

На правах рукописи

УДК 621.791.052.08

КОМОВ Михаил Евгеньевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И СРЕДСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ
ТРЕЩИНОПОДОБНЫХ ДЕФЕКТОВ В СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ ШВАХ
ТРУБОПРОВОДОВ

Специальность 05.02.11.- Методы контроля и диагностика
в машиностроении

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2006

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете
имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель – кандидат технических наук

Вощанов Алексей Константинович

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор

Вопилкин Алексей Харитонович

кандидат технических наук

Гурова Галина Германовна

Ведущая организация

Защита состоится "2"
Д212.141.01 при МП
105005, Москва, 2-я Б

Ваш отзыв на автореферат
указанному адресу.

Комов М.Е. У1758012
Разработка методики и
средств определения высоты
трещиноподобных дефектов
в стыковых сварных швах т...
2006

национального совета

просим выслать по

У1758012

ПТУ им.

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ

обозначенного здесь срока

Баумана

Актуальность проблемы.

Повышение надежности работы и продления максимально возможного срока службы трубопроводов ответственного назначения является одной из актуальнейших проблем. При эксплуатации таких объектов в сварных швах, в результате длительного воздействия циклических нагрузок и агрессивной внутренней среды происходит образование и развитие трещин.

Как правило, раньше сварные швы с такими дефектами ремонтировали путем вырезки участка трубы со сварным швом и вставкой нового отрезка трубы с образованием двух новых швов. В настоящее время производится ремонт без вырезки сварного шва, с помощью ремонтной наплавки, однако при таком подходе дефект остается в сварном шве. Технология ремонта методом наплавки усиления на внешнюю поверхность сварного соединения обеспечивает восстановление несущей способности элемента конструкции до необходимого уровня и создает дополнительный барьер развитию трещин. Наплавка, кроме восстановления несущей способности конструкции, создает сжимающие напряжения на внутренней поверхности трубы и в зоне трещины, что уменьшает склонность сварных соединений к межкристаллитному коррозионному растрескиванию под напряжением.

При таком подходе от служб неразрушающего контроля требуется следить за дефектом в сварном шве, для этого необходимо определять размеры дефектов с высокой точностью, порядка $\pm 0,5$ мм. Оценка размеров дефекта, особенно его реальной высоты дает возможность определить эксплуатационную надежность соединений, следить за развитием дефекта в процессе дальнейшей

и, задать соответствующий размер ремонтной наплавки.

Темой исследования данной работы являются трубопроводы Ду 300

РБМК АЭС, изготовленные из аустенитной стали и восстановленные с помощью ремонтной наплавки.

М Г Т У
ИМ.Н.Э. БАУМАНА
БИБЛИОТЕКА



Предметом исследований настоящей работы являются:

Физические основы неразрушающих методов контроля и аппаратные средства, обеспечивающие оценку высоты дефектов.

Цель работы. Повышение надежности работы и увеличения срока эксплуатации сварных швов трубопроводов АЭС на основе оценки высоты дефектов с помощью методов и средств ультразвукового контроля.

Достижение поставленной цели осуществлялось путем решения следующих задач:

1. Анализ дефектов, возникающих в результате длительной эксплуатации трубопроводов из аустенитной стали, их местоположения, формы, размеров, причин возникновения и развития.

2. Выбор эффективных методов неразрушающего контроля, позволяющих оценить развитие характерных дефектов эксплуатации. Экспериментально-теоретическое обоснование параметров контроля позволяющих определять высоту дефекта с высокой точностью. Экспериментальные исследования возможности применения выбранных методов на лабораторных образцах и реальных объектах.

3. Разработка методики оценки высоты трещин в аустенитных сварных швах и аустенитных сварных швах отремонтированных с помощью наплавки.

Основные результаты, полученные в ходе проведения диссертационных исследований, имеющие научную и практическую значимость и выносимые на защиту:

1. Технология оценки высоты трещин с высокой точностью с использованием дельта – метода и обоснование основных параметров контроля.

2. Алгоритмы оценки высоты вертикальных трещин и определения величины оставшегося слоя металла в случае развития наклонных трещин.

