

1551255

На правах рукописи

ГОРНАЯ Светлана Павловна

РАЗРАБОТКА ОБОБЩЕННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
АУСТЕНИТНЫХ СВАРНЫХ ШВОВ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ
ДОСТОВЕРНОСТИ ИХ КОНТРОЛЯ.

Специальность 05.02.11 - Методы контроля и диагностики
в машиностроении

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук.



Москва - 1996

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

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор АЛЕШИН Н. П.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Щербинский В. Г.

кандидат технических наук
Вадковский Н. Н.

Ведущее предприятие - АО "Криогенмаш"

Защита диссертации состоится "27" июня 1996г. в 14³⁰ ча-
сов на заседании диссертационного совета Д 053.15.07 при Мос-
ковском государственном техническом университете им. Н. Э. Баума-
на по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в 1 экз., заверенный печатью,
просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ
им. Н. Э. Баумана.

Телефон для справок 267-09-63.

Автореферат разослан "24" мая 1996г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА

К. Т. Н. доцент


Шип В. В.

Подписано к печати 21. 05. 96 г.

Тип. МГТУ

Тираж 100 экз.

Объем 1 п. л.

Заказ N 194.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Расширение сферы использования нержавеющих сталей в различных отраслях промышленности и низкая чувствительность традиционно используемого радиографического метода контроля к наиболее опасным плоскостным дефектам приводит к необходимости разработки ультразвукового метода контроля аустенитных сварных швов. В последние годы достигнут прогресс в этой области: разработаны методики ультразвукового контроля сварных соединений из аустенитных сталей, основанные на использовании при контроле продольных волн, фокусирующих, раздельно-совмещенных и ЭМА преобразователей. Однако, все эти методики имеют ограниченное применение, так как разработаны эмпирическим путем для определенных видов швов. Поэтому достигнутый прогресс является небольшим по сравнению с уровнем техники ультразвукового контроля ферритных сварных швов.

1551255
Трудности ультразвукового контроля аустенитных сварных швов обусловлены крайне грубой анизотропной структурой материала (размеры зерен, обычно, сравнимы с длиной ультразвуковой волны или несколько меньше). При прохождении через анизотропный металл сварного шва ультразвуковой пучок будет отклоняться и деформироваться, что может привести к ошибкам при определении местоположения дефектов и их размеров. Но даже, если возможно предсказать направление луча и деформацию пучка, контроль будет затруднен из-за значительного ослабления и обратного рассеяния ультразвука, вследствие рассеяния в поликристаллическом материале шва. Кроме того, структура основного металла, в отличие от металла шва, мелкозернистая и изотропная, что вызывает отражение, преломление и изменение моды на границе сплавления.

Существующие в настоящее время акустические модели распространения ультразвуковых волн касаются только геометрических эффектов анизотропии и могут быть использованы для определения траектории ультразвукового луча в сварном шве. Ослабление волн, с их помощью, предсказать нельзя. Для того, чтобы методики ультразвукового контроля аустенитных сварных швов назначались не эмпирически, необходимо знать влияние всех факторов ослабления ультразвуковых волн. Поэтому разработка обобщенной акустической

1

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1551255

Горная С.П. Разработка обс



модели аустенитных сварных соединений, связывающей акустические и сварочные параметры, является актуальной задачей ультразвуковой дефектоскопии.

Цель работы и основные задачи исследования. Целью работы является повышение достоверности ультразвукового контроля стыковых сварных соединений из аустенитных сталей.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести анализ строения аустенитных сварных швов и существующих способов их моделирования.
2. Построить расчетные акустические модели анизотропных поликристаллических сред.
3. Теоретически и экспериментально обосновать обобщенную акустическую модель аустенитного сварного соединения.
4. Разработать специализированные акустические системы с выравненной чувствительностью, позволяющие повысить достоверность контроля.

Научная новизна полученных результатов. Впервые дано полное обоснование прохождения ультразвуковых волн по всем зонам аустенитного сварного соединения с учетом энергетики рассеяния волн:

- получены аналитические выражения коэффициентов затухания плоских упругих волн в металле сварного шва;
- для поперечно-изотропной среды направление переноса энергии плоской ультразвуковой волны выражено через упругие постоянные среды и направление падения волны;
- ослабление сигнала на оси ультразвукового поля, вследствие раскрытия луча, определено с учетом деформации ультразвукового пучка в сварном шве.

