М 405849

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Могильнер Леонид Юрьевич

УДК 620.179.16

РАССЕЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ОБЪЕМНЫМИ МОДЕЛЯМИ ДЕФЕКТОВ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ УЗЛОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ

Специальность 05.02.11 – Методы контроля материалов, деталей, узлов, изделий и сварных соединений.

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 1983

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - кандидат технических наук доцент
Н.П.АЛЕШИН

Официальные оппоненты:

доктор технических наук
Королев М.В.

кандидат технических наук
Вопилкин А.Х.

Ведущее предприятие - ЦНИИСК им. Кучеренко.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1988 г. на заседании специализированного совета К 053.15.01 Московского высшего технического училища им. Н.Э.Баумана по адресу:
107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по

С дис ВТУ имени Н.Э.Бауман

Автор .

Т.

М 405849

А - 9987 00 экз.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. При сооружении ряда зданий промышленного и культурно-бытового назначения часто возникает необходимость изготовления большепролетных перекрытий. Перспективным является использование для этой цели структурных (перекрестно-стержневых) конструкций, в два раза более экономичных по сравнению с другими металлическими конструкциями аналогичного назначения. Прогрессивными являются структуры из труб с узловыми сопряжениями, выполненными ванной сваркой. Однако такой способ изготовления узлов характеризуется значительным уровнем дефектности (до 25%), причем доля недопустимых дефектов может, в ряде случаев, достигать 15%. Поэтому широкое внедрение этих конструкций до некоторой степени сдерживается отсутствием достоверных и оперативных методов контроля. Применяемые в ряде случаев натурные испытания крайне дороги (затраты на испытания одного структурного блока составляют около 50 тыс.руб.) и не всегда реализуемы. Кроме того, в большинстве случаев не удается обнаружить имеющиеся в конструкции дефекты, которые, развиваясь в процессе эксплуатации, могут привести к разрушению конструкции. Выборочные механические испытания малообъективны. Они также связаны с большими затратами. Не удалось достичь положительных результатов и при применении методов просвечивания. Попытки использования традиционной совмещенной схемы УЗ-контроля не позволило получить требуемых результатов в плане достоверности обнаружения недопустимых объемных дефектов, которые встречаются наиболее часто.

Известно, что одним из наиболее простых и эффективных способов повышения достоверности ультразвуковой дефектоскопии (УЗД) является использование контроля по раздельной схеме. Однако для реализации ее на практике необходимо знать распределение амплитуды сигналов, отраженных от различных дефектов в различных направлениях. В настоящее время детально изучены лишь крайне ограниченные направления излучения и приема, причем без достаточного учета упругих свойств металла сварного шва. В связи с этим представляет большой интерес оптимизация параметров контроля на основе использования характеристик рассеяния объемных отражателей в упругой среде. Такое исследование позволяет решить главную задачу, а именно, разработать и внедрить достоверный и высокопроизводительный метод неразрушающего контроля сварных соединений узлов сопряжений структурных покрытий.

М405849

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1405849
Могильнер Л.Ю.Рассеяние уз

МГТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

Цель работы и основные задачи исследования. Цель работы состояла в решении задачи рассеяния упругих волн от моделей объемных дефектов и создании на этой основе методики расчета параметров пьезопреобразователей, обеспечивающих повышение достоверности УЗД и качества изготовления рассматриваемых конструкций.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Статистический анализ дефектности сварных швов в узлах сопряжений элементов структурных покрытий.

2. Теоретическое и экспериментальное изучение рассеяния упругих колебаний на эталонных отражателях, имитирующих наиболее опасные дефекты рассматриваемых соединений.

3. Выбор схемы и разработка акустической системы, позволяющих проводить достоверный и производительный контроль сварных узлов структурных покрытий.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем: 1. На основании строгого решения задачи дифракции упругих волн на объемных полостях в твердой, акустически изотропной среде получены и экспериментально подтверждены аналитические зависимости которые описывают рассеяние от моделей объемных дефектов в сварном шве.

2. На основе изучения взаимодействия упругих волн, зеркально отраженных и дифрагированных на объемных дефектах в шве, установлены условия малости акустических помех при контроле раздельно-совмещенными (РС) пьезопреобразователями.

3. Обоснована возможность и определены условия, при которых боковой цилиндрический отражатель может быть использован в качестве контрольного для настройки чувствительности при ультразвуковой дефектоскопии.

Практическая ценность. В работе показано, что при рассеянии упругих волн на объемных отражателях, как правило, наибольшую амплитуду имеют сигналы, отраженные по законам геометрической акустики. Сигналы, дифрагированные на полостях, при контроле эхо-методом носят шумовой характер. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана методика расчета параметров РС-преобразователей, обеспечивающих максимальную выявляемость дефектов при контроле исследуемых сварных соединений.