Новизна научных результатов.

1. На основании теоретических и экспериментальных исследований доказана возможность и эффективность применения дельта-мстода для

определения высоты трещин и слежения за их развитием, с точностью $\pm 0,5$ мм в сварных соединениях из стали аустенитного класса отремонтированных с помощью ремонтной наплавки в диапазоне толщин от 8 до 40 мм.

2. На основе анализа спектра акустических сигналов от корневой трещины предложены новые информативные признаки, позволяющие отличать вертикальные трещины ($\pm 20^\circ$ от вертикали) от наклонных трещин ($\pm 30^\circ \div 70^\circ$ от вертикали). Анализ количества сигналов отраженных от трещины позволяет судить о ее ориентации: наличие трех сигналов характеризует вертикальную трещину, а один наклонную.

3. В результате решения уравнения акустического тракта для дельта-метода получены зависимости амплитуды сигнала от угла ввода и расстояния между преобразователями для дифрагированной волны от вершины трещины и головной волны, отраженной от донной поверхности. Сходимость теоретических и экспериментальных данных составила $\pm 5\%$.

Практическая значимость диссертации заключается в разработке методики оценки высоты трещин в аустенитных сварных швах отремонтированных с помощью усиливающей наплавки.

Созданы акустические средства и оснастка, обеспечивающие оценку высоты трещин, как в сварном шве, так и в ремонтной наплавке.

Реализация научных результатов диссертации. Результаты диссертационных исследований реализованы в "Методике ультразвукового контроля аустенитных сварных соединений трубопроводов Ду 300 с ремонтной наплавкой" № 840.103.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научно-технической конференции "Образование через науку" (Москва, 2005г.), на научных семинарах кафедры Технологии сварки и диагностики МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 4 печатных работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы. Текст диссертации изложен на 161 страницах машинописного текста и поясняется 40 рисунками, 13 таблицами. Список литературы включает 65 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определена цель исследования, сформулированы основные результаты, выносимые на защиту, дана общая характеристика.

Первая глава посвящена постановке задачи исследования. В ней даны краткая характеристика объекта исследования, технологических операций при изготовлении аустенитных трубопроводов и нанесении ремонтной наплавки, а также методы контроля аустенитных сварных швов и ремонтной наплавки.

Статистический анализ дефектов в сварных швах из аустенитных сталей показывает, что основными дефектами являются объемные (компактные) дефекты типа шлаковых включений, свищей и пор (60...90 %), общее количество трещин составляет примерно 12%. Однако в процессе эксплуатации трубопроводов из аустенитных сталей, под воздействием циклических нагрузок и коррозионных сред, количество трещин увеличивается. Одним из основных факторов старения оборудования на всех АЭС мира является межкристаллитная коррозия. Анализ случаев выхода из строя трубопроводов из аустенитных сталей на АЭС, по причине межкристаллитной коррозии, показал, что разрушение обычно происходит как в сварных швах так и по зоне термического влияния; иногда корродирует и основной металл. Чаще всего межкристаллитные трещины начинают развиваться от несправов и других дефектов сварки.

Сложность УЗ контроля соединений из аустенитных сталей связана с высоким уровнем структурных помех, большим затуханием и аномальным распространением ультразвуковых колебаний. Особенности распространения ультразвуковых волн в аустенитных сварных швах подробно рассмотрены и объяснены в работах Алешина Н.П., Волковой Н.П., Вадковского Н.Н., Горной

С.П. Благодаря разработанной акустико-сварочной модели определены оптимальные параметры и схемы контроля.

Толщины до 10 мм можно контролировать поперечными волнами. Толщины более 10 ... 20 мм контролируют продольными и головными волнами. Один из перспективных способов контроля аустенитных сварных швов – двухчастотный метод контроля. Развитие двухчастотного способа - двухмодовый способ. Хорошие результаты при контроле аустенитных сварных швов дало применение акустической голографии.

