

М 26/786

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования
СССР

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

МОГИЛЬНЕР Исаак Ерьевич

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ
СВАРНЫХ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ ПОВЕРХ-
НОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЛОАГРЕГАТОВ

(05.04.06 - Технологии и машины сварочного производства)

Автореферат
диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических
наук

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище
им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель - д.т.н., профессор Волченко В.Н.

Научный консультант - к.т.н., с.н.с. Алёшин Н.П.

Официальные оппоненты - д.т.н., проф. Ермолов И.Н.

к.т.н., с.н.с. Азаров Н.Т.

Ведущее предприятие - Проектно-технологический институт
"Энергомонтажпроект"

Автореферат разослан " _____ " 1975 г.

Защита диссертации состоится " июня " 1975 г.
на заседании Совета факультета "Автоматизация и механизация про-
изводства" Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного
Знамени высшего технического училища имени Н.Э. Баумана по адресу
Москва, 107005, 2-я Бауманская д.5.

Ваши отзывы на автореферат в 2-х экз., заверенные печатью,
просим направлять по указанному адресу.

С диссертаци-
она.

Н.Э. Бау-

M 261786

Типография



1261786

Могильнер И. Ю. Исследования

ВВЕДЕНИЕ

В связи с большими масштабами энергетического строительства при изготовлении и монтаже котлоагрегатов тепловых электростанций, и, в частности, для соединения труб поверхностей нагрева, широко применяют электродуговую сварку. К качеству сварных соединений котельных труб предъявляются весьма жесткие требования. Например, одиночные поры диаметром 0,8 мм и выше правилами контроля недопустимы.

Актуальность проблемы исследования. Существующие методы и схемы радиационного и ультразвукового контроля (УЗ-контроль) не обеспечивают достоверного выявления дефектов недопустимых размеров. В частности, наиболее распространенный при контроле котельных труб УЗ-метод не обеспечивает уверенного выявления недопустимых округлых дефектов: пор, шлаковых включений, их скоплений, свищей. Пропуск таких дефектов может привести к выходу из строя сварного стыка и остановке котлоагрегата в целом. Поэтому, выявление недопустимых дефектов всех видов и, в частности, округлых дефектов в сварных стыках котельных труб является важной задачей стоящей перед дефектоскопией.

Цель исследования - разработка акустических систем повышенной чувствительности и помехоустойчивости и средств для их реализации при контроле сварных стыков котельных труб, выполненных дуговой сваркой. Разработанные средства должны повысить достоверность контроля и заменить менее чувствительные и дорогостоящие методы.

Поставленная цель достигается решением следующих основных задач:

1. Статистический анализ качества сварных соединений.
2. Исследование возможных методов и схем контроля.
3. Теоретико-экспериментальное обоснование параметров выбранной схемы УЗ-контроля.
4. Выбор оптимального типа искусственного эталонного отражателя для оценки величин дефектов.
5. Оценка достоверности разработанного метода.
6. Внедрение разработанного метода в производство.

Методы исследования:

- а) математико-статистический аппарат использован при определении видов и размеров дефектов в сварных соединениях исследуе-

мых конструкций, а также при оценке достоверности разработанного метода;

б) теоретико-экспериментальные методы применены для определения оптимальных параметров акустического тракта призматических раздельно-совмещённых искателей (РС-искатели);

в) экспериментальные методы использованы для получения сравнительной оценки размеров дефектов по результатам УЗ-контроля и вскрытия.

Научная новизна. Предложена новая акустическая система повышенной чувствительности и помехоустойчивости, и дана теория её расчёта.

Практическая ценность. В результате проведённых исследований разработана методика УЗ-контроля и предложены новые призматические РС-искатели. Методика позволяет заменить радиационные просвечивание и существующие методики и схемы УЗ-контроля сварных стыков котельных труб, выполненных дуговой сваркой. Предлагаемая методика значительно снижает себестоимость контроля по сравнению с существующими.

Апробация работы. Разработанные методика и средства УЗ-контроля прошли лабораторное и производственное опробование на сварных образцах с искусственными и реальными дефектами. Ультразвуковые призматические РС-искатели внедрены на Подольском машиностроительном заводе им.Орджоникидзе (ЗИО). Сравнение результатов контроля реальных сварных соединений, проведённого по предложенной методике и с помощью многопозиционного рентгеновского контроля и частичного вскрытия, показало высокую достоверность предложенного способа контроля. Проведена подготовка к внедрению разработанной методики на других предприятиях, выпускающих котельное оборудование.