По результатам работы разработаны "Рекомендации по ультразвуковому контролю сварных соединений узлов сопряжений элементов структурных покрытий и перекрестных ферм".

Разработанные акустические преобразователи и методика контроля были использованы при строительстве завода "Сантехзаготовок" в г. Красноярске и покрытия рынка в г. Тольятти. Реальный экономический эффект от внедрения на одном объекте составил 40,2 тыс. рублей.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при анализе типа дефектов и измерении их размеров.

Методы исследования. Упругие поля, рассеянные на объемных отражателях в твердом теле, определялись при решении волновых уравнений методом разделения переменных с применением методов теории функций комплексной переменной и асимптотических разложений специальных функций математической физики. Полученные результаты интерпретируются исходя из положений геометрической акустики и геометрической теории дифракции. Расчеты некоторых параметров рассеянных волн проведены с использованием ЭВМ.

Экспериментальное наблюдение рассеяния продольных и поперечных волн проводилось на отражателях, выполненных в металлических образцах.

При анализе распределения дефектов и исследовании достоверности контроля применялись методы математической статистики.

Апробация. Результаты работы докладывались на У Республиканской научно-технической конференции "Применение акустических методов и устройств", Батуми, 1982 г., и на IУ уральской региональной научно-технической конференции "Современные методы неразрушающего контроля и их метрологическое обеспечение", Свердловск, 1983 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 печатных работ.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 135 страницах машинописного текста, иллюстрируется 52 рисунками, содержит 11 таблиц, состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы (104 наименования) и приложений.

Содержание работы

В первой главе рассмотрена технология изготовления узла сопряжения элементов в структурном покрытии, разработанном в ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко. В таком узле может соединяться от 4 до 12 сплюснутых на торцах трубчатых стержней, толщина стенки которых может меняться в пределах 4÷12 мм. Проведен статистический анализ качества сварных соединений. Показано, что в реальных условиях производства доля брака при изготовлении узлов такого типа может составлять 15%. Поэтому внедрение конструкций неразрывно связано с воз-

можностью применения достоверного метода неразрушающего контроля качества.

Анализ распределения дефектов по видам и размерам показывает, что наиболее типичными являются вытянутые вдоль линии сплавления заплаковки кромок. Они локализованы у внешней поверхности сплюснутого стержня (шлаковые затеки), либо углублены в объем наплавленного металла (шлаковые включения). Эти дефекты относятся к объемному типу и составляют 85% от общего числа. Реже встречаются несплавления по кромкам и поры.

Для исследуемых узлов характерна высокая концентрация соединяемых элементов, сложное пространственное положение, разностенность стержней в пределах одного узла. Проведенный анализ показал, что наиболее эффективным методом неразрушающего контроля является ультразвуковой с использованием наклонных РС-преобразователей. Причем эти преобразователи должны отвечать следующим требованиям: низкий уровень шумов и высокая чувствительность при выявлении объемных отражателей, малые габариты, возможность использования минимального количества преобразователей для контроля элементов всех используемых толщин.

Во второй главе проведен анализ работ, рассматривающих высокочастотную (коротковолновую) асимптотику строгого решения задач рассеяния гармонических упругих волн на объемных полостях в твердом теле. Показано, что результирующее поле состоит из волн различного рода: рассеянных по законам геометрической акустики и обогнувших полость (дифрагированных). Однако имеющиеся результаты Тютекина В.В., Яворской И.М., *Nagaya M.* и других авторов практически невозможно применить при изучении рассеяния на отражателях промежуточных волновых размеров $\varkappa\ell \gtrsim 10$ ($\varkappa$ - волновое число падающей волны, ℓ - радиус полости). Кроме того, как правило, рассматриваются только отдельные рассеянные волны, и отсутствует общая картина результирующего поля в окрестности полости. Эти вопросы потребовали специального изучения.

В работе основное внимание уделено рассеянию вертикально-поляризованных поперечных волн (волн SV-типа) на цилиндрической полости, то есть случаю, когда волна падает перпендикулярно оси цилиндра, причем колебание частиц в ней происходит в плоскости, нормальной к этой оси. Анализ рассеянного поля, проведенный с применением геометрической теории дифракции показал, что в точки пространства, лежащие вне зоны геометрической тени, приходят поперечные волны, зеркально отраженные от свободной поверхности полости (рис. Iа).