Общей особенностью контроля наплавки является наличие эхосигналов (шумов) из зоны наплавки вне зависимости от наличия или отсутствия несплошности. Одной из причин этого является различие акустических импедансов металла подложки и наплавленного слоя, а также аномальных зон в граничном слое. Кроме того, большинство наплавленных материалов имеет высокий коэффициент затухания ультразвука. Установлено, что между покрытием и основным металлом имеется переходная зона, обладающая повышенным затуханием ультразвука.

При контроле аустенитной наплавки, в целях выявления трещин перпендикулярных зоне сплавления, применяют методику, разработанную в ЦНИИТмаш Н.П. Разыграевым. Контроль проводят любым дефектоскопом с преобразователем для головных волн ИЦ-70 (дуэт) на частоте 1,8 МГц.

Во второй главе проведен анализ ультразвуковых методов оценки высоты дефектов. Все существующие методы распознавания типа и измерения реальных размеров дефектов можно разбить условно на три группы: спектральные методы; амплитудные методы; временные методы. Эта классификация объясняется тем, что размеры дефекта можно характеризовать амплитудой, задержкой времени и спектром частот. Поскольку анализ дефекта основан на определении указанных характеристик, то этим можно объяснить такое разбиение.

Рассмотрим указанные группы методов относительно возможности измерения размеров дефектов.

Спектральные методы. Сущность данной группы методов основана на анализе характеристик частотного спектра ультразвуковых сигналов, отраженных от дефекта.

Отметим некоторые особенности спектральных методов, которые затрудняют их разработку. Поскольку количество информации о параметрах несплошности зависит от ширины спектра ультразвуковых сигналов, то необходимым условием является работа с широкополосными системами. Достижение широкополосности, само по себе, является достаточно сложной самостоятельной проблемой разработки и изготовления преобразователей. Спектральные методы предъявляют высокие аппаратные требования, что снижает их практическую ценность, и затрудняет их широкое развитие и использование. Возможно, что в недалеком будущем эти методы будут востребованы, но в настоящее время применение спектральных методов на базе существующего аппаратного парка дефектоскопов исключено.

Вторая группа методов, по определению, не предназначена для определения размеров дефектов. Методы, входящие в эту группу, позволяют помочь в распознавании типа дефекта, но не размеров. По своей сути, в основу этих методов положены амплитудные характеристики ультразвуковых сигналов, отраженных от несплошностей, и анализ их отношения друг к другу.

Данная группа методов осуществляет измерение эквивалентной площади отражения, диапазоны углов индикации и условные размеры несплошностей.

Попыткам связать амплитуду отраженного сигнала от несплошности и ее условные размеры с реальными физическими размерами посвящено большое количество научных работ, однако погрешность в измерении размеров дефектов данной группы методов может превышать 100%. Коэффициент корреляции между условной и истинными высотами, примерно равен 0.53, для

реальных дефектов, при проведении штатного ультразвукового контроля, корреляционная зависимость еще хуже, а иногда вообще может отсутствовать.

Это объясняется рядом причин. В качестве основной принципиальной трудности оценки размеров отражателей является зависимость амплитуды волнового поля, рассеянного в обратном направлении, которая неоднозначна или достигает насыщения для определенных размеров отражателей.

Альтернативой амплитудным методам ультразвукового контроля, при определении реальных геометрических размеров дефектов, являются временные методы. Преимуществом этой группы методов является их принципиальная независимость от величины амплитуды анализируемого сигнала. Практическая реализация временных методов, конечно, связана с рассмотрением амплитуды сигнала, и поэтому её косвенное влияние приходится учитывать. Однако этот факт следует рассматривать как ограничения в технической реализации, которые в большинстве практических приложениях являются приемлемыми.

Наиболее распространены методы, основанные на измерении временного интервала между дифракционными сигналами. Использование дифракционных волн основано на том свойстве, что они возникают на границе дефекта. Таким образом, дифракционный сигнал, потенциально, несет информацию о геометрических характеристиках дефекта.

В соответствии с представленными группами был проведен анализ амплитудных и временных методов, спектральные методы не рассматривались из-за сложности исполнения. Рассматривались следующие методы оценки размеров дефектов: зеркально-теневой метод, дельта-метод, дифракционно-временной метод, когерентные методы обработки данных.