Объём работы. Диссертация написана на 152 листах, содержит 50 рисунков, 11 таблиц и библиографический указатель из 94 наименований.

Глава I. Исследование объекта и методов его контроля

Исследуемым объектом является стыковое соединение труб диаметром $D = (28+60)$ мм и толщиной стенки $\delta = (3+7)$ мм. Трубы, изготовленные из теплоустойчивых сталей марок 12Х1МФ и 20, сваривают комбинированным методом, с проваркой корня шва неплавящимся электродом в среде аргона и заполнением разделки ручной или автоматической сваркой плавящимся электродом в среде углекислого газа.

Для научно-обоснованного выбора метода и схемы контроля необходимо знать статистические данные по качеству объекта контроля и появляющимся при сварке дефектам.

По данным ЗИО за 1973 г., для изготовления элементов котлов использовали трубы следующих диаметров: 28, 32, 38, 42, 45, 48, 57 мм при толщине стенки 3+7 мм. Установлено, что наибольший объем применения (45%) находят трубы с толщиной стенки 4 мм.

Анализ дефектности производился на основании многопозиционного рентгеновского просвечивания и частичного вскрытия сварных образцов. Установлено, что основными дефектами в исследуемых сварных соединениях являются: одиночные поры (42%), цепочки пор (31%), шлаковые включения (15%), свищи (6,5%) и непровары (6%). При этом статистический анализ показал, что распределение размеров наиболее часто встречающихся дефектов - одиночных пор - подчинено закону Вейбулла:

$$f_p(x) = 8,1 x \cdot \exp \left[-\left(\frac{x}{0,5} \right)^2 \right] \quad (I)$$

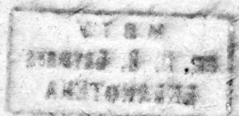
Решение этого уравнения показывает, что одиночные поры недопустимого размера составляют 10+12%, т.е. $Вер(X > x_n) \approx 0,1 - 0,12$.

Статистический анализ также показал, что объемные дефекты расположены, как правило, в середине и корне шва, а непровары - только в корне шва.

Таким образом, анализ объекта контроля, видов встречающихся дефектов, их размеров и ориентации показывает, что принципиально возможные методы контроля стыков котельных труб - радиационная и УЗ-дефектоскопия.

С целью исследования возможностей рентгеновского контроля исследуемого объекта, проводилось его просвечивание на оптимальных режимах. Эксперименты и замеры оптической плотности потемнения снимков показали, что из-за резких изменений эквивалентной толщины изделия радиграфический контраст на дефектном участке может составить величину меньшую, чем практически различимая, и недопустимые дефекты будут не выявлены. Кроме того, контрастность по периметру дефекта различна, что затрудняет оценку его размера. Также, не выявляются дефекты с малой величиной раскрытия, особенно непровары по притуплению кромок.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что радиационная дефектоскопия не обеспечивает надежного



выявления недопустимых дефектов в исследуемых соединениях, обладает малой оперативностью и дороговизной. Поэтому предметом дальнейших исследований явилась УЗ-дефектоскопия.

Согласно литературным данным основными сложностями при УЗ-контроле сварных стыков котельных труб являются: высокий уровень помех от обратного валика шва; большая ширина усиления валика шва, ограничивающая зону перемещения искателя; преобладание округлых дефектов сварки и жёсткость норм их допустимости.

В работе проанализированы применяемые совмещённые схемы УЗ-контроля с плоским пьезоэлементом и с фокусировкой пучка.

Исследованиями установлено, что основным недостатком этих схем является высокий уровень помех и плохая выявляемость округлых дефектов и свищей. Кроме того, эти искатели не обеспечивают прозвучивание всего рабочего сечения шва; при их использовании затруднена селекция сигналов от дефектов и провисаний валика шва.

На основе теоретических и экспериментальных исследований нами предложен новый способ УЗ-контроля сварных стыков тонкостенных труб, реализуемый с помощью специального РС-искателя, который лишён недостатков известных схем.

Глава II. Теоретическое и экспериментальное обоснование оптимальных параметров акустических систем

В работе исследован акустический тракт предложенных систем и теоретико-экспериментальным путём определены их оптимальные параметры. На основе выполненных исследований получены выражения для выбора оптимальных параметров искателей и создана единая методика их расчёта.