Вдали от последней ($r \gg b$) потенциал смещений в этих колебаниях описывается выражением:

$$\Psi_3 = \sqrt{\frac{b}{2r}\cos\frac{\theta}{2}}\; R_{tt}\left(\frac{\theta}{2}\right) \exp\left[i\varkappa\left(r - 2b\cos\frac{\theta}{2}\right)\right]. \qquad (1)$$

Здесь r, θ - координаты точки наблюдения. Для принятого условия $r \gg b$ можно считать, что $\frac{\theta}{2} = \alpha$ - угол падения. Тогда $R_{tt}\left(\frac{\theta}{2}\right)$ - коэффициент отражения поперечной волны от свободной цилиндрической поверхности, вогнутой в металл. В нулевом по $\varkappa b$ приближении этот коэффициент совпадает с аналогичным для случая отражения от свободной плоскости. Последнее имеет место для всех углов разворота между направлениями на источник и приемник θ, кроме области вблизи угла $\theta = 2\alpha_{кр}$ ($\alpha_{кр}$ - третий критический угол). В этой окрестности падающий луч попадает на отражающую поверхность под углом, близким к критическому, и по (I) можно лишь оценивать характер изменения сигнала Ψ_3 .

Отметим, что амплитудные множители, входящие в формулу (I), получены ранее Ермоловым И.Н. на основании жидкостной модели расчета рассеянного поля. Отметим также, что в случае рассеяния на жестком цилиндре в жидкости (I) упрощается, так как $|R(\theta/2)| \equiv 1$ всюду вне зоны геометрической тени.

Если падающий луч попадает на цилиндрическую поверхность под углом α, меньшим третьего критического, то в область $\theta < \alpha_{кр} + 90^0$ по законам геометрической акустики рассеивается продольная волна (рис. Iб). Потенциал ее описывается следующим образом:

$$\Phi_3 = \sqrt{\frac{b}{r}\frac{\sin\alpha}{\sin\theta}}\cos\beta\, R_{te}(\alpha) \exp\left[i\varkappa\left(r - b\frac{\sin\theta}{\sin\alpha}\right)\right]. \qquad (2)$$

Здесь $\varkappa$ - волновое число продольной (объемной) волны, α и β - углы падения и трансформации, $R_{te}(\alpha)$ - коэффициент трансформации от цилиндрической поверхности. Так же, как $R_{tt}(\theta/2)$ в (I), он совпадает с аналогичным коэффициентом при трансформации на плоской свободной поверхности (при $\alpha < \alpha_{кр}$).

Приемник поперечных колебаний может зарегистрировать сигналы, обогнувшие полость. Эти сигналы возникают вследствие того, что лучи исходной волны, касающиеся поверхности отражателя, либо падающие на нее под третьим критическим углом, возбуждают на этой поверхности неоднородные волны, называемые в дальнейшем скользящими волнами. Скользящие волны, распространяясь вдоль вогнутой в металл поверхности, в каждой ее точке переизлучают в объем колебания, которые и могут регистрироваться приемником.

В зависимости от скорости распространения скользящих волн они разделяют на волны продольного, поперечного и релеевского типов. Возможные механизмы возбуждения и переизлучения таких сигналов описаны в работах Викторова И.А., Буденкова Г.А., Яворской И.М. В представленной работе совместно с Алешиным Н.П. произведена систематизация этих данных. При этом теоретически показано, что падающая волна любого типа (продольная или SV-поперечная) может возбуждать скользящие волны трех указанных типов. Наоборот, скользящая волна любого типа переизлучает как продольные, так и поперечные объемные колебания. Это может происходить по двум механизмам [1]. Лучи падающей поперечной волны, касающиеся поверхности отражателя, возбуждают скользящую вдоль нее волну поперечного типа (рис. Iв, г). Лучи же, падающие на поверхность под третьим критическим углом, порождают скользящую волну продольного типа (рис. Iд). Точно также объемная продольная волна, касаясь поверхности, возбуждает скользящую вдоль нее волну продольного типа.

Второй механизм возбуждения несколько сложнее. Например, при облучении полости продольной либо поперечной волнами скользящая волна релеевского типа возбуждается при взаимодействии группы лучей, проходящих вблизи полости (рис. Iе).

Скользящие волны продольного и поперечного типов быстро затухают при возрастании $\varkappa\beta$. При этом волна релеевского типа превращается в волну Рэлея.

Использование асимптотического представления функций Ханкеля, полученного в работе [2], позволило вычислить амплитуды сигналов, переизлученных скользящими волнами продольного и поперечного типов. Потенциал последних можно представить в виде:

$$\Psi_{\varkappa} = 2\sqrt{\frac{\lambda_s}{r}}\, \exp(i\varkappa r)\, \mathcal{D}_{\varkappa}\, \cos\nu_{\varkappa}\theta\, \exp(i\pi\nu_{\varkappa}). \qquad (3)$$

Здесь учтены волны, огибающие полость по и против часовой стрелки (рис. Iв, г), и введены следующие обозначения: λ_s – длина объемной поперечной волны, $\nu_{\varkappa}$ – угловое волновое число скользящей волны поперечного типа, $\mathcal{D}_{\varkappa}$ – коэффициент дифракции, определяющий эффективность возбуждения и переизлучения скользящей волны поперечного типа.