Практическая ценность и результаты работы. 1. Рассчитано и опытно-экспериментальным путем проверено ослабление ультразвуковых волн при прохождении аустенитных стыковых сварных соединений различных видов, что позволяет оптимизировать параметры контроля. 2. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований влияния аустенитного сварного шва на прохождение ультразвуковых волн разработаны раздельно-совмещенные преобразователи, с чувствительностью, выравненной по высоте аустенитного сварного шва, что позволяет повысить достоверность и производительность контроля.

3. Разработана методика ультразвукового контроля аустенитных стыковых сварных швов толщиной $6 + 20$ мм.

Разработанные акустические преобразователи и методика контроля прошли апробацию в НПО "Криогенмаш". Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения составил 15,4 тыс. рублей (на план НПО 1990 года)

Методы исследования. Построение расчетной схемы аустенитного сварного соединения выполнялось путем имитационного моделирования, согласно известной из теории кристаллизации его макроструктуры. При решении задачи рассеяния ультразвуковых волн на структурных неоднородностях использовался метод объемных интегральных уравнений типа Липпмана-Швингера.

Расчет деформации и направления прохождения ультразвуковых пучков через анизотропную среду проводился с учетом положений волновой и геометрической акустики.

При исследовании кристаллитного строения аустенитных сварных швов использовались экспериментальные методы.

Достоверность разработанного метода контроля определялась с применением методов математической статистики.

Апробация. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

1. Научно-техническом семинаре "Современные физические методы и средства неразрушающего контроля". Москва, 1988г.

2. Научном семинаре кафедры МТ-7 МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва; 1990г.

3. XII Всесоюзной конференции "Неразрушающие физические методы контроля". Свердловск, 1990г.

4. VI Республиканской научно-практической конференции "Неразрушающий контроль-90". Рига, 1990г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 3 печатные работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы (70 наименований).

Работа изложена на 110 страницах, иллюстрируется 47 рисунками, содержит 6 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность диссертационной работы, обоснована ее цель, сформулирована научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводился анализ строения аустенитных сварных швов для различных способов и режимов сварки. С помощью металлографического анализа установлено, что аустенитный сварной шов по своему строению представляет многозонную систему. На уровне макроструктуры можно выделить 4 характерные зоны: основной металл, зона термического влияния, граница сплавления и металл шва. Особый интерес представляет металл сварного шва, имеющий транскристаллитное строение. Ориентация и размер кристаллитов находятся в достаточно строгой зависимости от режимов сварки, типоразмера сварного соединения и условий теплоотвода. Так в однопроходных швах кристаллиты имеют направление от границы сплавления к центру шва. Для ряда случаев многопроходной сварки характерным является параллельный рост кристаллитов в центральной части шва. При наличии различия в кристаллитном строении структура металла шва может быть однофазной (аустенитной) или двухфазной (аустенитно-ферритной и др.).

Сложное строение аустенитных сварных швов затрудняет проведение ультразвукового контроля. В настоящее время действует ряд методик ультразвукового контроля, позволяющих частично решить данную проблему. Это методики, основанные на использовании стандартных ультразвуковых приборов и совмещенных преобразователей, работающих как на продольных ("Крауткремер"), так и на поперечных волнах (НИИХИММАШ) с фокусировкой звукового поля ("Карл Дойч", "Крауткремер") или без нее. ЦНИИТМАШ и МГТУ применяют при контроле аустенитных швов раздельно-совмещенные преобразователи. Разработана специальная аппаратура для проведения контроля многочастотным методом (НИКИМТ) и с помощью ЭМА преобразователей, обеспечивающих ввод в изделие SH волн. Принципиально новый подход к проблеме ультразвукового контроля аустенитных сварных швов основан на использовании акусто-сварочной модели (МГТУ), позволяющей определить параметры контроля в зависимости от структуры и схемы кристаллизации сварного шва.

Однако, методики контроля аустенитных сварных швов, в большинстве случаев, разработаны эмпирическим путем и их использование сопря-

жено с большими трудностями для преодоления которых отечественные и зарубежные исследователи пытаются расчетным путем связать параметры ультразвукового контроля с параметрами структуры. М.Силк в своей первой модели рассматривает распространение ультразвуковых волн в сварном шве как в монокристалле кубической системы. Двухструктурная модель В.В.Гребенникова связывает помехи при контроле с размерами структурных отражателей. Используя поперечно-изотропную модель (М.Силк, Н.Вадковский), определяют угол отклонения фазовой скорости от групповой для трех типов волн. В компьютерной модели М.Силка для определения угла отклонения луча от волновой нормали сварной шов разбивается на ряд областей с различным наклоном кристаллитов и упругими свойствами. Лучевая геометрическая модель О'Гилви позволяет определить групповую и фазовую скорости трех типов волн.