Расчёты оптимальных параметров велись с учётом следующих условий:

- 1) Центральный луч УЗ-пучка проходит через центр шва, и при этом распространяется в плоскости, проходящей через хорду сечения трубы и параллельной её оси;
- 2) Максимальное приближение точки ввода центрального луча к шву ограничено стрелой искателя;
- 3) Максимальное удаление точки ввода центрального луча от шва ограничивается величиной, при которой угол встречи луча с дефектом не меньше, чем значение третьего критического угла.

Аналитическое решение задачи позволило обосновать следующие параметры

УЗ-искателей (рис.1): угол γ - центральный угол, фиксирующий положение точек ввода на поверхности трубы; угол Δ_1 - угол поворота плоскости падения центрального луча вокруг нормали к трубе в точке падения, относительно оси трубы; угол β - угол падения центрального луча; параметр 2ℓ - расстояние между точками ввода излучателя и приёмника предложенного искателя. (табл.1).

Полученные значения параметров были проверены на сконструированной установке в иммерсионном, а затем контактном вариантах. Проверка производилась на тест-образцах из труб с выполненными в стенке трубы искусственными дефектами в виде плоскодонных и сферических отражателей ϕ 1 мм.

При выборе оптимальных углов наклона и положения точек ввода на поверхности трубы учитывались следующие условия:

- 1) Прохождение акустической оси через центр шва;
- 2) Падение крайних лучей пучка через границу валика шва и основного металла.

В результате экспериментов были получены зависимости амплитуды эхо-сигнала от угла наклона плоскости расположения пьезоэлементов, и от угла разворота пьезоэлементов в этой плоскости. Были установлены оптимальные значения этих углов.

На основании теории и эксперимента в работе были получены расчётные формулы для определения оптимальных значений углов наклона пьезопластины.

Из анализа акустического тракта предложенных УЗ-систем установлена идентичность УЗ-поля искателей для всех исследуемых типоразмеров труб. Экспериментальная проверка теории производилась на 3-х типоразмерах: ϕ 32x4 мм, ϕ 42x4 мм, ϕ 57x4 мм. Полученные значения параметров (табл.1) показали некоторое расхождение результатов эксперимента и теоретического расчёта для образцов размером ϕ 32x4 мм и ϕ 42x4 мм.

Такие расхождения теории и эксперимента могут быть вызваны следующими причинами:

- 1) Интерференция лучей, идущих в прямом направлении на дефект, с лучами претерпевшими отражение от внутренней стенки трубы;
- 2) Влияние боковых лепестков диаграммы направленности;
- 3) Изменение коэффициента прохождения ультразвука по энергии через криволинейную поверхность труб;
- 4) Изменение коэффициента отражения от дефекта при прозвучи-

Таблица I

Параметры искателей типа РСМ-II

Марка искателя	Метод	γ	β	Δ_1	β'	2ℓ мм
РСМ-II-2 ($\varnothing 32$ мм)	теор.	29°	54°	$37^\circ 30' - 38^\circ 50'$	$40^\circ 00' - 40^\circ 50'$	15,6
	эксп.	$36^\circ 50'$	53°	$44^\circ 40'$	$43^\circ 00'$	19,2
РСМ-II-4 ($\varnothing 42$ мм)	теор.	$25^\circ 10'$	54°	$36^\circ 40' - 42^\circ 00'$	$39^\circ 30' - 42^\circ 40'$	19,8
	эксп.	$31^\circ 45'$	$53^\circ 30'$	$45^\circ 30'$	$42^\circ 10'$	22
РСМ-II-7 ($\varnothing 57$ мм)	теор.	$21^\circ 30'$	54°	$36^\circ 00' - 45^\circ 00'$	$39^\circ 00' - 44^\circ 10'$	21
	эксп.	$21^\circ 00'$	$52^\circ 10'$	$38^\circ 30'$	$38^\circ 40'$	20,4

вании труб разного диаметра;

5) Влияние отражающих свойств искусственного отражателя.

Для выяснения причин указанных расхождений каждая из выдвинутых гипотез была проверена экспериментальным или расчётным методами. Проведённые исследования показали, что преобладающее влияние на расхождение результатов теории и эксперимента оказывают интерференционные явления, вызываемые наличием внутренней отенки трубы. Кроме того, в области малых диаметров труб ($D = 28+40$ мм) оказывает влияние ограниченная прозрачность границы плексиглас - сталь для части лучей, падающих под углами близкими ко второму критическому.