Сигналы, переизлученные скользящей волной релеевского типа (рис. Iе) также могут быть аналитически описаны. Для этого необходимо использовать другие асимптотические представления функции Ханкеля (представления Дебая). При этом с точностью до старших по ($\varkappa\beta$)

членов получено:

$$\Psi_R = 2\sqrt{\frac{\lambda_0}{r}}\exp(i\varkappa r)\,\mathcal{D}_R\cos\nu_R\theta\,\exp(i\pi\nu_R). \qquad (4)$$

Здесь ν_R – угловое волновое число скользящей волны релеевского типа, а $\mathcal{D}_R$ – коэффициент дифракции переизлученных ею сигналов. Вычисление коэффициента $\mathcal{D}_R$ проведено с помощью ЭВМ. При этом показано, что $|\mathcal{D}_{\varkappa\varkappa}| > |\mathcal{D}_R|$, то есть скользящие волны поперечного типа возбуждаются и переизлучают эффективнее, чем скользящие волны релеевского типа. Однако, как правило, именно последние вносят определяющий вклад в дифрагированный сигнал. Причина этого заключается в том, что скользящие волны быстро затухают, причем коэффициент затухания волн релеевского типа в 4÷9 раз меньше аналогичного коэффициента для скользящих волн поперечного типа (при $\varkappa a = 10 \div 30$). Таким образом, вдали от границы геометрической тени ($\theta < 120^0$), где путь, который скользящие волны проходят вдоль поверхности, достаточно велик, переизлучение скользящих волн поперечного типа практически отсутствует.

Формулы (3), (4) учитывают интерференцию сигналов, обегающих полость в противоположных направлениях. Каждый из них может быть вычислен независимо. Например, волна, огибающая полость по часовой стрелке и переизлученная скользящей волной релеевского типа (рис. Ie) имеет амплитуду:

$$|\Psi_R| = \sqrt{\frac{\lambda_0}{r}}\,|\mathcal{D}_R|\exp\left[-(\pi-\theta)\,\mathrm{Im}\,\nu_R\right]. \qquad (5)$$

Аналогично можно переписать формулу (3):

$$|\Psi_{\varkappa\varkappa}| = \sqrt{\frac{\lambda_0}{r}}\,|\mathcal{D}_{\varkappa\varkappa}|\exp\left[-(\pi-\theta)\,\mathrm{Im}\,\nu_{\varkappa\varkappa}\right]. \qquad (6)$$

Точно также можно описать огибающие сигналы, дающие вклад в рассеянную полостью продольную волну. Отметим только, что в отличие от амплитуд описанных выше дифрагированных волн, амплитуды сигналов, переизлученных скользящей волной продольного типа, удается лишь оценить. Это связано со сложным видом асимптотических представлений функций Ханкеля, которые необходимо использовать при расчете.

В главе 2 рассмотрено также рассеяние на цилиндрической полости горизонтально поляризованных (SH) и продольных волн. В первом случае колебания частиц среды происходят параллельно оси цилиндра. При этом в пространство вокруг него зеркально отражается волна, потенциал которой равен:

$$\Psi_{23} = \sqrt{\frac{b}{2r}\cos\frac{\theta}{2}}\,\exp\left[i\varkappa\left(r - 2b\cos\frac{\theta}{2}\right)\right]. \qquad (7)$$

Рассеиваются также огибающие полость колебания. Последние порождены скользящими волнами, которые аналогичны тем, что распространяются вдоль поверхности жесткого цилиндра, погруженного в жидкость, когда он облучается акустической волной. При $ka \geq 10$ амплитуда дифрагированных сигналов значительно меньше амплитуды зеркально отраженных, и вдали от границы геометрической тени последние практически не искажаются. Однако при $ka = 1 \div 5$, как следует из результатов, полученных ранее *Maye A.*, дифрагированные сигналы соизмеримы с зеркально отраженным, и, интерферируя с ним, вызывают осцилляции результирующего сигнала с ростом диаметра полости.

При рассеянии продольной волны на цилиндре также возникают зеркально отраженные и дифрагированные волны. Первые описываются соотношениями типа (1), (2), а вторые имеют очень малую амплитуду (при $\theta = 0^{\circ}$, например, они не превышают уровня -20 дБ от зеркально отраженной продольной волны).