Во всех моделях учитывается структура шва без учета технологии сварки. С помощью акусто-сварочной модели (Н.П.Алешин, Н.Н.Волкова) установлено наличие функциональной зависимости параметров ультразвукового контроля от параметров сварки с учетом оптимального распространения ультразвукового пучка.

Анализ расчетных моделей показал, что они не учитывают в полной мере реальной структуры сварных соединений. Модели применимы только для предсказания геометрических эффектов анизотропии. Это вызвало необходимость построения акустических моделей, позволяющих рассчитывать энергетические потери при распространении ультразвуковых волн.

Вторая глава посвящена разработке акустических моделей аустенитных сварных швов. На основе металлографических исследований образцов для расчета акустических параметров аустенитные сварные соединения предлагается моделировать следующим образом:

основной металл - макроскопически изотропная среда (размер зерна много меньше длины ультразвуковой волны);

зона термического влияния - анизотропная поликристаллическая равноосная среда (размер зерна имеет порядок длины волны);

граница сплавления - область изменения упругих свойств;

металл сварного шва - анизотропная поликристаллическая среда (поперечный размер кристаллита имеет порядок длины волны, длина кристаллита значительно больше длины волны).

На границе преобразователь-металл и границе сплавления проис-

ходит изменение распространения и амплитуды ультразвуковых волн, связанное с разницей акустических импедансов граничных сред. Рассеяние волн на зернах основного металла пренебрежимо мало.

Особый интерес представляют зона термического влияния и металл шва, где имеются энергетические потери, обусловленные рассеянием ультразвуковых волн на границах зерен.

Для расчета рассеяния ультразвуковых волн в этих зонах смоделируем их в виде совокупности разориентированных между собой зерен (рис. 1).

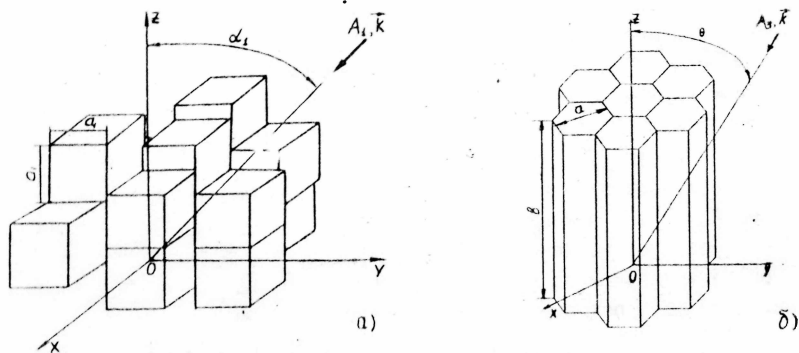


Рис. 1. Модели зоны термического влияния сварки (а) и аустенитного шва (б)

При этом будем полагать, что зерна зоны термического влияния представляют собой кубы с ребром a_1 , а кристаллиты сварного шва — правильные шестигранные призмы длиной b и поперечного размера a и находятся в тесном контакте друг с другом. При этом рассеиватели в каждой зоне имеют одинаковые акустические свойства и характеризуются упругими модулями монокристалла, а окружающая их среда — система разориентированных зерен — упругими модулями, полученными путем усреднения упругих модулей монокристалла по возможным его ориентациям. Упругие модули таких неоднородных сред представим в виде:

$$\begin{aligned} C_{ijkl} &= C_{ijkl}^T + \delta C_{ijkl} \quad \text{при } \vec{r} \in V, \\ C_{ijkl} &= C_{ijkl}^T \quad \text{при } \vec{r} \notin V, \end{aligned} \quad (1)$$

где δC_{ijkl} — разница упругих модулей в обеих средах. V — объем

кристаллита, $\vec{r}$ - радиус-вектор точки наблюдения :

Рассматриваем прохождение плоских ультразвуковых волн через эти среды. Для определения рассеянных полей воспользуемся объемным интегральным уравнением типа Липпмана-Швингера. Рассеянные поля рассчитаем в борновском приближении (первое приближение уравнения Липпмана-Швингера) с помощью функции Грина $G_{1j}(\vec{r}, \vec{r}')$

$$U_j^s(\vec{r}, U_1^0) = \int_V G_{1j}(\vec{r} - \vec{r}') f_1(\vec{r}', U_1^0) d\vec{r}', \quad (2)$$

где $f_1(\vec{r}', U_1^0)$ - функция, зависящая от амплитуды падающей волны и описывающая влияние неоднородностей; $\vec{r}$ - радиус-вектор точки наблюдения; $\vec{r}'$ - радиус-вектор источника; V - объем рассеивателя (индекс S обозначает рассеянное поле).