Проведённый анализ позволил создать инженерную методику расчёта оптимальных углов наклона пьезопластики и положений точек ввода искателя для труб диаметром $D = 28+64$ мм и толщиной отенки $\delta = 3+7$ мм.

Методика предусматривает определение значений углов γ и Δ_1 из графиков (рис.1), и аналитический расчет остальных параметров искателей с помощью выражений (2), (3), (4), а также выражений (5), (6), (7)

$$2\ell = D \cdot \sin \gamma \quad (2)$$

$$\beta' = \arctg (\tg \beta \cdot \sin \Delta_1) \quad (3)$$

$$\beta'' = \arctg \left[\frac{\sin \beta'}{\tg \Delta_1 \cdot \cos(\gamma + \beta')} \right] \quad (4)$$

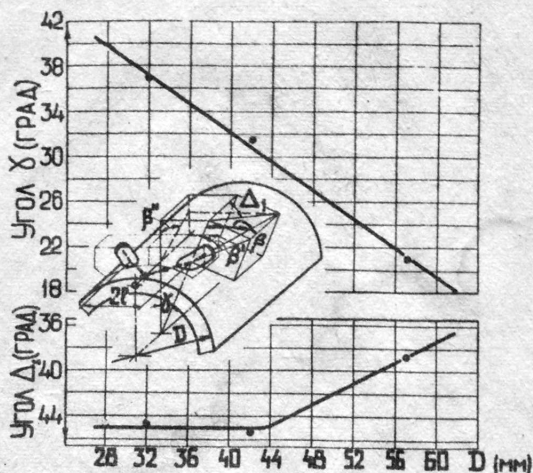


Рис.1. К расчёту оптимальных параметров искателя

Методика расчёта оптимальных параметров разработанных акустических систем была опробована на искателях для сварных соединений труб размером $\varnothing 48 \times 4$ мм. Рассчитанные и изготовленные искатели этого типоразмера были испытаны на реальных сварных соединениях и показали, что отвечают поставленным требованиям.

В работе также были определены: 1) рабочая частота; 2) размер и форма пьезоэлемента; 3) длина акустической задержки; 4) стрела искателя.

Выбор рабочей частоты определяется реальной чувствительностью контроля, необходимой для выявления недопустимых дефектов. Учитывая толщину и конфигурацию контролируемых сварных соединений, размер недопустимых дефектов ($2\delta \geq 0,8$ мм), а также результаты теоретических и экспериментальных исследований установлено, что оптимальной частотой УЗ-колебаний является 5 Мгц.

Размер пьезопластин определяли расчётным путём, по выражениям для раздельно-совмещённых искателей, полученных в работах Алёшина Н.П.; он составил $2\alpha = 5$ мм. При этом, величина αf , характеризующая направленность излучения, составила 12,5 мм Мгц, т.е. она соответствует значениям рекомендуемым другими авторами (Ермолов И.Н., Шербинский В.Г., Гурвич А.К.).

В работе показано, что для предотвращения появления интенсивной поверхностной волны в контролируемом изделии, форма пьезопластин искателя должна быть сегментной. Высота сегментного пьезоэлемента определяется с помощью выражений (5), (6), (7)

$$h_{n2} = R + a \quad (5)$$

$$h = R [\sin \beta'_{kr} - \sin \beta'] \quad (6)$$

$$\beta'_{kr} = \arccos 0,54 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta'' \cdot \cos^2 (\gamma + \beta')} \quad (7)$$

где a - радиус пьезопластины;

R - номинальный радиус трубы.

Выбор длины акустической задержки производился из условия нахождения излучателя и дефекта в дальней зоне относительно друг друга.

Определение минимальной стрелы искателя, при известных значениях остальных параметров, производилось путём строгого решения пространственной задачи по нахождению экстремума линии пересечения лучевой трубки с поверхностью контролируемой трубы.

Решение этой задачи показало, что для рассматриваемого диапазона размеров труб минимальная стрела искателя должна составлять 5+5,5 мм.