Наконец, во второй главе рассмотрено рассеяние линейно поляризованной поперечной волны на сферической полости в упругой среде. Как и всюду выше, полученные в работе асимптотические представления функций Ханкеля дают возможность представить поле, рассеянное отражателем промежуточных волновых размеров ($ka = 10 \div 30$), как суперпозицию геометроакустических и дифрагированных волн. Однако теперь, в отличие от предыдущих случаев, одна и та же падающая поперечная волна ведет себя по-разному в зависимости от направления, в котором происходит рассеяние. Если плоскость падения-отражения совпадает с плоскостью поляризации исходной волны, то она отражается и огибает полость как вертикально поляризованная (при этом предполагается, что точка наблюдения удалена от сферического отражателя достаточно далеко). Это означает, например, что амплитуда зеркально отраженного от полости сигнала может определяться лишь с учетом коэффициента R_{cc}, аналогичного введенному в (1). Далее, сигнал, огибающий полость в этой плоскости, может быть порожден скользящими волнами релеевского, продольного и поперечного типов. При этом так же, как и в случае рассеяния SV-волны на цилиндре, определяющей является скользящая волна релеевского типа, когда точка наблюдения достаточно удалена от границы геометрической тени.

Если при падении линейно-поляризованной волны на сферу плоскость падения-отражения перпендикулярна плоскости поляризации исходной волны, то последняя рассеивается как SH-поляризованная. Например, зеркальное отражение происходит по закону: угол падения равен углу отражения, причем коэффициент отражения равен единице

(по модулю), для любых углов падения, если точка наблюдения не лежит в зоне геометрической тени. Отметим также, что при этом амплитуда огибающего полость сигнала, как правило, пренебрежимо мала.

Наконец, характерной особенностью рассеяния на сфере является фокусировка дифрагированных сигналов, рассеянных в направлении "назад" на источник. Показано, что в этом случае огибающие сигналы порождаются скользящей волной релеевского типа, и амплитуда их меньше амплитуды зеркально отраженного на 3÷10 дБ.

В третьей главе анализируются результаты экспериментальных наблюдений рассеяния на объемных полостях в упругой среде. При этом используется импульсное излучение колебаний. Показано, что зависимости, полученные в главе 2, можно использовать для описания сигналов, регистрируемых в данном случае. Так, непосредственно на эксперименте показано, что скользящие волны релеевского типа действительно могут переизлучать в объем с криволинейной поверхности [3,4].

Наблюдения рассеяния на цилиндре проводилось на цилиндрических образцах, вдоль осей которых высверливались отверстия диаметром от 2 мм до 8 мм. В качестве источников использовались нормальные преобразователи, создававшие продольные и сдвиговые колебания. В последних (конструкции МВТУ им. Н.Э.Баумана) применялись пьезокерамические пластины.

Если излучаемые импульсы достаточно коротки, то сигналы различной природы, рассеянные на полости, разделяются по времени и регистрируются независимо. На рис.2 приведена зависимость амплитуды зеркально отраженного сигнала от угла разворота между направлениями на источник и приемник θ, рассчитанная по формуле (I) (кривая I). Приведены также экспериментальные результаты для случая: $2\ell = 6$ мм, $f = 4$ МГц, падающая волна – поперечная вертикально поляризованная.

При $\theta < 50^0$ и $\theta = 80 \div 180^0$ совпадение экспериментальных и расчетных данных вполне удовлетворительное. При $50^0 < \theta < 80^0$ амплитуда зеркально отраженного сигнала оказывается меньше (до 10 дБ) оцененной по (I). Очевидно, такое расхождение связано с появлением волн типа боковых (либо с переизлучением продольных скользящих волн). Однако разрешить такие сигналы не удается.

При $\theta > 180^0$ экспериментальные данные опять расходятся с расчетными. Это связано с тем, при больших θ зеркально-отраженный сигнал Ψ_3 интерферирует с возмущениями, огибающими полость. Последние имеют в этом случае большую амплитуду и незначительно запаздывают от зеркально отраженного, поскольку они проходят вдоль поло-

ти небольшие расстояния.

Для анализа времени задержки огибающих волн необходимо пользоваться групповыми скоростями. Например, для скользящих вдоль полости волн поперечного и релеевского типов эти скорости, соответственно, равны: $C_{гр\,\infty} = C_{t_0}\left[1 - \frac{1}{12}\left(\frac{7{,}14}{\infty\ell}\right)^{2/3}\right]$; $C_{гр\,д} = C_{R_0}$. Здесь C_{t_0} и C_{R_0} – скорости объемных поперечных волн и волн Рэлея на свободной плоскости. Из последних соотношений следует, что сигналы, переизлученные скользящими волнами релеевского и поперечного типов, практически невозможно разделить по времени, поскольку групповые скорости их близки. Однако волны релеевского типа затухают значительно меньше волн поперечного типа. На рис. 2 приведены рассчитанные по (5), (6) зависимости амплитуд $|\Psi_д|$ и $|\Psi_\infty|$ от угла θ. При малых θ скользящие волны проходят по поверхности полости достаточно большой путь, вследствие чего волна поперечного типа практически полностью затухает, и при $\theta \approx 0^0$ сигнал Ψ_∞ слабее сигнала $\Psi_д$ на 40 дБ и более ($\infty\ell > 10$). Амплитуда сигнала $\Psi_д$ из (6), переизлученного волной релеевского типа, при этом достаточно велика, и он уверенно регистрируется.