Определяется полная мощность рассеянных волн

$$P_s^s = P_{1x}^s + P_{svz}^s + P_{shx}^s, \quad (3)$$

где P_{1x}^s , P_{svz}^s , P_{shx}^s - мощности рассеянных продольной, вертикально-поляризованной и горизонтально - поляризованной поперечных волн, соответственно.

Коэффициент затухания по амплитуде, обусловленный рассеянием

$$\delta^s = 0.5n P_s^s / I_0, \quad (4)$$

где n - концентрация рассеивателей в единице объема, I_0 - интенсивность падающей волны.

В результате решения указанной задачи получены выражения рассеянных полей в дальней зоне и коэффициенты рассеяния плоских ультразвуковых волн различных поляризаций. Особенно простой вид, характерный для релеевского рассеяния, имеют коэффициенты рассеяния для зоны термического влияния

$$\begin{aligned} \delta_1^s &= 2 \cdot 10^{-3} \cdot a_1^3 k_1^4 [1 + 2(V_1/V_t)^3] \\ \delta_v^s &= \delta_h^s = 2 \cdot 10^{-3} \cdot a_1^3 k_t^4 [2 + (V_t/V_1)^3] \end{aligned} \quad (5)$$

Коэффициенты рассеяния выражены в децибеллах на единицу длины.

Рассеяние не зависит от направления падения волны.

В металле сварного шва коэффициенты рассеяния зависят от направления падения волн

$$\delta_m^s = 3 \cdot 10^{-6} \cdot a^2 b f_m(C_{1jkl}, b, \omega, \theta) \quad (6)$$

где f_m — функция, определяемая упругими свойствами среды, длиной кристаллитов, частотой и углом падения на кристаллиты (индекс m означает поляризацию падающей волны).

Рассеяние уменьшает амплитуду ультразвуковой волны. При этом расстояние, прошедшее волной в шве определялось с учетом отклонения Δ_m акустического луча от волновой нормали. Углы отклонения продольной и поперечных волн в поперечно-изотропной среде были выражены через упругие модули монокристалла аустенита

$$\Delta_r(\theta) = \arctg\{[A \sin 2\theta (\cos^2 \theta - 0.75 \sin^2 \theta)] / [2C_{11} - A(\cos^4 \theta + 2 \sin^2 \theta) / 2]\},$$

$$\Delta_v(\theta) = \arctg\{A \sin 2\theta (\sin^2 \theta - 0.75 \cos^2 \theta) / (2C_{44} + 7A \sin^2 \theta / 8)\}, \quad (7)$$

$$\Delta_h(\theta) = \arctg\{A \sin 2\theta / (8C_{44} + 2A \sin^2 \theta)\}, \quad A = C_{11} - C_{12} - 2C_{44}.$$

Углы отклонения, рассчитанные по (7), согласуются с зависимостями, полученными в работе С. Хисекона с помощью дифференциальной формулы.

В третьей главе проведен анализ влияния геометрических параметров среды и параметров ультразвукового контроля на рассеяние ультразвуковых волн. По полученным выражениям (формулы (5, 6)) построены расчетные зависимости коэффициентов рассеяния в сварных соединениях стали 12Х18Н10Т от размера рассеивателей, частоты и направления вводимых ультразвуковых колебаний.

В зоне термического влияния рассеяние зависит от параметров среды (размера зерен и скорости ультразвуковых волн) и частоты вводимых ультразвуковых колебаний. Зависимость коэффициентов рассеяния продольных и поперечных волн от размера зерна кубическая. Рассеяние растет пропорционально четвертой степени частоты вводимых ультразвуковых колебаний. Расчет коэффициентов рассеяния в зоне термического влияния выполнен для случая $\lambda a_1 / 2 < 1$ ($\lambda / a_1 > \pi$). Т.е., нами получено, что при $\lambda / a_1 > \pi$ в поликристаллической равноосной среде имеет место релеевское рассеяние. Этот результат согласуется с зависимостями, полученными Н. М. Лившицем и Г. Д. Пархомовским для двух предельных случаев: при $\lambda > \lambda a_1$ — имеет место релеевское рассеяние, при $\lambda < \lambda a_1$ — когерентное рассеяние. Так как зона термического влияния представляет собой в среднем

изотропную среду. коэффициенты рассеяния в этой области не зависят от направления падения волн.