Полученные оптимальные значения параметров позволили изготовить опытные образцы призматических РС-искателей, которые были опробованы на сварных швах с искусственными и естественными дефектами труб трёх типоразмеров. При этом исследовалось изменение чувствительности при перемещении искателя вдоль трубы, и изменение чувствительности по толщине стенки трубы. Эксперименты показали, что при перемещении искателя от границы валика шва на 1-2 мм, амплитуда эхо-сигнала изменяется незначительно - 1,5+2,0 дБ, т.е. изменение ширины валика шва на такую величину не приведёт к ошибке в оценке размера дефекта. Нервномерность чувствительности по толщине стенки трубы, определённая на реальных дефектах размером 0,8 мм, незначительна и не превышает 3-4 дБ; такой размах значений амплитуды эхо-сигнала не приведёт к значительным ошибкам контроля.

Проведённые экспериментальные исследования показали, что раз-

рабочавные искатели обеспечивают уверенное выявление округлых дефектов размером 0,8 мм и выше по всему рабочему сечению шва при минимальном уровне помех от усиления валика шва. При этом не требуется поперечного сканирования искателя.

В работе также проводилось экспериментальное сравнение уровней помех разработанного искателя и существующего, работающего по совмещенной схеме. Для этого использовались образцы реальных сварных соединений, с выполненными в них искусственными плоскодонными отражателями. Экспериментально установлено, что помехоустойчивость разработанных искателей выше, чем у серийных на 10-12 дБ. С помощью разработанных искателей можно уверенно выявлять искусственный плоскодонный отрагатель $\varnothing$ 1 мм, расположенный посередине высоты шва, который не может быть выявлен с помощью серийного совмещенного искателя.

Таким образом, разработанные призматические раздельно-совмещенные искатели удовлетворяют поставленным требованиям: 1) обеспечивают прозвучивание всего рабочего сечения шва; 2) обладают пониженным уровнем помех; 3) выявляют одиночные поры размером 0,8 мм и выше; 4) не требуют поперечного сканирования искателя при контроле сварных соединений, что существенно упрощает контроль.

Глава III. Оценка величины дефектов при УЗ-контроле исследуемых соединений

При разработке методики УЗ-контроля сварных соединений одной из важнейших задач является выбор способа оценки величины дефектов.

В работе показано, что поскольку для рассматриваемых сварных соединений выполняется условие $\frac{b}{\lambda} \gg 0,6$, где b — радиус дефекта, а λ — длина волны излучения, то согласно исследований Ермолова И.Н., Ланге Д.В. дефекты следует относить к малым, и, следовательно, оценивать их размеры по амплитудному признаку.

В работе рассмотрены 2 основных метода оценки размеров по амплитудному признаку: 1) эталонный; 2) безэталонный. Анализ преимуществ и недостатков обоих методов, и возможностей применения каждого из них при контроле сварных стыков котельных труб с использованием предложенных искателей показывает, что более приемлемым является эталонный метод. Это связано с тем, что в настоящее время отсутствует строгое решение уравнения акустического тракта для РС-искателя, и не представляется возможным построить АРД-диаграммы и реа-

лизовать безэталонный метод. С другой стороны, отсутствие донной поверхности, криволинейность поверхности ввода и особенности принятой схемы контроля затрудняют применение безэталонного метода.

Поэтому при контроле исследуемых сварных соединений следует использовать тест-образцы с искусственными дефектами.

Искусственные дефекты для настройки чувствительности дефектоскопа при контроле исследуемых сварных соединений должны отвечать следующим требованиям:

- 1) легкая воспроизводимость и высокая стабильность амплитуды эхо-сигнала от отражателя;
- 2) монотонность амплитуды эхо-сигнала при изменении размера отражателя;
- 3) малые абсолютные размеры отражателя;
- 4) простота изготовления;
- 5) возможность применения при работе искателями с разными углами ввода.

В работе рассмотрены искусственные отражатели, которые в принципе могут быть использованы для рассматриваемых сварных соединений и принятой схемы контроля:

- 1) отверстие с плоским дном; 2) отверстие со сферическим дном;
- 3) угловой плоский отражатель ("зарубка"); 4) вертикальный цилиндрический отражатель; 5) плоский торец трубы.

Экспериментальное исследование и анализ этих типов отражателей показали, что поставленным требованиям лучше всего отвечает вертикальное цилиндрическое сверление. Главным его достоинством является высокая воспроизводимость результатов измерения амплитуды эхо-сигнала, а также простота изготовления. Поэтому такой тип отражателя был принят нами как основной и в дальнейшем исследовался в работе.