С ростом θ амплитуда $|\Psi_\infty|$ возрастает значительно быстрее, чем амплитуда $|\Psi_д|$. Именно возмущение Ψ_∞, наряду с волной, проходящей сквозь бездефектные зоны металла, определяет в основном сигнал, регистрируемый вблизи границы геометрической тени. В этой области дифрагированный сигнал может быть оценен по формуле (5) (рис. 2).

Следует отметить, что возмущение $\Psi_з$ (кривая I) не зависит от частоты. Возмущения $\Psi_{д,\infty}$ зависят от нее (кривые 2, 3). В данном случае при расчете полагалось: $\infty\ell \approx 24$ ($\ell/\lambda_0 \approx 4$). Реально, спектр колебаний (импульсов) на уровне 0,5 занимает полосу 3÷5 МГц. При этом $\infty\ell = 18 \div 30$. Пунктирные прямые на рис. 2 показывают диапазон, в котором могут находиться амплитуды сигналов $\Psi_д$, Ψ_∞. Видно, что области эти достаточно узки, и при $\infty\ell \geq 10$ ожидаемый разброс амплитуд сигналов $\Psi_д$, связанный с импульсным характером излучения, не превышает 1,5÷2 дБ.

При $\theta \approx 0^0$ сигналы, обегающие полость в противоположных направлениях, интерферируют. Для больших θ они разрешаются друг от друга. Оценки и непосредственные измерения показывают, что один из обегающих сигналов в неискаженном виде может быть зарегистрирован при $40^0 \leq \theta \leq 110^0$. Здесь результаты расчета и эксперимента совпадают удовлетворительно (рис. 2).

При $50^0 < \theta < 80^0$ разница амплитуд сигналов $\Psi_з$ и $\Psi_д$ мала и может составлять 3÷5 дБ. Это может привести к снижению выявляемости

протяженных дефектов. Поэтому при контроле эхо-методом необходимо выбирать угол разворота преобразователей таким образом, чтобы при падении на дефект угол θ лежал вне этой области. Это условие можно записать в виде:

$$B_{из} >> B_{иа}. \qquad (8)$$

Здесь коэффициенты B являются обобщением введенных И.Н.Ермоловым коэффициентов, характеризующих отражательную способность полости. В явном виде их можно записать следующим образом:

$$B_{из} = \sqrt{\frac{\beta}{2\lambda_t}\cos\frac{\theta}{2}}\,\left|R_{st}\left(\frac{\theta}{2}\right)\right|; \quad B_{иа} = \left|\mathcal{D}_a\right| \exp\left[-(\pi-\theta)\,\mathrm{Im}\,\nu_a\right].$$

Рассмотрено также рассеяние назад ($\theta = 0$). Огибающий сигнал определяется по (5), зеркально отраженный – по (I). Расчет времени задержки и разницы амплитуд этих сигналов хорошо подтверждается на эксперименте.

В случае излучения длинных импульсов интерференция описанных волн может привести к осцилляциям амплитуды результирующего сигнала при росте диаметра полости. Если излучаемые импульсы достаточно коротки, то сигналы разной природы разделяются по времени, и амплитуда каждого из них монотонно растет с ростом диаметра полости.

При рассеянии горизонтально поляризованных поперечных и продольных волн на цилиндрической полости, как правило, вне зоны тени удается зарегистрировать лишь геометро-акустические сигналы. Амплитуды огибающих волн малы. Они не регистрируются на уровнях -20 дБ от геометро-акустических, что также хорошо подтверждает полученные в главе 2 теоретические соотношения.

Отметим, что при рассеянии SH-волн, при $\theta < 80^0$ амплитуда зеркально отраженного сигнала больше, чем при рассеянии SV-волн, причем при $\theta \approx 60^0$ разница может достигать 8÷10 дБ.

Сравнение полученных экспериментальных и расчетных данных с известными результатами В.Я.Кондрацкого и М.В.Гитиса показывает, что поля рассеяния цилиндрических полостей практически полностью определяются геометро-акустическими сигналами.