Погрешность оценки высоты трещин для зеркально-теневого метода составляет $\pm 1,5$ мм. Точность оценки высоты трещины для данного метода зависит от качества акустического контакта и установки преобразователей.

Погрешность оценки высоты трещин для дифракционно-временного метода составляет ± 1 мм, метод позволяет следить за развитием трещин, а также обеспечивает высокую достоверность и повторяемость результатов. Однако дифракционно-временной метод не позволяет проводить оценку размеров дефектов в аустенитных сварных швах и требует сложного сканирования.

Погрешность оценки высоты трещин для когерентных методов обработки данных (система Авгур), составляет $\pm 1,5$ мм. Метод обеспечивает существенное повышение чувствительности, слабо зависит от качества акустического контакта и успешно применяется на трубопроводах из аустенитных сталей. Однако метод позволяет проводить оценку размеров несплошностей только на основном металле, а не в аустенитных сварных швах.

Наиболее перспективным методом оценки высоты трещины оказался дельта-метод, погрешность измерения высоты трещины находится в пределах $\pm 0,5$ мм. Метод успешно работает на аустенитных швах, дифрагированные сигналы уверенно выделяются на фоне структурных шумов. Единственное ограничение метода это необходимость снятия валика усиления, но в случае ремонта сварных швов усиливающей наплавкой это ограничение снимается, так как валик усиления удаляется.

Принцип предлагаемого метода основан на дифракции ультразвуковых колебаний на краю трещины (дифракция первого типа). В методе используются два преобразователя прямой и наклонный, которые работают по раздельной схеме (рис.1.) Прямой преобразователь устанавливается на сварной шов со снятым валиком усиления, а наклонный на расстоянии (X) от прямого.

При падении, от наклонного преобразователя (И) на трещину поперечной волны, она порождает краевую волну от вершины и головную волну, которая распространяется вдоль трещины до дна, отражается от дна и принимается прямым преобразователем (П). На экране дефектоскопа появляются (рис. 2.) сигнал краевой волны A_1 от вершины трещины и головной A_2 отраженной от дна, временное

расстояние между сигналами дифрагированной волны от вершины трещины (A_1) и головной волны распространяющейся вдоль трещины и отражающейся от дна (A_2), равно реальной высоте трещины.

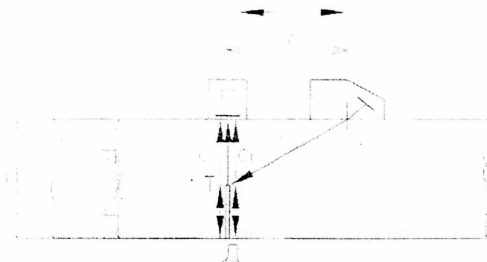


Рис. 1. Схема оценки высоты плоскостного дефекта по дельта-методу

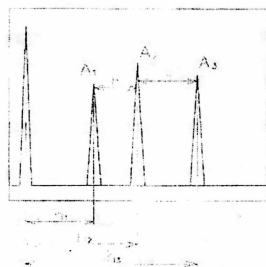


Рис. 2. Изображение на экране дефектоскопа при определении высоты трещины по дельта методике

Исходя из выполненного обзора методов оценки размеров трещиноподобных дефектов, можно утверждать, что методы с использованием волн, дифрагированных на краях трещины, являются наиболее перспективными в настоящее время. Все известные методы оценок размеров дефектов, базирующиеся на амплитудных или амплитудно-временных признаках, не позволяют производить точные измерения геометрических размеров несплошностей. Это объясняется тем, что амплитуда сигнала является интегральной характеристикой большого количества параметров ультразвукового тракта, а их оценка практически невозможна (например, шероховатость поверхности дефекта, ориентация и др.). Многочисленные

экспериментальные исследования подтверждают, что погрешность измерений может составлять сотни процентов от истинного размера несплошности.