Анализом путём доказано, что для принятых параметров контроля и размере отражателя $\varnothing (0,8-2,4)$ мм, индикатриса обратного рассеяния от вертикального сверления в рассматриваемой области углов носит монотонный характер.

Для выбора оптимального размера отражателя исследована зависимость амплитуды эхо-сигнала от диаметра и высоты отражателя. Эксперименты показали, что в качестве искусственных эталонных отражателей могут быть использованы вертикальные цилиндрические сверления следующих размеров: образец $\varnothing 32 \times 4$ мм — отражатель

Ø (1; 1,8; 2 мм); образец Ø 42x4 мм - отражатель Ø (0,8+2,4) мм; образец Ø 57x4 мм - отражатель Ø (1,2+2,0) мм. Высота вертикального сверления для всех типоразмеров труб может составлять (0,5+4) мм.

Кроме того, для оценки воспроизводимости результатов контроля было исследовано влияние неперпендикулярности оси отверстия к поверхности трубы на амплитуду эхо-сигнала. Эксперименты показали, что неперпендикулярность $\pm 2^\circ$ вызывает разброс значений амплитуды эхо-сигнала на величину 3-4 дБ, что значительно меньше, чем у углового плоского отражателя (5+8 дБ).

С целью выбора уровня настройки чувствительности дефектоскопа было проведено экспериментальное исследование характеристик дефектов по результатам УЗ-, рентгеновского контроля и частичного вскрытия. В результате была получена зависимость амплитуды эхо-сигнала от размера одиночной поры. Зависимость носит линейный характер и может быть описана регрессией вида $y = 7,2x - 12,5$ с коэффициентом корреляции $r = 0,85$. Эта зависимость позволяет выбрать уровень амплитуды эхо-сигнала от дефекта браковочного размера, т.е. эталонировать чувствительность дефектоскопа на основании данных по реальным дефектам. Например, для сварных соединений труб Ø 57x4 мм браковочный уровень чувствительности составляет примерно II дБ по отношению к амплитуде от сквозного вертикального сверления Ø 2 мм.

Глава IV. Технология УЗ-контроля труб поверхностей нагрева и оценка достоверности разработанной методики контроля

На основе лабораторных исследований и производственного опробования разработана технология УЗ-контроля сварных стыков котельных труб. При контроле рекомендовано использовать серийные дефектоскопы, имеющие калиброванный аттенуатор.

Настройку чувствительности дефектоскопа производят по тест-образцам со сквозным вертикальным сверлением.

Высокая воспроизводимость результатов контроля может быть достигнута при высокой точности соблюдения параметров искателя. Такая точность при изготовлении искателя достигается применением специального технологического цилиндра с отверстиями, задающими направление акустическим задержкам при сборке искателя.

По разработанной технологии изготовлено более 30 искателей разного типоразмера. Испытания показали, что технология сборки

искателей обеспечивает требуемую точность их параметров.

При дефектоскопии сварных соединений важное значение имеет знание достоверности её результатов. В этом направлении известны работы Шрайбера Д.С., Гуряича А.К., Николаевой Л.А., Брусенцовой Р.М. и др.

Использованы математические модели оценки достоверности и статистической выявляемости дефектов по альтернативному признаку и соответствующие расчётные формулы.

В диссертации оценку размеров дефектов производили по амплитудному признаку. Проведено сопоставление результатов УЗ-контроля с рентгеновским просвечиванием и частичным вскрытием 30 участков сварного шва. Установлено, что имеет место линейная регрессионная связь математического ожидания амплитуд эхо-сигналов и площадей дефектов. Амплитуды эхо-сигналов от дефекта заданного размера распределены по нормальному закону. При этом распределение вероятностей выявления дефекта нормативного размера будет характеризоваться интегральной кривой обнаружения дефектов $F(A)$.

Вероятности поглощения дефектов разных размеров в сварных швах рассматриваем как случайные величины, которые отвечают статистическому распределению с плотностью вероятностей $f_p(x)$ (1).

Общее количество выявленных дефектов может быть определено как композиция функций обнаружения дефектов $F(A)$ и плотности распределения их размеров $f_p(x)$. Показатель статистической выявляемости одиночных пор, рассчитанный по изложенной методике, составил около 78%.

Сравнительную достоверность метода контроля оцениваем путём сопоставления данных УЗ-контроля и рентгеновского просвечивания на оптимальных режимах по всем видам дефектов.