Металл сварного шва, в отличие от зоны термического влияния сварки не является равноосной средой. Длина рассеивателя превышает длину ультразвуковой волны. Рассеяние в этой области не подчиняется закономерностям, характерным для равноосных поликристаллических сред. Расчет по формуле (6) показал, что в диапазоне частот, для которых значение $\lambda/a > \pi$, коэффициент рассеяния в металле аустенитного шва приближенно подчиняется закону $\delta^2 \sim a^2 f^3$, не зависит от длины кристаллитов и изменяется при изменении направления падения волн.

Рассматриваемая среда изотропна в направлениях перпендикулярных длинной оси кристаллита, поэтому коэффициенты рассеяния зависят от азимутального угла θ падения на кристаллиты и не зависят от полярного угла γ (ось Z параллельна оси кристаллита). Для всех типов волн всех частот коэффициенты рассеяния обращаются в ноль в случаях, если направление распространения волны или ее поляризация параллельны большой оси кристаллита. Для продольной и горизонтально-поляризованной поперечной волны коэффициенты рассеяния максимальны, если волна распространяется перпендикулярно длинной оси кристаллитов ($\theta = 90^\circ$). Максимум рассеяния поперечной волны вертикальной поляризации наблюдается при угле падения на кристаллиты 45° (рис. 2).

Построенная теория рассеяния ультразвуковых волн в аустенитных сварных соединениях дала возможность для предсказания ослабления ультразвуковых волн при прохождении через аустенитные сварные соединения. При определении ослабления наряду с затуханием, были учтены геометрические факторы ослабления (дивергенция звукового пучка, преломление на границе сплавления, отклонение направления распространения луча от волновой нормали в металле шва, деформация звукового пучка в сварном металле), которые, как и затухание, изменяют амплитуду, но подчиняются другим законам зависимости от расстояния.

При расчете ослабления ультразвукового сигнала сварной шов условно разбивается на области с одинаковым наклоном кристаллитов ($\varphi_k = \text{const}$). В каждой области, через которую проходит ультразвуковой луч, определяют: а) средний размер кристаллитов; б) угол падения волны на кристаллиты θ_1 ; в) коэффициент рассеяния $\delta^2(\theta_1)$;

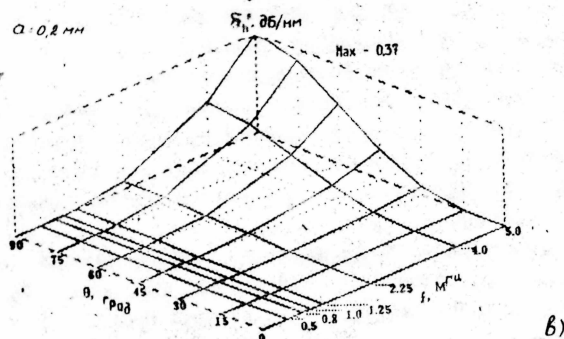
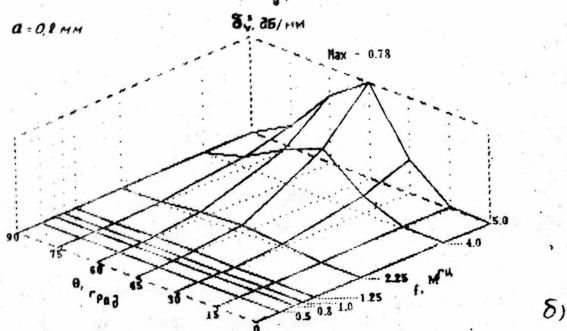
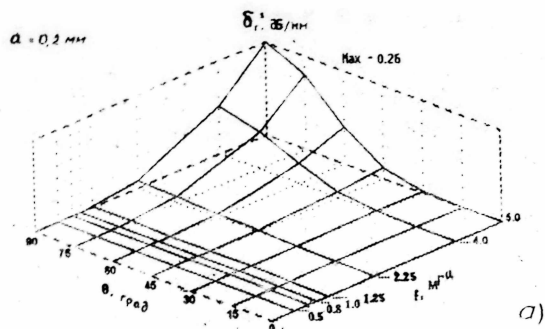


Рис. 2. Коэффициенты рассеяния в металле аустенитного шва продольной (а) и поперечных SV (б) и SH (в) волн

г) отклонение луча от волновой нормали $\Delta(\theta_1)$ и коэффициент деформации пучка $K_{\Delta 1}$; д) расстояние, пройденное лучом по области $r_{\Delta 1}$. Влияние аустенитного сварного шва на ослабление интенсивности ультразвука в общем случае будет определяться по формуле

$$(I/I_0)^n = \exp[-\delta_1^n r_2 - \sum_{i=1}^n \delta_1^n r_{\Delta i}] D_2 \prod_{i=1}^n K_{\Delta i} \cos \Delta \alpha_i \quad (8)$$

где n - число областей, через которые проходит ультразвуковой луч; r_2 - расстояние, пройденное лучом по зоне термического влияния; D_2 - коэффициент прозрачности границы сплавления; $\Delta \alpha_i$ - угол отклонения луча при прохождении сварного шва с первоначального направления.