Преимущество методов дифракционных волн заключается в том, что их образование происходит на краях (границах) несплошности и такой локальный их характер образования позволяет получить информацию о местоположении источника волн и, следовательно, размерах дефекта. Поэтому амплитуда волн дифракции не является значимой, при определении координат источника их излучения, основным информационным параметром является временная задержка распространения ультразвуковых волн, которая не зависит от амплитуды. Последнее обстоятельство позволяет проводить оценку размеров дефекта с высокой точностью, поскольку влияние параметров ультразвукового тракта на величину времени распространения ультразвуковых волн, как правило, не значительно и поддается оценке.

Третья глава посвящена теоретическому обоснованию дельта методики и выбору параметров необходимых для разработки методики оценки высоты трещин.

Для удобства теоретического решения задачи она была разделена на две части: для дифракции на верхнем конце вертикальной трещины, выходящей на донную поверхность, и для головной волны распространяющейся вдоль трещины и отражающейся от донной поверхности

Акустический тракт дифрагированной волны от вершины трещины имеет вид:

$$\delta P_{np} = -i2\pi a^2 \kappa_{II} \cdot \cos \alpha_0 \left(\cos \beta_{np} + \frac{m \cdot \sin \alpha_0 \sin \beta_{np}}{\sqrt{1 - m^2 \cdot \sin^2 \alpha_0}} \right) \times \\ \times D_{I\tau}(\alpha_0) \cdot D_{II}(\alpha) \cdot \Phi_N(\varphi_0) \cdot \Phi_N(\theta) \cdot \Phi_{pac}^{\omega}$$

D_{II} - коэффициент трансформации поперечных волн в продольные на вершине трещины;

D_{II} - коэффициент трансформации продольных волн в поперечные при излучении;

$\Phi_N(\varphi_0)$ и $\Phi_N(\theta)$ - функции диаграммы направленности излучающего и

принимающего преобразователей соответственно;

κ_{11} и κ_t – волновые числа продольных волн в призме и поперечных в изделии соответственно;

$\Phi_{рас}^w$ – потенциал трансформированной продольной волны.

Акустический тракт головной волны распространяющейся вдоль трещины и отражающейся от донной поверхности имеет вид:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{2Z \cos^2 2\alpha}{Z_l \cos^2 2\alpha + Z_l \sin^2 2\alpha + Z_1} \times \frac{0,5\pi \cdot a_1^2}{(\lambda_l \cdot r_1) + (\lambda_r \cdot r_2)} \times \\ \times \frac{2ige^{ik_1r_1+ik_2r_2}}{k_1 \cdot m(g^2 - 1)\sqrt{r_1 \cdot \sin \alpha_l + r_2 \cdot r_2^2}} \times \frac{\pi \cdot a_2^2}{r_3 \cdot \lambda_l} \times e^{-\delta r_3} \times \frac{Z - Z_1}{Z + Z_1}$$

где β и α – углы падения и преломления ультразвуковой волны;

a_1 и a_2 – радиусы пьезоэлементов излучателя и приемника

соответственно;

r – расстояние по лучу;

δ – коэффициент затухания ультразвука.

В результате решения уравнений акустического тракта для дельта-метода получены зависимости амплитуды сигнала от угла ввода и расстояния между преобразователями для дифрагированной волны от вершины трещины и головной волны, отраженной от донной поверхности. Сходимость теоретических и экспериментальных данных составила $\pm 5\%$.

В четвертой главе проведено экспериментальное обоснование метода и выбраны параметры необходимые для разработки методики определения высоты трещиноподобных дефектов.

Для проверки правильности модели распространения волн проводились исследования на образце толщиной 60мм с прорезью высотой 30 мм. Измерялись амплитуды сигналов (А), время прихода сигналов (т) и путь, пройденный ультразвуковыми колебаниями (Н), в трех позициях (рис. 3.).

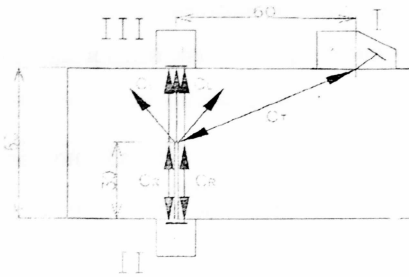


Рис. 3. Схема модели распространения волн

В первой позиции измерения проводились наклонным совмещенным преобразователем, для определения пути, который проходит поперечная волна до вершины трещины.

Во второй позиции наклонный преобразователь закрепляли, а прямой устанавливали на нижнюю поверхность образца. При падении на трещину поперечной волны от излучателя на ней возникала головная волна, которая распространялась вдоль трещины и принималась прямым преобразователем. В результате на экране дефектоскопа виден сигнал от головной волны, распространяющейся вдоль трещины.

Расчеты показали что путь, пройденный головной волной соответствует высоте трещины, полученная скорость распространения волны соответствует скорости головной волны.

В третьей позиции прямой преобразователь устанавливался на верхней поверхности образца, и принимали дифрагированные сигналы от вершины трещины и сигналы головной волны отразившейся от дна. В результате на экране дефектоскопа виден сигнал головной волны отраженной от донной поверхности и сигнал дифрагированной волны от вершины трещины.

Расчеты показали, что путь, пройденный краевой волной соответствует расстоянию от вершины трещины до поверхности, а путь, пройденный продольной волной отраженной от донной поверхности равен толщине изделия. Разница между этими расстояниями дает высоту трещины, полученные скорости распространения волн соответствуют скорости продольной волны.

Для выбора параметров необходимых для разработки методики определения высоты трещиноподобных дефектов использовались образцы толщиной 37; 16 и 12 мм из аустенитной стали с прорезями различной высоты.

На основании проведенных исследований были выбраны частота, угол ввода и расстояния между излучающей и принимающей пьезопластинами для толщин 12÷20 мм. Данные параметры позволяют добиться высокой точности измерения высоты и максимальной амплитуды сигнала от трещины, эти параметры также применялись для разработки специальных раздельно-совмещенных преобразователей.

Для проверки полученных параметров, проводилась оценка высоты реальной трещины в аустенитном сварном шве, толщиной 13мм, кроме того, в образце были выполнены вертикальная и наклонная прорези под углом 30°. Оценка высоты прорезей и реальной трещины проводилась с помощью разработанного раздельно совмещенного преобразователя. Высота обнаруженной трещины составила 3,7мм, металлографический анализ показал, что в сварном шве находится трещина 3,1мм.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы: при развитии в сварном шве вертикальных трещин наблюдается сигнал отраженной головной волны от донной поверхности (A_2) и сигнал продольной волны дважды отраженной от донной поверхности (A_3). временное расстояние между сигналами (A_3) и (A_2) соответствует толщине изделия. В случае отсутствия на экране донных сигналов (A_2) и (A_3) и появления только одного сигнала A_1 , можно сделать вывод о том, что в объекте контроля, развивается трещина с углом наклона $\geq 30^\circ$.

Для проверки работоспособности метода на ремонтной наплавке, проводилось измерение высоты трещиноподобного дефекта в сварном шве, отремонтированном с помощью ремонтной наплавки. В наплавке были проточены ступеньки различной высоты для проверки чувствительности метода на различных толщинах наплавленного металла.

Исследования на аустенитном сварном шве, отремонтированном с помощью наплавки, показали, что при толщине наплавленного слоя более 5 мм, невозможно измерять высоту трещины с помощью раздельно-совмещенного преобразователя из-за низкой чувствительности.

Для повышения чувствительности метода, было решено, устанавливать излучатель на основной металл, а приемник на наплавку, для того чтобы ультразвуковые колебания от излучателя не проходили через наплавленные слои. Проведенные исследования подтвердили данный подход, высота трещины определялась на различных толщинах наплавленного металла. Поэтому для удобства контроля наплавки толщиной более 5мм необходимо использовать механическое приспособление, позволяющее неподвижно закреплять прямой преобразователь на наплавке и проводить сканирование излучателем на основном металле.

На основании статистического анализа, измерения высоты трещиноподобных дефектов различной высоты, для толщин до 20 мм, были построены корреляционные зависимости амплитуды сигнала и высоты трещины определенной с помощью дельта-метода от реальной высоты трещины. Точность измерения высоты трещины по временной зависимости составила $\pm 0,1$ мм, а для амплитудных зависимостей имеется большой разброс значений амплитуда сигналов в зависимости от реальной высоты трещины.

Также в результате исследований было обнаружено, что с уменьшением высоты трещины наблюдается увеличение погрешности оценки высоты трещины, в соответствии с этим не рекомендуется применять метод для оценки трещин высотой менее 1 мм.

В пятой главе описывается методика оценки высоты трещиноподобных дефектов в стыковых сварных швах сталей аустенитного класса, которая была разработана на основании полученных результатов исследования.

Также в пятой главе описывалась конструкция специальных раздельно-совмещенных преобразователей и механического приспособления для оценки высоты трещин в аустенитных сварных швах отремонтированных с помощью наплавки. Данное оборудование разработано; для того чтобы упростить работу дефектоскописта и сократить его время пребывания в зонах с повышенным радиационным фоном.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ результатов испытаний сварных соединений труб выполненных из сталей аустенитного класса, показал, что при воздействии длительных циклических нагрузок и агрессивной внутренней среды в них развиваются дефекты усталостного и коррозионного типа, которые оказывают значительное влияние на прочностные свойства изделия.

2. На основании теоретических и экспериментальных исследований доказана возможность и эффективность применения дельта-метода для определения высоты трещин и слежения за их развитием, с точностью $\pm 0,5$ мм в сварных соединениях из стали аустенитного класса отремонтированных с помощью ремонтной наплавки в диапазоне толщин от 8 до 40 мм.

3. На основе анализа спектра акустических сигналов от корневой трещины предложено в качестве новых информативных признаков, позволяющих дифференцировать вертикальные трещины ($\pm 20^\circ$ от вертикали) и наклонные трещины ($\pm 30^\circ \div 70^\circ$ от вертикали). Анализ количества сигналов отраженных от трещины позволяет судить о ее ориентации, таким образом, наличие трех сигналов характеризует вертикальную трещину, а один свидетельствует о наклонной.

4. В результате решения уравнений акустического тракта для дельта-метода получены зависимости амплитуды сигнала от угла ввода и расстояния между преобразователями для дифрагированной волны от вершины трещины и головной волны, отраженной от донной поверхности. Сходимость теоретических и экспериментальных данных составила $\pm 5\%$.

5. В результате проведенных исследований, выбраны частоты, углы ввода и расстояние между ПЭП, позволяющие достичь высокой точности измерения высоты трещин, для изделий толщиной до 20 мм.

6. Разработана методика измерения высоты трещиноподобных дефектов в сварных швах сталей аустенитного класса. На основании проведенного статистического анализа было определено, что точность измерения высоты трещины по предлагаемой методике составляет $\pm 0,5$ мм.

7. На основании исследований и экспериментов разработаны специальные раздельно-совмещенные преобразователи и механическое приспособление для оценки высоты трещин в аустенитных сварных швах отремонтированных с помощью наплавки. Данное оборудование позволяет упростить работу дефектоскописта и сократить его время пребывания в зонах с повышенным радиационным фоном.

8. Разработанные методика и средства определения высоты трещиноподобных дефектов успешно прошли производственную проверку на Смоленской АЭС и рекомендованы для дальнейшего внедрения.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Комов Е. М., Комов М. Е., Соковнин В. В. Зеркально – теневой метод ультразвукового контроля сварных соединений // Сварочное производство.- 2001.- № 12.- С. 8-10.

2. Комов М. Е., Попков Е. С. Ультразвуковой образ от дефекта в твердом теле // Сварочное производство.- 2002.- № 10.- С. 14-16.

3. Пути повышения безопасности трубопроводов АЭС / В.Е. Белый, А.К. Воцанов, М.Е. Комов и др. // Сварочное производство.- 2003.- № 10.- С. 39-41.

4. Воцанов А.К., Комов Е.М., Комов М.Е. УЗК сварных соединений арматуры железобетонных конструкций // В мире неразрушающего контроля.- 2004.- № 2.- С. 25-26.