Расчёты проведённые с использованием "матрицы достоверности" по результатам контроля более 300 участков сварных швов показали, что достоверность разработанного метода контроля составляет около 92%.

Заключение. Выводы по работе.

I. Выполнен комплекс экспериментально-теоретических исследований с целью создания средств УЗ-контроля, обеспечивающих выявление округлых дефектов размером 0,8 мм и выше, а также других

недопустимых дефектов, расположенных по всему рабочему сечению сварных швов котельных труб, выполненных дуговой сваркой.

2. Статистическим анализом качества изготовления сварных стыков труб поверхностей нагрева установлено, что основными дефектами при сварке этих стыков являются одиночные поры (42%), скопления пор (31%), шлаковые включения (15%). Эти дефекты в основном расположены в средней и нижней частях шва. Непровары (6%) встречаются только в корне шва по притуплению кромок.

3. Установлено, что наиболее целесообразным методом контроля сварных соединений котельных труб, выполненных дуговой сваркой, является УЗ-метод с использованием предложенных РС-искателей. Они обладают высокой чувствительностью к выявлению указанных дефектов, расположенных в любом месте рабочего сечения шва. Методика контроля предложенными искателями проста и обеспечивает высокую производительность и экономическую эффективность.

Установлено, что наиболее оптимальным методом определения размеров дефектов является эталонный метод с оценкой по амплитудному признаку.

4. На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований установлены оптимальные параметры призматических РС-искателей для сварных соединений котельных труб. Разработана инженерная методика расчёта оптимальных параметров предложенных акустических систем для сварных швов труб диаметром $D = 28+64$ мм при толщине стенки $\delta = 3+7$ мм.

5. Установлено, что разработанные искатели обладают повышенным по сравнению с осевыми искателями отношением "сигнал/помеха" на 10-12 дБ, что позволяет выявлять одиночные поры размером 0,8 мм и выше, расположенные в любом месте расчётного сечения шва.

На основании экспериментального исследования зависимости амплитуды эхо-сигнала от размера реальных дефектов установлен нормативный уровень браковочной чувствительности дефектоскопа, обеспечивающий надежное выявление недопустимых дефектов.

6. Разработан и экспериментально проверен способ оценки размеров дефектов с использованием тест-образцов с искусственными дефектами в виде вертикального цилиндрического отката.

7. Разработаны, изготовлены и внедрены в производство специальные РС-искатели, обеспечивающие высокую производительность контроля и высокую достоверность выявления всех недопустимых дефектов,

расположенных по всему рабочему сечению шва.

8. Разработана и внедрена методика УЗ-контроля сварных соединений котельных труб диаметром $D = 28464$ мм при толщине стенки $\delta = 3+7$ мм.

В результате сопоставления данных УЗ-контроля с рентгеновским просвечиванием и частичным вскрытием более 300 участков сварных швов установлено, что достоверность ультразвукового контроля составляет около 92%.

9. Экономическая эффективность от внедрения УЗ-контроля взамен рентгенографии составляет около 30 тыс. рублей в год по заводу средней мощности.

Результаты работы докладывались на 3-х конференциях.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Волков А.С., Клишкин Г.П., Мотильнер И.Ю. Некоторые вопросы ультразвукового контроля качества кольцевых швов труб поверхностей нагрева. В сб. "Ультразвуковой контроль сварных соединений". И., ЛДНП, 1972.

2. Алёшин Н.П., Волченко В.Н., Райхман А.З., Мотильнер И.Ю., Кудряшов Ю.М. Пути повышения надежности от ультразвукового контроля стыковых и угловых соединений тонкостенных труб. В сб. "Неразрушающий контроль материалов, изделий и сварных соединений", М., ЦИ НТО ПРИБОРНОМ, 1974.

3. Мотильнер И.Ю. Расчёт оптимальных углов наклона швов элементов ультразвукового искателя. Известия ВУЗов СССР, "Машиностроение", М., Изд. МВТУ, 1974, № II.

4. Алёшин Н.П., Волченко В.Н., Мотильнер И.Ю. Ультразвуковой контроль сварных стыков труб поверхностей нагрева котлоагрегатов. Материалы III Закавказской конференции по внедрению в производство сварочной техники, Тбилиси, "Мецниереба", 1974.

5. Алёшин Н.П., Мотильнер И.Ю. Повышение уровня сигнала/помехи при ультразвуковом контроле сварных соединений труб. "Дефектоскопия", 1975, № I.