При анализе амплитуд сигналов, рассеянных на сферической полости, показано, что и в данном случае амплитуда зеркально отраженной волны больше, когда рассеяние происходит по механизму, аналогичному имеющему место при отражении SH-волны от цилиндра. Это соответствует случаю, когда результирующее поле наблюдается в плоскости, перпендикулярной плоскости поляризации исходного сигнала. При этом амплитуда дифрагированного сигнала меньше, чем при рассеянии по SV-механизму. Таким образом, как и в случае рассеяния на цилиндрической по-

лости, контроль эхо-методом дает возможность получить более высокую выявляемость объемных полостей, если он ведется SH-волнами. Выявление сферических отражателей особенно важно проводить по раздельной схеме, поскольку в случае отражения "назад" (контроль по совмещенной схеме) дифрагированный сигнал, вследствие фокусировки, соизмерим с зеркально отраженным.

Проведено экспериментальное сравнение амплитуд дифрагированных сигналов, огибающих сферические и цилиндрические поверхности. Показано, что в первом случае переизлученные сигналы слабее примерно на 10 дБ (при $\theta = 100 \div 150^0$), что удовлетворительно совпадает с расчетными результатами.

Четвертая глава посвящена разработке методики расчета акустических систем УЗ-контроля сварных узлов в структурных покрытиях. На основе условия (8) было установлено, что оптимальный угол разворота источника и приемника в РС-преобразователе составляет $\Delta = 15^0$.

Поверхность сплюснутых стержней изогнута. Благодаря этому, используя преобразователи с углом ввода $\alpha = 70^0$, удалось обеспечить распространение УЗ-колебаний в изделии параллельно стенкам сварного соединения. Установлено, что размер пьезоэлемента должен составлять 6 мм, а рабочая частота - 5 МГц. При этом расстояние между центрами пьезопластин может выбираться в интервале от 10 до 15 мм в зависимости от типоразмера контролируемого соединения.

Неравномерность чувствительности по глубине залегания дефекта для разработанных преобразователей составляет не более 3 дБ, причем наибольшая чувствительность реализуется в верхней части сечения соединения, где, как показывает анализ, наиболее вероятно появление опасных дефектов. Настройка чувствительности при контроле РС-преобразователем производится по боковому цилиндрическому отражателю ϕ 2 мм, расположенному в центре сечения соединения. При этом показано, что выбранные параметры преобразователей позволяют пользоваться таким контрольным отражателем, поскольку амплитуда эхо-сигнала от него монотонно растет с увеличением его диаметра.

В тех случаях, когда по каким-либо причинам оказывается невозможным применять РС-преобразователи, допускается использование совмещенных преобразователей с углами призмы $\beta = 53^0$. При этом настройка чувствительности и рабочей зоны для контроля проводится по угловому отражателю ("зарубке") площадью 3 мм^2. Разработаны методики контроля по описанным схемам.

Достоверность ультразвукового контроля разработанными преобразователями, рассчитанная по методике В.Н.Волченко, достаточно вы-

сока и при контроле РС-преобразователями, составляет 91-92 %.

Основные выводы и результаты

1. Выполнен комплекс экспериментально-теоретических исследований, позволивший создать средства и методику ультразвукового контроля сварных соединений труб строительных структурных покрытий.

2. На основе строгого решения задачи рассеяния упругой волны на объемной полости в твердом теле получены аналитические зависимости, описывающие рассеяние на моделях объемных дефектов в сварных швах, волновые размеры которых $ka \gtrsim 10$, и установлено, что:

а) результирующее поле состоит из волн, рассеянных по законам геометрической акустики и огибающих полость; в случае излучения импульсов, длительность которых превышает время огибания полости, колебания разной природы интерферируют, что может привести к осцилляции амплитуды результирующего сигнала с ростом диаметра полости и к неоднозначной оценке размеров дефектов;

б) падающая вертикально-поляризованная поперечная волна возбуждает на поверхности полости скользящие волны продольного, поперечного и релеевского типов, которые, распространяясь вдоль отражателя, переизлучают в объем. Эффективность возбуждения скользящих волн релеевского и продольного типов примерно в 10 раз меньше, чем волны поперечного типа. Однако, вследствие того, что волны релеевского типа имеют наименьший коэффициент затухания, как правило, именно они вносят основной вклад в дифрагированный сигнал.

3. Экспериментальной проверкой подтверждена справедливость и достоверность полученных теоретических зависимостей. Показано, что, если угол θ разворота между направлениями на источник и приемник ультразвуковых колебаний близок к двойному третьему критическому углу, то ошибка расчета амплитуды зеркально-отраженного сигнала по жидкостной модели может составлять 8-10 дБ. Установлено, что при использовании вертикально-поляризованных поперечных волн скользящие волны продольного типа могут вносить вклад в регистрируемые сигналы лишь если угол θ близок к двойному третьему критическому, а скользящие волны поперечного типа - лишь вблизи зоны геометрической тени.

