М 374844

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ
УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

НАПРАСНИКОВ Виктор Васильевич

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ ШТУЦЕРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

(05.04.05 – Технология и машины сварочного производства)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 1981

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ
УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

НАПРАСНИКОВ Виктор Васильевич

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ ШТУЦЕРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

(05.04.05 – Технология и машины сварочного производства)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МВТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Москва – 1981

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1374844
Напрасников В.В. Исследован

Работа выполнена на кафедре "Оборудование и технология сварочного производства" Ростовского-на-Дону ордена Трудового Красного Знамени института сельскохозяйственного машиностроения.

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент В.Ф. ЛУКЬЯНОВ

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор И.И.МАКАРОВ
кандидат технических наук, с.н.с. О.Н.ВИНКЛЕР

Ведущее предприятие – ЦНИИпроектстальконструкция

Защита диссертации состоится "___"_____1981 г. на заседании специализированного Совета по технологии и машинам сварочного производства К 053.15.03 МВТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, Б-5, 2-ая Бауманская ул., дом 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ имени Н.Э. Баумана.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу.

Автореферат разослан "___"_____1981 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
д.т.н., профессор Ямпольский В.М

Типогр МВТУ.
Л - 85931 Подп.к печ. 12/III-81 Зак. 292 Объем 1 п.л. Тир. 105 экз.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Сварные листовые конструкции со штуцерными соединениями, не подвергавшимися механической обработке (сосуды давления, резервуары, автоклавы, котлы и др.) находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Отечественный и зарубежный опыт эксплуатации таких конструкций свидетельствует о том, что именно этот тип соединений является вероятным источником разрушения. Возникновение трещин, как правило, происходит в зонах с недостаточно плавным очертанием контура перехода от шва к основному металлу на ранней стадии эксплуатации конструкций и способствует существенному снижению их долговечности на базе $10^3 - 10^4$ циклов. Необходимость изучения кинетики распространения разрушения от дефектов формы шва становится все более очевидной. Актуальность этой проблемы определяется как ответственным характером изделий и своеобразием напряженного состояния, так и широким использованием высокопрочных материалов.

Целью настоящей работы является установление закономерностей возникновения и развития разрушения в сварных штуцерных соединениях с механически необработанным швом и разработка методов повышения их долговечности.

Задачи работы:

1. Разработка методики исследования малоцикловой усталости штуцерных соединений в толстолистовых конструкциях.

2. Исследование факторов, влияющих на процесс возникновения разрушения.

3. Выявление закономерностей кинетики разрушения штуцерных соединений.

4. Разработка конструктивно-технологических мероприятий, направленных на повышение долговечности.

Методы исследования. Реализация поставленной цели и задач была осуществлена с использованием экспериментального исследования кинетики малоциклового разрушения по разработанной методике на крупногабаритных образцах с учетом осевой симметрии нагружения. Для исследования распределения напряжений в зонах конструктивной концентрации было использовано тензометрирование, аналитический метод расчета пластин переменной толщины и решены упругие и упруго-пластические задачи методом конечных элементов для штуцерных соединений, нагруженных двухосным изгибом.

Методом податливости в сочетании с методом конечных элементов исследована зависимость коэффициента интенсивности напряжений в вершине поверхностной цилиндрической трещины от ее параметров (длины, диаметра, схемы напряженного состояния).

Научная новизна работы заключается в установлении закономерностей между конструктивным оформлением штуцерного соединения и процессом возникновения и распространения разрушения, которые заключаются в следующем:

а) при малоцикловом нагружении штуцерных соединений с механически необработанным швом наличие линейного инициатора разрушений обусловливает появление и слияние изолированных трещин на ранней стадии разрушения, которое завершается образованием цилиндрической трещины;

б) теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что при осесимметричном изгибе пластины с цилиндрической трещиной характер изменения параметра K_I от длины трещины существенно зависит от градиента напряжений по толщине и имеет экстремум. При увеличении диаметра трещины максимальные значения K_I смещаются в сторону больших длин трещин.

Практическая ценность. Разработана и внедрена методика исследования работоспособности сварных штуцерных соединений при малоцикловой усталости. Установлена закономерность кинетики разрушения данных соединений, позволяющая прогнозировать долговечность сосудов давления при повторно-статическом нагружении.

Предложена технология и разработано специализированное оборудование для изготовления штуцерных соединений с предварительно упрочненной околошовной зоной.

Апробация работы. Диссертация заслушана и рекомендована к защите на заседании кафедры "Оборудование и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Н.Э. Баумана в январе 1980 года, кафедры "Оборудование и технология сварочного производства" Ростовского-на-Дону института сельхозмашиностроения в ноябре 1980 г. Основные результаты работы доложены на семинаре по проблемам прочности в Киеве (1979 г.) и на 7-й научно-практической конференции Северо-Кавказского центра высшей школы в Ростове-на-Дону (1980 г.).

Публикация. По теме диссертации опубликовано 5 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и общих выводов. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста, включает 72 рисунка, 16 таблиц. Список литературных источников включает 115 наименований.

В первой главе (литературный обзор) содержится краткий анализ случаев и причин преждевременного повреждения и разрушения сосудов давления, который свидетельствует о том, что от 40 до 80% разрушений происходит в результате образования трещин в сварных узлах, присоединяющих штуцер к корпусу сосуда.

Тот факт, что сварные штуцерные соединения являются потенциальными источниками разрушения, наглядно подтверждают результаты экспериментов, проведенные на крупномасштабных моделях и натурных сосудах Д.М. Шуром, Г.П. Карзовым, D.Kooistra, J.Welter и др. Сопоставление опубликованных данных показывает, что при циклическом нагружении несущая способность сосудов может понижаться более чем в два раза на базе 2 – 3 тыс. циклов по сравнению со статическим режимом нагружения.

Вопросам теории прочности сварных сосудов давления уделено большое внимание в работах советских ученых Г.А. Николаева, С.А. Куркина, В.А. Винокурова, И.В. Кудрявцева, В.И. Труфякова, Н.А. Махутова и зарубежных исследователей R.Nichols, B.Langer и др. Однако, несмотря на успехи, достигнутые в области оценки конструктивной прочности, ряд вопросов изучен недостаточно. К ним относятся изучение специфики поведения штуцерных соединений при малоцикловом нагружении и вопросы, связанные с кинетикой развития разрушения от дефектов формы сварного шва.

Вторая глава посвящена методическим аспектам работы, связанным с выбором схемы нагружения, выбором оптимальных размеров образца, разработкой нестандартного оборудования для испытаний крупногабаритных узлов при повторно-статическом нагружении.

Отсутствие определенно установленных закономерностей между поведением металла в конструкциях и при испытании малогабаритных образцов заставляет имитировать в экспериментальных исследованиях основные конструктивные и технологические особенности изготовления изделия и условия его эксплуатации.

Применительно к штуцерным соединениям, работающим в составе корпусных конструкций под давлением, схема испытаний должна учитывать: двухосность напряженного состояния, циклический характер приложения нагрузки, масштабный фактор. Кроме того, характерной особенностью работы данных соединений является возникновение значительных по величине изгибных напряжений в районе сварного узла.

Анализ возможных схем испытания штуцерных соединений (осевое растяжение и изгиб плоских образцов, выпучивание по методу МВТУ и др.) показывает, что для оценки характеристик малоцикловой усталости тол-

столистовых сварных элементов целесообразно выбрать схему нагружения двухосным изгибом, предложенную совместно МВТУ им.Баумана и РИСХМом.При нагружении равномерно распределенной нагрузкой шарнирно опертого по контуру диска с центрально вваренным штуцером возникает двухосный осесимметричный изгиб, и центральная часть внешней поверхности образца испытывает равномерное растяжение.

С точки зрения возникновения разрушения данная схема испытания близка к реальным условиям работы сварных штуцерных соединений в составе сферических сосудов давления.

Оптимальные размеры образцов для испытаний были установлены на основе анализа распределения напряжений в зоне перехода от шва к основному металлу в зависимости от соотношения диаметров диска, штуцера и геометрических размеров сварного шва. В основу расчета положен аналитический метод расчета круглых осесимметричных пластин переменной толщины.

Сварное соединение типа "штуцер-лист" можно представить в виде пластины переменной толщины, у которой поперечное сечение разбито на три участка (штуцер, сварной шов, пластина). С учетом изменяющейся жесткости D уравнения равновесия приводятся к дифференциальному уравнению вида

$$D\frac{d}{dz}\left(\frac{d\upsilon}{dz}+\frac{\upsilon}{z}\right)+\frac{dD}{dz}\left(\frac{d\upsilon}{dz}+\mu\frac{\upsilon}{z}\right)=Q, \qquad (1)$$

где D – изгибная жесткость в произвольной точке;

υ – угол поворота нормали к срединной поверхности;

z – радиус текущей точки;

Q – функция, зависящая от вида внешней нагрузки.

Полагая, что на втором участке (сварной шов) толщина изменяется по степенному закону $t=Cz^{\alpha}$, а на остальных участках $t=\text{const}$, общее решение уравнения (I) записывается в виде трех уравнений, соответственно для каждого участка относительно неизвестных υ_1, υ_2, υ_3. Для определения неизвестных с учетом граничных условий составляется и решается на ЭВМ система алгебраических уравнений 6-го порядка. Искомые напряжения вычисляются по следующим выражениям:

$$\sigma_{zi}=\frac{Ez}{1-\mu^2}\left(\frac{d\upsilon_i}{dz}+\mu\frac{\upsilon}{z}\right);$$

$$\sigma_{ri}=\frac{Ez}{1-\mu^2}\left(\frac{\upsilon}{z}+\mu\frac{d\upsilon}{dz}\right). \qquad (2)$$

Результаты проведенных расчетов показывают, что при изменении

диаметра штуцера от 20 до 240 мм в дисках диаметром более 900 мм величина максимальных напряжений в околошовной зоне остается практически постоянной. Следовательно, образцы такого диаметра могут быть использованы для исследования конструктивных особенностей изготовления штуцерных соединений. На образцах диаметром менее 700 мм увеличение диаметра штуцера приводит к монотонному снижению максимальных напряжений. Тем не менее, такие образцы могут быть использованы для отработки технологических мероприятий при изготовлении штуцерных соединений.

Для испытания образцов в условиях малоциклового нагружения при осесимметричном двухосном изгибе была спроектирована и изготовлена установка УДИ-25, позволяющая проводить одновременное и независимое испытание пяти образцов.

В третьей главе проведено исследование основных закономерностей возникновения и развития разрушения в штуцерных соединениях с механически необработанным швом.

Экспериментальная часть работы выполнена на крупногабаритных образцах в виде дисков диаметром 980 и 550 мм, толщиной 40 и 30 мм с центрально вваренным штуцером диаметром 80-190 мм и образцах диаметром 550 мм, толщиной 30 мм из основного металла.

В качестве материала использовалась легированная хромоникельмолибденовая сталь типа 14Х2Н3МА, закаленная и отпущенная на предел текучести 900 и 1100 МПа. Испытания проводили при пульсирующем торно-статическом нагружении с номинальными напряжениями $(0,58 - 0,8)\sigma_{02}$. В процессе нагружения производили измерения длины и глубины развивающихся поверхностных трещин, раскрытия берегов и фотосъемку.

Анализ результатов проведенных испытаний показывает, что штуцерные соединения обладают значительно меньшей работоспособностью, чем основной металл и сварные стыковые соединения. Количество нагружений до зарождения разрушения в сварных штуцерных соединениях составляет 300 - 500 циклов, а до потери герметичности - 7000 - 8000 циклов. Аналогичные характеристики основного металла - 4500-5000 циклов до зарождения и 14000- 15000 циклов до разрушения. При этом топография процесса разрушения сварных соединений и основного металла имеет качественно различный характер.

Во всех случаях испытания образцов с естественной поверхностью листового проката происходит практически одновременное возникновение большого количества стохастически расположенных трещин.

В противоположность этому процесс возникновения и развития разрушения в штуцерных соединениях детерминируется наличием линейного ориентированного инициатора разрушения в виде локальной зоны нарушения геометрической непрерывности в области перехода от шва к основному металлу. Возникновению разрушения в этой зоне способствуют высокая концентрация напряжений, обусловленная геометрией контура перехода, изменение физико-механических свойств металла, остаточные напряжения и другие факторы.

В процессе пульсирующего нагружения циклические повреждения накапливаются в пластически деформированных объемах на линии сплавления и ориентируются вдоль направления будущего развития магистральной цилиндрической трещины, которая распространяется по толщине листа вплоть до потери герметичности.

Под цилиндрической трещиной подразумевается замкнутая по кольцу трещина, берега которой представляют собой две коаксиально расположенные цилиндрические поверхности, смыкающиеся по линии фронта трещины. Возникновение трещины такого типа обусловливается особенностями двухосного осесимметричного поля напряжений и ориентацией в нем инициатора разрушения, которые характерны для сферических сосудов давления. Основными параметрами цилиндрической трещины являются ее размер в направлении толщины (длина трещины) и диаметр цилиндра в плане. Причем, при ее распространении в вершине всегда сохраняются условия плоской деформации.

Для выявления механизма развития и объединения трещин в линейном инициаторе было проанализировано распределение концентрации напряжений вдоль линии сплавления и определены вероятностно-статистические параметры этого распределения.

Величина теоретического коэффициента концентрации напряжений α_σ, обусловленная геометрией перехода, зависит главным образом от двух параметров: радиуса перехода R и угла сопряжения θ. Для экспериментального определения параметров R и θ использовалась видоизмененная методика свинцовых слепков, предложенная И.И. Макаровым. Статистическая обработка результатов измерений показала, что радиус перехода изменяется в пределах 0,15 – 1,5 мм, а угол сопряжения – в пределах 30 – 70°. Причем, изменение параметра R происходит более неравномерно, чем угла θ.

Значения теоретических коэффициентов концентрации напряжений α_σ в зависимости от параметров геометрической неоднородности были получены на основе решения осесимметричной задачи теории упругости с по-

мощью метода конечных элементов. Решение задачи осуществлялось на ЭЦВМ М-222. Результаты расчетов показали, что величина α_σ изменяется в пределах 2,2 – 4,35. Тензометрирование штуцерных соединений датчиками с базой I мм подтвердило высокий уровень концентрации напряжений на линии сплавления.

Полученные результаты послужили основанием для теоретической оценки долговечности до возникновения разрушения $N_{зар}$. Учитывая высокую степень стеснения деформаций цикл нагружения принялжестким и в расчетах использовали уравнение, предложенное Н.А. Махутовым

$$\sigma_a = \frac{E}{4N^m + \frac{1+\gamma}{1-\gamma}} \ln \frac{100}{100-\psi} + \frac{\sigma_{-1}}{1+\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_в}\cdot\frac{1+\gamma}{1-\gamma}} . \qquad (3)$$

Вычисление амплитуды условных напряжений производили по формуле

$$\sigma_a = K_\varepsilon \cdot \sigma_н / 2 , \qquad (4)$$

где K_ε – коэффициент концентрации напряжений в упруго-пластической области.

Общепринято определять значения K_ε по известной зависимости Нейбера. Однако некоторые работы свидетельствуют о том, что такой подход применительно к локальным зонам штуцерных соединений дает завышенные оценки амплитуды напряжений и, следовательно, нереально низкие значения долговечности. Поэтому для оценки изменения величин K_ε и K_σ в процессе нагружения штуцерных соединений была решена осесимметричная упруго-пластическая задача с помощью метода конечных элементов. Анализ результатов расчета показал, что с инженерных позиций величину K_ε можно принять равной α_σ.

Учитывая полученные результаты и приняв допущение, что основная причина разброса величин количества циклов до возникновения трещин связана с нестабильностью формы шва (т.е.со случайным распределением параметров R, θ и α_σ), определили дифференциальные и интегральные характеристики распределения долговечности $N_{зар}$ при различном уровне номинальных напряжений. Значения долговечности рассчитывались по уравнению (3) с использованием экспериментальных данных о распределении параметров R и θ.

Сопоставление результатов испытания штуцерных соединений при повторно-статическом нагружении с расчетным распределением долговечности показало хорошую сходимость.

Таким образом, процесс разрушения штуцерных соединений имеет топографически детерминированный характер. При этом кинетика возникнове-

ния и объединения изолированных трещин в магистральную обусловливается параметрами геометрической неоднородности инициатора разрушения.

В четвертой главе с позиций механики разрушения проведено исследование основных закономерностей развития цилиндрической трещины. Скорость распространения разрушения обычно связывают с коэффициентом интенсивности напряжений, используя, например, уравнение Париса

$$\frac{dl}{dN} = CK^m. \qquad (5)$$

Для установления зависимости параметра K_I от длины трещины был использован энергетический метод, заключающийся в экспериментальном определении податливости образца с цилиндрической трещиной в штуцерном соединении и подсчете высвобождаемой упругой энергии по мере продвижения трещины.

Экспериментальные исследования проводили на образцах диаметром 550 мм и толщиной 30 мм со штуцером диаметром 150 мм при двухосном осесимметричном изгибе. Путем циклического изменения нагрузки вдоль линии сплавления инициировалась усталостная цилиндрическая трещина. В процессе роста трещины в глубину листа производили измерения прогиба поверхности образца вдоль трех, расположенных под углом 120°, радиальных линий. Для определения длины развивающейся трещины на линии сплавления засверливали отверстия, позволяющие производить измерения.

Изменение упругой энергии образца ΔP, соответствующее увеличению длины трещины на Δa, может быть получено как разность между значениями работы $P(a)$ и $P(a+\Delta a)$. Подсчет величины упругой энергии при каждом конкретном значении длины трещины a проводился по формуле

$$P = \frac{1}{2}\int_{\Delta S} T_i u_i \, dS, \qquad (6)$$

где T_i – приведенная поверхностная нагрузка; u_i – перемещения поверхности пластины.

При смешанном типе разрушения приращение упругой энергии и коэффициент интенсивности напряжений связаны следующей зависимостью

$$\frac{dP}{da} = \frac{1-\mu^2}{E}(K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1}{2G}K_{III}^2. \qquad (7)$$

В рассматриваемом случае $K_{III} = 0$, а K_I и K_{II} отличны от нуля.

Очевидно, что величина K_{II} существенно мала по сравнению с K_I. Тогда значение коэффициента интенсивности напряжений K_I можно определить из выражения

$$K_I = \sqrt{\frac{E}{1-\mu^2} \cdot \frac{dP}{da}} \quad . \qquad (8)$$

Проведенные эксперименты послужили основанием для построения расчетной модели вычисления параметра K_I с помощью метода конечных элементов с целью изучения влияния различных факторов на его величину. Трещина моделировалась цилиндрическим вырезом по внешнему краю сварного шва. Решение осесимметричной упругой задачи проводилось для пластин диаметром 550 и 980 мм с цилиндрическим вырезом диаметром 150, 250 и 350 мм при двухосном изгибе и двухосном растяжении. Подсчет изменения величины упругой энергии при увеличении длины выреза проводили по формуле (6).

Сопоставление результатов экспериментального и теоретического определения зависимости $K_I = f(a)$ показало удовлетворительную сходимость. При этом были выявлены следующие закономерности. При двухосном изгибе с увеличением длины трещины значения K_I достигают некоторого максимального значения, после чего уменьшаются. Такой характер зависимости $K_I = f(a)$, по-видимому, объясняется наличием градиента напряжений по толщине. При увеличении диаметра трещины значения K_I практически совпадают в области малых длин трещин ($a/t \leq 0{,}25$), т.е. когда влияние градиента напряжений его незначительно. Однако с увеличением a/t наблюдается возрастание максимальных значений K_I и смещение экстремума в сторону больших длин трещин. Это должно способствовать увеличению скорости роста трещин в штуцерных соединениях, имеющих большой диаметр. Данное обстоятельство подтверждается результатами экспериментальных исследований долговечности крупногабаритных штуцерных соединений, выполненных на образцах диаметром 980 мм и толщиной 40 мм. Среднее количество циклов, затраченное на развитие цилиндрической трещины в штуцерном соединении диаметром 150 мм составило 12600 циклов, а при диаметре 260 мм – 6350 циклов.

Для выявления роли градиента напряжений были сопоставлены результаты расчета зависимости $K_I = f(a)$ в случае осесимметричного двухосного изгиба и растяжения. Полученные данные свидетельствуют о том, что, в отличие от изгиба, при растяжении величина K_I монотонно возрастает с увеличением длины трещины.

На основании результатов теоретического расчета зависимости $K_I = f(a)$ и уравнения Париса (5) была произведена оценка количества циклов, затраченных на распространение цилиндрической трещины. Сопоставление полученных данных с результатами экспериментального исследования долговечности штуцерных соединений показало, что расчетные значения долговечности на 10 - 15% ниже экспериментальных.

Следовательно, полученные закономерности позволяют с некоторой мерой консерватизма прогнозировать длительность развития разрушения в сосудах давления при малоцикловой усталости.

В пятой главе проведено исследование эффективности методов повышения долговечности штуцерных соединений.

Основываясь на результатах проведенного исследования, можно сказать, что доминирующими факторами, определяющими низкую работоспособность штуцерных соединений с механически необработанными швами, являются: во-первых, высокий уровень концентрации напряжений, обусловленный недостаточно плавным очертанием контура перехода от шва к основному металлу и изменением геометрии сечения в местах вварки штуцеров; во-вторых, наличие линейного ориентированного инициатора разрушения, который значительно сокращает число нагружений до образования протяженной трещины.

С целью повышения долговечности данных соединений в работе было опробовано два наиболее технологичных метода: первый - оплавление границ шва электрической дугой в среде аргона с поперечным колебанием неплавящегося электрода и дифференцированным вложением тепловой энергии в наплавленный и основной металл; второй - прокатка околошовной зоны узкими роликами.

Экспериментальные исследования проводили на образцах диаметром 550 мм, толщиной 30 мм с центрально вваренным штуцером диаметром 150 мм при повторно-статическом двухосном изгибе с номинальными напряжениями $\sigma_н = 680 \div 850$ МПа.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что долговечность до зарождения разрушения $N_{зар}$ в штуцерных соединениях с оплавленными границами шва (радиус галтели 10 - 12 мм) увеличилась в 3-4 раза по сравнению с исходным состоянием, но уровня долговечности основного металла не достигла (почти в два раза меньше). При этом характер разрушения практически не изменился. Зарождение разрушения происходило главным образом в районе галтели. Через 3-5 тысяч циклов формировалась цилиндрическая трещина, распространение которой приводило к потере герметичности при $N = 9000 - 11000$ циклов.

Для выяснения причин такого характера разрушения был произведен теоретический расчет напряженного состояния штуцерных соединений, который показал, что даже при наиболее плавном сопряжении шва и основного металла коэффициент концентрации напряжений α_σ в околошовной зоне не ниже I,4 - I,5.

Отсюда следует, что оплавление границ шва не позволяет уменьшить концентрацию напряжений на столько, чтобы обеспечить повышение долговечности сварного штуцерного соединения до уровня основного металла.

В этом отношении перспективным является использование методов пластического деформирования околошовной зоны, например путем прокатки узкими роликами. В отличие от других методов прокатка узкими роликами позволяет не только получать в поверхностном слое благоприятные остаточные напряжения сжатия, но и за счет сглаживания неровностей сварного шва обеспечивает галтельный переход от наплавленного к основному металлу.

Благодаря работам С.А. Куркина, данный метод нашел широкое применение при изготовлении различного рода тонкостенных оболочковых конструкций. Однако, для сварных штуцерных соединений метод прокатки не получил должного распространения, что объясняется, с одной стороны, большой номенклатурой типоразмеров ввариваемых штуцеров и различной их ориентацией относительно нормали к поверхности сосуда, с другой стороны, отсутствием специализированного оборудования для прокатки сварных круговых швов.

С целью расширения возможностей использования данного метода в РИСХМе были разработаны специальное устройство и технология, предназначенные для изготовления штуцерных соединений с предварительно упрочненной околошовной зоной. Сущность предлагаемой технологии заключается в следующем. Вначале на поверхность сосуда производится круговая наплавка необходимого диаметра, являющаяся частью сварного шва. Затем выполняется технологическое отверстие, служащее для центровки и закрепления устройства для прокатки, и производится прокатка околошовной зоны. Благодаря такой последовательности операций, обеспечивается свободный доступ для деформирования любой зоны сварного шва. После этого осуществляется вырезка отверстия и вварка штуцера.

Экспериментальные исследования показали высокую эффективность предлагаемой технологии. Долговечность штуцерных соединений с упрочненной околошовной зоной практически достигла уровня основного металла.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Процесс возникновения разрушения в сварных штуцерных соединениях, работающих при повторно-статическом нагружении, определяется топографией инициатора разрушения. В штуцерных соединениях, не подвергавшихся механической обработке, трещины зарождаются практически одновременно на различных участках линии сплавления. Их слияние завершается образованием поверхностной цилиндрической трещины на ранней стадии развития разрушения.

2. Линия сплавления штуцерного соединения является ориентированным инициатором разрушения. Кинетика распространения разрушения вдоль инициатора определяется статистическими характеристиками рассеяния параметров геометрической неоднородности. Увеличение протяженности ориентированного инициатора разрушения способствует увеличению темпа накопления циклических повреждений и росту суммарной длины трещины.

3. При осесимметричном изгибе штуцерного соединения, в отличие от двухосного растяжения, скорость продвижения трещины при повторных нагружениях изменяется по кривой с максимумом, что объясняется наличием градиента напряжений по толщине. Полученная в работе численным методом зависимость коэффициента интенсивности напряжений от длины цилиндрической трещины подтверждает указанные закономерности.

4. Увеличение диаметра поверхностной цилиндрической трещины (или отношения d/t) смещает максимум кривой $K_I = f(a)$ в сторону больших длин трещин. При неизменном отношении d/t снижение градиента напряжений приводит к увеличению максимальных значений K_I.

5. При оценке долговечности сосудов давления, когда основное напряженное состояние определяется мембранными напряжениями, расчет длительности периода развития разрушения следует проводить по схеме двухосного растяжения, что позволяет получить консервативную оценку "живучести" конструкции.

6. Разработаны методика и оборудование для экспериментального исследования сопротивляемости сварных штуцерных соединений зарождению и развитию разрушения в условиях двухосного осесимметричного поля напряжений, характерного для сосудов и других корпусных конструкций. Показано, что при толщине листового металла свыше 25 мм, двухосное растяжение целесообразно создавать методом осесимметричного изгиба шарнирно опертого по контуру образца.

7. Поверхностное пластическое деформирование околошовной зоны в штуцерных соединениях путем обкатки узкими роликами позволяет довести сопротивляемость зарождению и развитию разрушения, до уровня аналогичных характеристик основного металла.

8. Разработаны технология и компактное оборудование для обкатки штуцерных соединений на крупногабаритных листовых конструкциях.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

I. Напрасников В.В. и др. О выборе размеров образцов при исследовании малоцикловой усталости сварных штуцерных соединений. – В кн.: Пути повышения экономичности и качества сварочного производства. Сб. статей Ю.Г. Людмирский, Б.В. Соболь, А.П. Суленко, В.В. Напрасников. – Ростов н/Д, 1979, с.102-107. (РИСХМ).

2. Lukyanov V.F., Naprasnicov V.V. Crack propagation in welded nozzle connections under low-cycle fatigue. -Inter. Ins. of Weld. Commission X. - Residual stresses and stress reliving. Brittle fracture. Doc. X-965-80. Rostov-on-Don, 1980.-9p.

3. Лукьянов В.Ф., Напрасников В.В., Людмирский Ю.Г. Кинетика развития разрушения в сварных штуцерных соединениях. – Ростов н/Д, 1980. – 8 с. – Рукопись представлена Ростовским н/Д ин-том с.-х.машиностроения. Деп. в ЦНИИТЭИтяжмаш 26 июня 1980, № 592.

4. Лукьянов В.Ф., Людмирский Ю.Г., Напрасников В.В., Лоскутов В.Н.

Коэффициент интенсивности напряжений в вершине несквозной цилиндрической трещины. - Ростов н/Д, 1980. - 9 с.- Рукопись представлена Ростовским н/Д ин-том с.-х. машиностроения. Деп. в ЦНИИТЭИтяжмаш 26 июня 1980, № 593.

5. Людмирский Ю.Г., Напрасников В.В. и др. Установка УШ-I для прокатки сварных штуцерных соединений. Ростов н/Д, 1980. - 2 с. (Сев.Кав...межотраслевой террит. ЦНТИ и пропаганды Информ. листок № 378-80).