Численный расчет ослабления согласно (8) был выполнен для сварных швов с различной кристаллитной структурой: с отклонением кристаллитов от вертикальной оси шва и без отклонения кристаллитов. Расчет показал, что для многопроходных сварных швов, кристаллиты которых параллельны между собой и перпендикулярны поверхности шва, минимальное ослабление продольных волн наблюдается при угле ввода 50° . Минимальное ослабление поперечной SV волны - при прохождении волны вдоль кристаллитов или перпендикулярно им. Ослабление поперечной SH волны наименьшее при угле ввода 0° . Объектом исследования являлись стыковые сварные швы, толщиной 8 ± 20 мм, выполненные автоматической сваркой под флюсом без разделки кромок. Металлографическим анализом было установлено, что угол отклонения кристаллитов от вертикальной оси шва находится в пределах $50 \div 70^\circ$. Расчет ослабления поперечных волн по (8) и анализ отклонения луча от волновой нормали (формула (7)) показали целесообразность использования при контроле таких швов угла ввода 60° .

Экспериментальное изучение влияния аустенитного сварного шва на прохождение ультразвуковых волн было проведено на сварных образцах стали 12Х18Н10Т (св-Э-28Х24Н16Г6) толщиной 12 мм, выполненных без разделки кромок автоматической сваркой под слоем флюса. Ослабление поперечных ультразвуковых волн ΔA измерялось как разница между амплитудой $A_{\text{ш}}$ прошедшего сварное соединение сигнала и амплитудой A_0 сигнала, прошедшего основной металл.

$$\Delta A = A_0 - A_{\text{ш}} \quad (9)$$

Углы ввода (α) варьировались от 40 до 70°. Полученные экспериментальные данные подтвердили результаты расчетов: наименьшее значение ΔA , равное 0 ± 2 дБ, наблюдалось при углах ввода 60-65° (рис. 3).

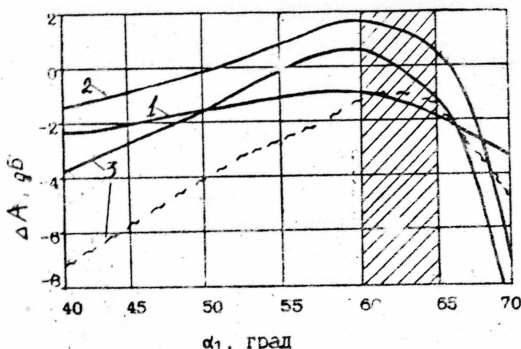


Рис. 3. Ослабление амплитуды поперечной волны частотой 2,5 МГц аустенитным сварным швом

1 - вследствие рассеяния; 2 - вследствие деформации; 3 - полное ослабление. --- расчет; ~~~ эксперимент.

Расчетные и экспериментальные зависимости ослабления от угла ввода достаточно хорошо согласуются между собой. Имеющееся отличие объясняется усреднением реальных структур в расчетных схемах.

Рассеяние ультразвуковых волн в аустенитном сварном соединении, помимо ослабления интенсивности полезного сигнала, приводит к возникновению структурных помех, затрудняющих проведение ультразвукового контроля. При отношении интенсивностей полезного сигнала и шума менее $1,5 \pm 2$ обнаружение дефекта крайне затруднено. В результате, достоверность контроля снижается.

Расчет уровня структурных помех с учетом неравномерности рассеянного поля в среде с непрерывным, случайным изменением ее свойств выполнен в работе В.Д.Коряченко. Установлено, что углы $20^\circ \pm 30^\circ$ с направлением излучения соответствуют минимуму интенсивности структурных помех. Расчет рассеянных полей выполнен для макроскопически - изотропного материала. Металл сварного шва, как определено выше, является макроскопически поперечно-изотропной средой. Используя полученные во второй главе выражения рассеянных полей, мы получили зависимость интенсивности структурных помех от погрязного угла γ между направлением излучения ультразвуковой вол-

ны и направлением наблюдения (ось Z совпадает с осью кристаллита):

$$I_{\Sigma}(\gamma)/I_{\Sigma}^{\max} = \cos^2 \gamma. \quad (10)$$

Зависимость выведена применительно к задачам ультразвуковой дефектоскопии сварных швов, когда излучающий и приемный преобразователи находятся с одной стороны изделия в одной точке (совмещенная схема) или в близко расположенных точках (раздельно-совмещенная схема). Углы ввода излучателя и приемника одинаковы. Выражение справедливо для любого типа плоских упругих волн.