4. С увеличением угла θ амплитуда зеркально-отраженного сигнала изменяется в соответствии с изменением коэффициента отражения, а амплитуда огибающего отражатель сигнала монотонно возрастает вследствие уменьшения пути, который скользящая волна проходит вдоль полости. Наилучшую выявляемость объемного дефекта можно достичь при контроле горизонтально-поляризованными поперечными ко-

лебаниями: амплитуда зеркально-отраженных сигналов в этом случае выше (до 10 дБ), а амплитуда дифрагированных сигналов ниже, чем при использовании вертикально поляризованных волн, когда угол θ лежит в диапазоне $10^0 \leq \theta \leq 80^0$. Получены аналитические выражения для определения оптимальных углов разворота между направлениями на источник и приемник в пьезопреобразователе из условия минимума помех от дифрагированных волн, огибающих полость.

5. Разработана методика расчета наклонных РС-преобразователей, обеспечивающих уверенное выявление дефектов в сварных швах рассматриваемых конструкций. Установлено, что при угле разворота 15^0 и угле ввода 70^0 обеспечивается достаточно равномерная чувствительность по сечению шва, а достоверность обнаружения дефектов близка к 92 %.

6. Разработаны и утверждены в установленном порядке "Рекомендации по ультразвуковому контролю сварных соединений узлов сопряжений элементов структурных покрытий". Рекомендации внедрены при строительстве завода Сантехзаготовок в г. Красноярске и крытого рынка в г. Тольятти с годовым экономическим эффектом 40,2 тыс. рублей.

Материалы диссертации изложены в следующих работах:

1. Алешин Н.П., Могильнер Л.Ю. Анализ упругого поля ультразвуковых волн, рассеянных на цилиндрической полости. – Дефектоскопия, 1982, № 12, с. 18-30.

2. Алешин Н.П., Каменский В.С., Могильнер Л.Ю. К решению одного трансцендентного уравнения, встречающегося в задачах дифракции. – Прикладная математика и механика, 1983, № 1, с. 121 – 124.

3. Алешин Н.П., Могильнер Л.Ю. О характере волн, возбуждаемых на свободной поверхности объемного отражателя. – Применение акустических методов и устройств в науке, технике и производстве: Тез. докл. Республик. научно-техн. конф. АМУ-У-82. Тбилиси, 1982, с. 126-129.

4. О природе неоднородных волн, возбуждаемых на вогнутой цилиндрической поверхности / Н.П.Алешин, А.К.Гурвич, М.В.Григорьев, Л.Ю.Могильнер – Современные методы неразрушающего контроля: Тез. докл. конф. Свердловск, 1983, с. 11-15.

5. Рекомендации по ультразвуковому контролю сварных соединений узлов сопряжений элементов структурных покрытий и перекрестных ферм / Н.П.Алешин, Л.Ю.Могильнер, Ж.М.Гимерверт и др. – М.: МВТУ им. Н.Э.Баумана, ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко, трест "Оргтехстрой" Главкрасноярскстроя, 1981, – 20 с.

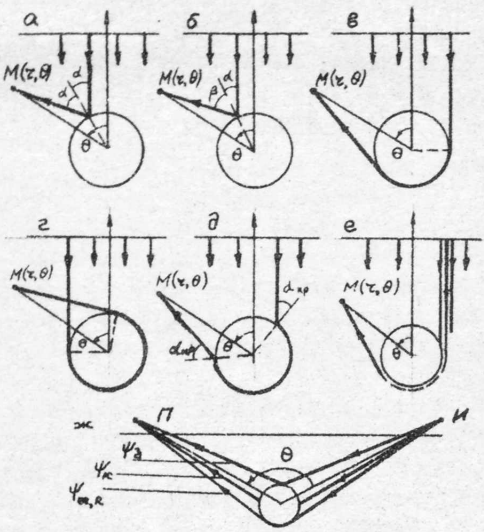


Рис.I. Направления распространения геометро-акустических (а,б) и дифрагированных (в-е) сигналов при рассеянии SV-волн на объемном отражателе.

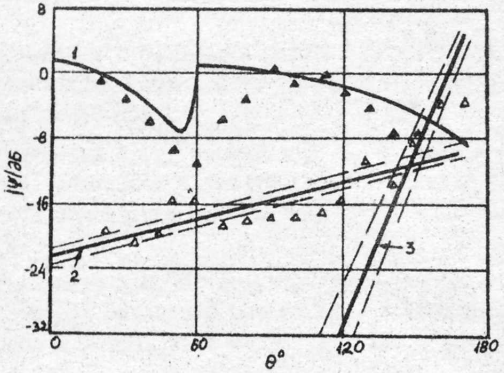


Рис.2. Амплитуды сигналов, рассеянных цилиндром ⌀6 мм при падении волны SV-типа: I(▲) -зеркально отраженный сигнал; 2,3 -сигналы, переизлученные скользящими волнами релеевского и поперечного типов; △ -измеренная амплитуда обежавшего полость сигнала.

МВТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА