной методики. Последующие расчеты, имитирующие испытание соединения повышенным внутренним давлением, не выявили изменения поля остаточных напряжений. Это подтверждает возможность отдельного анализа влияния полей остаточных напряжений и внешних эксплуатационных нагрузок на напряженно-деформи-

рованное состояние соединения труб. Найдено, что поле остаточных напряжений создает в корне шва растяжение в осевом направлении, способствующее зарождению и росту усталостных трещин.

Глава 3. ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ

Рассмотрены вопросы нахождения значений коэффициентов интенсивности напряжений в сварных стыковых соединениях труб, в корне шва которых присутствуют острые дефекты. Эти дефекты трактуются как трещины одинаковой с ними длины ℓ в радиальном направлении. Такое допущение идет в запас прочности соединения.

Как принято в расчетной практике, анализ составляющих коэффициента интенсивности, обусловленных внешними нагрузками и полями остаточных напряжений, проводился по отдельности. Сделанные оценки размеров пластических зон у кончика трещины показали, что допустимо использование квазилинейного подхода.

Для нахождения коэффициента интенсивности напряжений K использовался МКЭ совместно с методом податливости. Величина K находилась из соотношения

$$K = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2} \cdot \frac{\Delta \mathcal{E}}{2\pi R \cdot \Delta \ell}}, \quad (3)$$

где E и ν - модуль Юнга и коэффициент Пуассона, R - средний радиус, $\Delta \mathcal{E}$ - изменение потенциальной энергии тела при удлинении трещины на величину $\Delta \ell$. Значение $\Delta \mathcal{E}$ подсчитывалось как разница работ, совершаемых узловыми силами при длинах трещины $\ell + \Delta \ell$ и ℓ . При этом остаточные напряжения, рассматриваемые как начальные, приводились к эквивалентной системе внешних узловых сил, что позволило унифицировать алгоритм.

Отмечена большая сложность практической реализации МКЭ, связанная с трудоемкостью подготовительных операций метода и высокой стоимостью расчетов. Большое внимание уделено процессам автоматизации подготовки исходной информации для МКЭ, а также построению приближенной аналитической зависимости для подсчета коэффициента интенсивности напряжений.

Разработан алгоритм автоматического построения при помощи ЭВМ неравномерной сетки треугольных конечных элементов на дву-

мерной полигональной области. Область подвергается специальному геометрическому преобразованию, в результате которого те ее части, в которых требуется создать измельчение элементов, оказываются растянутыми по сравнению с соседними. На область в новых границах накладывается сетка, близкая к равномерной, которая при обратном преобразовании переходит в неравномерную.

При построении приближенной формулы был проделан анализ численных результатов, полученных Г.П.Никишковым и Е.М.Морозовым для случая радиальной кольцевой трещины в полом цилиндре. Путем их сравнения с известными решениями для плоской полосы с боковой трещиной была выявлена аналогия, при помощи которой удалось подобрать аппроксимирующую зависимость для K в случае кольцевой радиальной трещины в корне шва. Было учтено действие осевого усилия и внутреннего давления, а также наличие зоны концентрации напряжений при несовпадении внутренних поверхностей стыкуемых труб. Все прочие детали геометрии (усиление шва, разнотолщинность, смещение срединных поверхностей) сводились к действию дополнительных изгибающих моментов, которые приближенно определялись по теории оболочек и уточнялись путем расчетов по МКЭ. В результате было получено соотношение

$$K = \epsilon_{I\infty} \frac{S_1}{S_0 + \Delta_{\delta n}} \cdot \sqrt{\pi \ell} \cdot \left(1 + n \cdot \frac{2S_0}{R}\right) \cdot \left\{ 1 + \frac{\Delta_{\delta n}}{\sqrt{2S_0 \ell}} + \frac{1}{1 + 7 \frac{S_0}{R}} + \right. \\ \left. + \left[\frac{\ell}{S_0 - \ell} \cdot \left(1 + 1,6 \frac{\ell}{S_0}\right) + 3 \cdot \left(1 + 5 \frac{\ell^3}{S_0^3}\right) \cdot \left(\frac{h}{S_0} + \frac{2\Delta_0 S_1^2}{S_0(S_1^2 + S_2^2)} + \frac{n}{4} \cdot \frac{(S_1 - S_2)^2}{S_1 S_0} \right) \right] \right\} \quad (4)$$

Здесь индекс I относится к трубе с большим радиусом срединной поверхности либо, в случае совпадения этих поверхностей - к более тонкой трубе; S - толщина стенки трубоц; h - высота усиления шва; $S_0 = S_1 + h$; $\Delta_{\delta n}$, Δ_0 - смещения внутренних кромок и срединных поверхностей; $n = \frac{pR}{2N}$, где p - величина внутреннего давления, N - осевое растягивающее усилие.

Точность зависимости (4) была проверена серией расчетов по МКЭ, в которых были рассмотрены основные варианты стыковки труб, а соответствующие геометрические параметры изменялись в пределах, представляющих практический интерес: $5 \leq \frac{R}{S_1} \leq 30$;

$$0 \leq \frac{h}{S_1} \leq 0,3; \quad 0 \leq \frac{\Delta_{\delta n}}{S_1} \leq 0,4; \quad 0 \leq \frac{\Delta_0}{S_1} \leq 0,4; \quad 0,1 \leq \frac{\ell}{S_1} \leq 0,5.$$

Найдено, что зависимость (4) обеспечивает точность вычисления коэффициента интенсивности напряжений на уровне 5%. При помощи зависимости (4) проделан анализ влияния отдельных геометрических параметров соединения на коэффициент интенсивности напряжений.

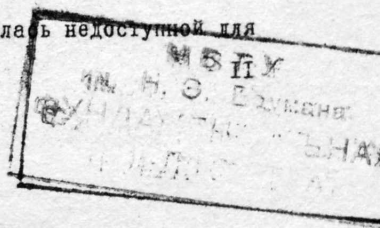
Отмечено, что в условиях циклического изменения внешних нагрузок значение K становится переменным. Для малоуглеродистых сталей скорость роста усталостной трещины зависит от его размаха за цикл ΔK , который определяется диапазоном изменения внешних нагрузок. Максимальное значение K_{max} определяется внешними нагрузками, а также полем остаточных напряжений и характеризует опасность хрупкого разрушения соединения. Дан пример расчета K_{max} в конкретном сварном соединении труб. Установлено, что исследование усталостного разрушения можно проводить без учета этапа хрупкого долома стыка.

Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО РОСТА ТРЕЩИН В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТРУБ

При анализе роста трещин было использовано уравнение Париса (I). Для получения кинетических характеристик C и m была проведена серия испытаний натурных образцов со сварными соединениями труб, содержащими кольцевую трещину в корне шва. Для их осуществления во ВНИИМонтажспецстрое была разработана и изготовлена автоматическая испытательная установка, создающая в образцах изменение внутреннего гидравлического давления по закону, близкому к трапецевидному. Отмечены конструктивные преимущества установки по сравнению с немногими существующими аналогами. В частности, она обеспечивает широкий выбор сред, которыми испытывается образец.

Испытания образцов проводились в условиях нормальных температур при заполнении их водопроводной водой. Исследуемые соединения сваривались полуавтоматом в среде CO_2 с использованием проволоки СВО8Г2С. Для создания в соединении начальной трещины сварка осуществлялась без зазора при больших притуплениях кромок труб, что приводило к образованию острого непровара, близкого по форме к трещине.

В процессе испытаний трещина оказывалась недоступной для



оптических или механических способов замера ее длины. Была разработана специальная методика обработки экспериментальных данных, позволяющая обходиться без сложной аппаратуры для измерения длины невидимой трещины. Во время испытаний фиксировалось общее число циклов нагружения N_k и размах гидравлического давления за цикл. После снятия образца с установки и вырезки участков шва с трещиной замерялись ее начальная и конечная длины l_0 и l_k .

Зависимость (I) приводилась к виду

$$\left(\frac{dl}{dN}\right)_{cp} = C \cdot (\Delta K_{cp})^m, \quad (5)$$

где

$$\left(\frac{dl}{dN}\right)_{cp} = \frac{l_k - l_0}{N_k}; \quad \Delta K_{cp} = \left[\frac{l_k - l_0}{l_k} \int_{l_0}^{l_k} \frac{dl}{(\Delta K)^m} \right]^{\frac{1}{m}}. \quad (6)$$

Константы C и m находились из (5) по вычисленным в соответствии с (6) значениям $\left(\frac{dl}{dN}\right)_{cp}$ и ΔK_{cp} . При этом использовалось соотношение (4) и формулы приближенного интегрирования. Поскольку значение константы m при этом неизвестно, то делалась серия последовательных приближений.

В результате были найдены значения кинетических констант уравнения Париса: $m = 3$; $C = 4,08 \cdot 10^{-11} \text{ МПа}^{-3} \cdot \text{м}^{-0,5} \cdot \text{цикл}^{-1}$. Эти характеристики получены в результате статистической обработки экспериментальных данных в диапазоне скоростей роста трещин: $3 \cdot 10^{-8} \leq \left(\frac{dl}{dN}\right)_{cp} \leq 5 \cdot 10^{-6} \text{ м/цикл}$. Сделана оценка достоверности найденных значений.

Отмечено, что при помощи полученных констант, используя зависимости (4)–(6), может осуществляться оценка долговечности конкретных соединений труб из малоуглеродистых сталей, что позволяет исследовать влияние отдельных геометрических параметров

стыка на работоспособность конструкции.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния сварного стыкового соединения труб при действии внутреннего гидравлического давления и осевого усилия. Сделана оценка точности использования в подобных расчетах теории оболочек и МКЭ. Подтверждена возможность раздельного анализа влияния внешних нагрузок и полей остаточных напряжений.

2. Разработана методика и составлена программа для ЭВМ по подсчету при помощи МКЭ остаточных сварочных напряжений в стыковом соединении труб из малоуглеродистых сталей с учетом нескольких сварочных проходов и механической неоднородности соединения. Путем сопоставления с экспериментальными данными продемонстрирована достаточная точность расчетной методики. Показано, что поле остаточных напряжений способствует зарождению и росту усталостных трещин. Испытание соединения давлением повышенного уровня (опрессовка) не приводит к изменению остаточных полей.

3. Разработана методика и составлена программа для ЭВМ по определению при помощи МКЭ коэффициентов интенсивности напряжений для трещин в соединениях труб при действии внешних нагрузок и остаточных напряжений. При этом поле остаточных напряжений заменяется системой внешних нагрузок, что позволяет унифицировать алгоритм. Установлено, что исследование усталостного разрушения соединения можно проводить без учета возможности хрупкого слома стыка.

4. Разработан алгоритм и составлена программа для ЭВМ по автоматизации процесса построения неравномерной сетки треугольных конечных элементов на рассчитываемой двумерной полигональной области. Алгоритм значительно облегчает реализацию МКЭ и расширяет возможности его практического использования.

5. На основании приближенного анализа кольцевой радиальной трещины в корне шва получена формула для нахождения коэффициента интенсивности напряжений с учетом действия внутреннего гидравлического давления и осевого усилия. Для встречающихся на практике диапазонов изменения геометрических параметров соединения труб формула обеспечивает точность на уровне 5%. Ее использование

дает возможность упростить процедуру подсчета коэффициента интенсивности напряжений и позволяет выявить влияние на его величину отдельных геометрических параметров стыка. Установлено, что внешнее смещение кромок в стыковом сварном соединении труб менее опасно, чем внутреннее. Присутствие более толстой трубы в соединении со смещением кромок при прочих равных условиях повышает прочность по сравнению со случаем труб одинаковой толщины. Увеличение высоты усиления шва также облегчает работу конструкции.

6. Разработана методика получения характеристик усталостного роста трещин в сварном соединении труб путем испытания натуральных образцов. Создана специальная установка для проведения подобных экспериментальных исследований.

7. На основании серии экспериментов получены характеристики усталостного роста трещин в стыковых соединениях труб из малоуглеродистых сталей при воздействии малоагрессивной транспортируемой среды.

По результатам исследования разработаны новые допуски на внутреннее смещение кромок в сварных стыковых соединениях трубопроводов. Признано допустимым смещение, не превышающее 35% от наименьшей толщины стенки соединяемых элементов, но не более 3 мм. Для разнотолщинных элементов смещение может быть увеличено на половину разности их толщин, но не выше, чем на 1 мм. Эти допуски нашли отражение в новых СНиП Ш-31-78 "Технологическое оборудование. ПП и ПР.", а также в окончательной редакции проекта ГОСТа ПГ-604-675-78 "Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы и элементы".

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Ташкинов А.В., Хажинский Г.М. Применение метода конечных элементов при расчете концентрации напряжений в сварных соединениях трубопроводов. - В кн.: Исследование методов монтажа оборудования и трубопроводов. Труды ВНИИМСС. М., 1976, вып.18, с.111-121.

2. Ташкинов А.В. Определение остаточных напряжений в сварных соединениях трубопроводов. - В кн.: Исследование методов монтажа оборудования и трубопроводов. Труды ВНИИМСС. М., 1977, вып.21, с.155-159.

3. Исследование прочности элементов и соединений трубопроводов на испытательной установке с пульсирующим внутренним давлением / Г.М.Хажинский, А.В.Ташкинов, З.А.Крупенин, Б.Г.Давидовский. - В кн.: Исследование методов монтажа оборудования и трубопроводов. Труды ВНИИМСС. М., 1978, вып.24, с.153-161.

4. Ташкинов А.В. Вариант автоматического построения неравномерной сетки в методе конечных элементов. - Известия вузов. Машиностроение, 1978, №6, с.9-13.

5. Исследование концентрации напряжений в стыковых соединениях трубопроводов / А.В.Ташкинов, Г.М.Хажинский, О.Л.Бандин, Г.К.Шаршуков. - В кн.: Расчеты на прочность. М., Машиностроение, 1979, вып.20, с.75-81.

Л - 65607 от 29.04.80г.

Объем 1.0 п.л.

тир. 100

Зак. 647

Типография МВТУ им. Н.Э.Баумана