Анализ (10) показывает, что интенсивность структурных помех максимальна при $\gamma = 0$ (обратное рассеяние) и $\gamma = 180^\circ$. При углах наблюдения 70° – 110° с направлением излучения наблюдается минимум интенсивности структурных помех (значение $I_{\Sigma}(\gamma)/I_{\Sigma}^{\max}$ не превышает 0,1).

Рассчитанные зависимости были использованы при конструировании акустических систем для контроля аустенитных сварных швов.

Разработке и исследованию акустических систем контроля посвящена **четвертая глава**

Установлено, что для контроля аустенитных сварных швов толщиной до 20 мм необходимо использовать РС преобразователь поперечных волн. При конструировании преобразователя ставилась задача выравнивания чувствительности контроля по высоте аустенитного сварного шва. За основу взята методика расчета (В.Медведев, И.Канарейкин) наклонного РС преобразователя, позволяющего выравнивать чувствительность контроля в направлении прозвучивания.

Условие выравнивания чувствительности по высоте сварного шва

$$N = 20 \lg(A_1/A_{\Pi}) < 3 \text{ дБ} \quad (11)$$

где A_1 – амплитуда сигнала от отражателя, озвучиваемого периферийными лучами диаграммы направленности (ДН) преобразователя; A_{Π} – амплитуда сигнала от отражателя, озвучиваемого центральными лучами ДН.

Излучающий и приемный пьезоэлементы устанавливаются таким образом, чтобы однократно отраженные лучи сходились в верхней части шва.

Амплитуда сигнала от отражателя определялась с учетом прозвучивания

рачности границы сплавления, отклонения лучей от волновой нормали в сварном шве, рассеяния волн в шве и в зоне термического влияния, формулы для расчета которых были получены во второй главе.

Угол ввода выбирался в пределах рассчитанных в третьей главе оптимальных углов ввода. При выборе угла разворота пьезоэлементов, помимо условия обеспечения минимальной интенсивности структурных помех (10) учитывались условия проведения контроля: ширина валика усиления сварного шва, необходимость прозвучивания всего сечения шва. Выбор частоты определялся диапазоном контролируемых толщин $6 + 20$ мм. Результаты экспериментов, проведенных в работе Н.Н. Волковой показали, что целесообразно использовать частоту $f = 2,5$ МГц. Пьезопластины выбирались стандартными с размером $2a = 12$ мм. Оптимальные параметры контроля двухсторонних аустенитных швов, сваренных автоматической сваркой определены для толщин $6 + 20$ мм и составляют: угол ввода $\alpha = 62^\circ$, угол разворота $2\omega = 40^\circ$ - для толщин $H = 6 + 10$ мм; $\alpha = 61^\circ$, $2\omega = 39^\circ$ - для $H = 12 + 16$ мм; $\alpha = 60^\circ$, $2\omega = 38^\circ$ - для $H = 18 + 20$ мм. Чувствительность контроля данными преобразователями одинакова в верхней и нижней частях шва, в средней части шва неравномерность чувствительности, рассчитанная по (11) не превышает 2,5 дБ.

Разработанные акустические системы экспериментально проверены в НПО "Криогенмаш". Настройка чувствительности производилась по испытательному образцу, адекватному сварному соединению. В качестве искусственного отражателя использовались вертикальные цилиндрические сверления $\phi 1$ мм и $\phi 1,5$ мм, выполненные в сварном шве.

Оценка достоверности разработанного метода контроля проводилась по альтернативному признаку по методике В.Н. Волченко. Достоверность составляет 90%.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ.

1. Металлографический анализ структуры сварных соединений из аустенитной стали показал, что для таких соединений характерны 4 зоны, имеющие различные акустические свойства:

- основной металл - макроскопически изотропная среда;
- зона термического влияния - анизотропная поликристаллическая равноосная среда;
- граница сплавления - область изменения упругих свойств;
- металл сварного шва - анизотропная поликристаллическая среда.

2. Построена акустическая модель аустенитного сварного соединения, в которой, в отличие от имеющихся расчетных моделей, помимо геометрических эффектов анизотропии, учитываются энергетические потери, вызванные рассеянием ультразвуковых волн в зоне термического влияния и в металле шва и трансформацией волн на границе сплавления аустенитного шва.

3. В борновском приближении решена задача рассеяния ультразвуковых волн на структурных неоднородностях. Расчет был проведен в изотропном приближении с введением функции источников $f_1(\vec{r}, u^0)$, описывающей влияние неоднородностей и соответствующей уровню анизотропии конкретного соединения. Установлено, что при соотношении длины волны и среднего размера зерна $\lambda/a > \pi$ в зоне термического влияния имеет место релеевское рассеяние. В металле аустенитного шва коэффициент рассеяния приближенно подчиняется закону $\delta^0 \sim a^2 \tau^3$ и не зависит от длины кристаллита.

4. Построены расчетные зависимости коэффициентов рассеяния от частоты, направления падения волны и от размера зерен для продольной и поперечных волн в зоне термического влияния и в сварном шве. В металле сварного шва коэффициенты рассеяния обращаются в ноль в случаях, если направление распространения волны или ее поляризация параллельны длинной оси кристаллита. Для продольной и горизонтально-поляризованной поперечной волны коэффициенты рассеяния максимальны, если волна распространяется перпендикулярно длинной оси кристаллитов ($\theta = 90^\circ$). Максимум рассеяния поперечной волны вертикальной поляризации наблюдается при угле падения на кристаллиты 45° .

5. Получены выражения, связывающие углы отклонения акустических лучей от волновой нормали в поперечно-изотропной среде с направлением падения волн и упругими постоянными среды, и построены расчетные зависимости отклонения акустических лучей как функции угла падения на кристаллиты продольной и поперечных волн в металле сварного шва стали 12X18H10T. Максимальное отклонение акустического луча от волновой нормали для продольной и поперечной SH волн составляет 15° , а для поперечной SV волны - 32° .

6. Получена аналитическая зависимость, связывающая ослабление ультразвуковых волн при прохождении аустенитных сварных соединений с параметрами контроля и структурой шва. Установлено, что минимальное ослабление прошедшей поперечной волны в однопроходных

сварных швах наблюдается при углах ввода от 60° до 65° .

7. Применительно к задачам ультразвуковой дефектоскопии сварных швов установлена угловая зависимость интенсивности структурного шума в металле аустенитного шва - $I_s(\gamma)/I_s^{max} = \cos^2 \gamma$. При угле наблюдения α равном углу падения θ на кристаллиты интенсивность структурного шума максимальна при $\gamma = 0$ (обратное рассеяние) и $\gamma = 180^\circ$. При углах наблюдения γ , составляющих 70° - 110° с направлением излучения, наблюдается минимум интенсивности структурных помех (значение $I_s(\gamma)/I_s^{max}$ не превышает 0,1).

8. Рассчитаны, изготовлены и экспериментально проверены параметры акустических систем с чувствительностью, выравненной по глубине аустенитного сварного шва. Разработана "Методика ультразвукового контроля аустенитных сварных швов сосудов, изготовленных из стали 12X18H10T, с толщиной стенки $6 + 20$ -мм". Разработанные методика и средства контроля прошли апробацию и внедрены в НПО "Криогенмаш".

9. Достоверность разработанного метода УЗК при использовании РС преобразователей с выравненной чувствительностью достаточно высока (90%). Ожидаемый годовой экономический эффект 15,4 тыс. рублей в расчете на план НПО "Криогенмаш" 1990г.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Волкова Н.Н., Горная С.П. Расчет наклонных раздельно-совмещенных пьезопреобразователей с выравненной чувствительностью для контроля сварных швов из аустенитной стали // Современные физические методы и средства неразрушающего контроля: Материалы семинара. - М., 1988. - С.5-10.

2. Решение задачи дифракции при распространении упругой волны в анизотропной поликристаллической среде / Н.П.Алешин, Н.Н.Волкова, С.П.Горная, В.В.Крылов // Неразрушающие физические методы контроля: Тез. докл. Всесоюз. научно-техн. конф. - Свердловск, 1990. - С.20-21.

3. Влияние неоднородности материала на параметры ультразвуковых преобразователей для неразрушающего контроля изделий из аустенитных сталей / Н.Н.Волкова, С.П.Горная, А.В.Муллин, А.В.Нелидов // Неразрушающий контроль - 90: Тез. докл. VI Республиканской конф. - Рига, 1990. - С.30.