

На правах рукописи



Паврос Кирилл Сергеевич

ДИФРАКЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПУЧКОВ В ТВЕРДОЙ СРЕДЕ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
ПРИ КОНТРОЛЕ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

Специальность: 01.04.06. - Акустика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» на кафедре электроакустики и ультразвуковой техники.

Научный руководитель:

Аббакумов Константин Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры ЭУТ ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Официальные оппоненты:

Тюрина Наталья Васильевна, доктор технических наук, профессор, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.

Ковалевский Михаил Васильевич, кандидат технических наук, ФГБУН Геологический институт Кольского научного центра Российской академии наук, старший научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «10» декабря 2020 года в 14 часов на заседании совета Д 212.238.06 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И.Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И.Ульянова (Ленина) и на сайте университета www.etu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан « 9 » октября 2020 года.

Ученый секретарь совета Д 212.238.06
к. т.н., доцент



А.А. Великосельцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В настоящее время акустические методы продолжают оставаться весьма эффективным средством исследования в различных отраслях науки, техники и технологии. Продолжительное интенсивное развитие ультразвуковых методов и внедрение их в контрольно-измерительную технику обусловлено их широкими возможностями и такими свойствами, как высокая проникающая способность и многообразие форм волновых процессов, высокая точность и быстрота измерений, весьма малая инерционность, простота обеспечения условий взрывобезопасности, защиты от агрессивных сред и т.п.

Актуальная группа многочисленных задач экспериментальной и технической акустики связана с проблемой изучения поведения различных физико-механических параметров, характеризующих свойства, состав или строение исследуемого вещества в плане оценки их потенциальных возможностей использования в качестве конструкционных материалов. Необходимая для этого информация может быть получена путем измерения скоростей распространения, коэффициента поглощения или рассеяния ультразвука на неоднородностях исследуемой среды. Повышение точности измерения этих параметров и совершенствование методики эксперимента оказываются при этом важнейшими направлениями совершенствования техники ультразвуковых измерений.

Систематические погрешности из-за влияния неучтенных дифракционных эффектов могут значительно ограничивать точность измерения абсолютных величин контролируемых параметров и, как следствие, приводить к снижению достоверности результатов.

Ультразвуковая дефектоскопия, как одно из важнейших направлений технической акустики, в последние годы продолжает развиваться, а ее методическая база - совершенствоваться. Это обусловлено тем, что повышение качества выпускаемой продукции и, в частности, листового проката, выпускаемого во все возрастающем объеме, является одним из главных резервов экономии металла, так как это позволяет обеспечить необходимую надежность и долговечность промышленных изделий, например в машиностроении, при уменьшении их металлоемкости.

Несмотря на широкое распространение в промышленности ультразвуковых методов контроля, их информационные и метрологические возможности до сих пор исследованы недостаточно и, как показывает практика, далеко не исчерпаны. Для выявления этих возможностей необходимо решение ряда акустических задач, учитывающих взаимодействие ограниченных в пространстве пучков упругих волн с контролируемым изделием.

Решению соответствующих акустических задач применительно к проблематике акустических измерений затухания в твердых средах и ультразвуковой дефектоскопии листового проката посвящена настоящая диссертационная работа.

Объектом исследования в работе является горячекатаный листовой прокат, содержащий плоскостные (протяженные и компактные) несплошности (дефекты) естественного (т.е. металлургического) происхождения в листовом металле.

Предметом исследования в работе являются волновые процессы, характеризующие рассеяние ограниченных в пространстве пучков упругих волн на несплошностях в твердой изотропной среде.

Целью работы является повышение эффективности операций промышленных измерений и контроля за счет улучшения метрологических характеристик измерений затухания ультразвуковых продольных и поперечных волн и получения достоверных оценок предельных значений (чувствительности и выявляемости) контактных методов ультразвукового контроля в твердых средах при обнаружении протяженных плоскостных несплошностей (дефектов) горячекатаного толстолистого проката.

Достижение поставленной цели обеспечено решением следующих задач:

- разработка теоретических аспектов учета дифракционных явлений в ультразвуковых измерениях в твердых средах для продольных и поперечных волн, обосновывающих применение скорректированных аналитических зависимостей информационных сигналов от параметров ультразвукового поля, измерительных преобразователей и контролируемой среды;

- теоретическое и экспериментальное исследование влияния дифракционных эффектов на предельную чувствительность ультразвукового контроля горячекатаного листового проката методами отражения продольными и поперечными волнами в контактном варианте;

- теоретическое и экспериментальное исследование вопросов влияния дифракционных эффектов на предельную выявляемость плоскостных дефектов листового проката методами отражения продольными и поперечными волнами;

- обоснование предложений по выбору параметров электронно-акустических трактов ультразвуковых контрольно-измерительных приборов широкого применения в практических условиях.

Методы исследования в теоретической части основывались на методах математической физики и анализа, интегрального исчисления. Экспериментальные исследования проводились в условиях компьютерного моделирования с использованием математического пакета MathCAD и натурального моделирования исследуемых процессов, получения и статистической обработки данных акустических измерений.

Достоверность полученных результатов оценивалась путем сопоставления теоретических результатов с результатами проведенных экспериментов, а также сопоставлением с более простыми, частными случаями, известными по более ранним исследованиям.

Научная новизна работы:

1. Исследованы закономерности ослабления пучков продольных и поперечных волн в твердых изотропных средах применительно к акустическим трактам контрольно-измерительной аппаратуры. Определены дифракционные поправки при измерении коэффициента затухания ультразвука для широкого круга волновых размеров преобразователей и параметров трактов.

2. На основании анализа уравнений акустических трактов определены соотношения, позволяющие производить оценку предельной выявляемости плоскостных несплошностей толстолистового проката эхо и эхо-сквозным методами в контактном варианте.

3. Выведены аналитические выражения позволяющие производить оценку предельной чувствительности ультразвукового контроля толстолистового проката эхо и эхо-сквозным методами в контактном варианте с возбуждением продольных и поперечных волн при расположении информационных сигналов в разных временных интервалах.

4. Предложены способы выбора параметров электронно-акустических трактов контрольно-измерительных приборов, обеспечивающих минимизацию влияния дифракционной погрешности при выполнении заданных требований по чувствительности (выявляемости) контрольных операций на основе анализа информационных сигналов, полученных методами отражения в рекомендуемых временных интервалах.

В диссертации защищаются следующие основные научные положения:

– При измерениях коэффициентов затухания продольных и поперечных волн в твердых изотропных средах, уменьшение погрешности, связанной с дифракционной расходимостью ультразвукового пучка, обусловлено рациональным выбором волновых размеров излучателя и приемника; предпочтителен вариант раздельной схемы излучателя и приемника с неодинаковыми размерами датчиков (размеры приемника превосходят размеры излучателя) при условии выполнения требований по их направленным свойствам;

– Предельная выявляемость плоскостных несплошностей листового проката методами отражения по отношению к толщине эквивалентной прослойки определяется волновым размером преобразователей; в пределах волновых размеров преобразователей от 6 до 60 в листах из углеродистой стали она не превосходит 5 мкм для продольной волны и возрастает для поперечной волны по сравнению с продольной;

– Повышение предельной чувствительности ультразвукового контроля листового проката в контактном варианте для методов отражения с учетом уровня помехи для трансформированной волны определяется увеличением волновых размеров излучателя и приемника при условии выполнения требований по их направленности;

Практическая ценность диссертационной работы заключается в применении полученных результатов для повышения метрологических характеристик средств измерений, реализующих эхо-импульсный метод измерения затухания продольных и поперечных волн в твердых изотропных средах, и определении предельных значений (чувствительности и выявляемости) в целях повышения реалистичности интерпретации результатов ультразвуковых методов неразрушающего контроля (методов отражения) в контактном варианте.

Личный вклад автора: Научные результаты, представленные в диссертации, получены лично автором, за исключением тех, где предоставлены прямые ссылки на предыдущие существующие работы. В работах, опубликованных совместно, автору принадлежат: отдельные этапы постановки задач, получение и проверка аналитических соотношений, разработка метода решения задачи дифракции с принятыми граничными условиями, проведение численных и натурных экспериментов, обработка их результатов.

Апробация результатов работы: Основные результаты исследований докладывались и получили одобрение на 7-ой научно технической конференции “Физические методы и средства контроля сред, материалов и изделий” (Львов, 2002 г.); 16-ой Российской конференции по неразрушающим физическим методам и средствам контроля (Санкт-Петербург, 2002 г.); международной научно-технической конференции “Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов, (г. Могилев, 2004 г.); XX-ой Петербургской конференции «Ультразвуковая дефектоскопия металлоконструкций» (Санкт-Петербург, 2009 г.); а также на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ “ЛЭТИ”.

Публикации: Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 9 работах, из них – 3 статьи в журналах из перечня изданий, рекомендованных ВАК, 3 статьи в других изданиях, 3 доклада (с опубликованными тезисами) на международных и федеральных научно-технических конференциях, 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации: введения, пяти основных разделов, заключения, списка литературы и четырех приложений. Основной текст изложен на 185 страницах машинописного текста и содержит 129 рисунков и 16 таблиц. Приложения изложены на 33 страницах и содержат 4 рисунка.

Во введении сформулированы актуальность, цель, задачи и основные научные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первом разделе рассмотрено современное состояние, и проведен анализ теоретических и экспериментальных работ по распространению звуковых пучков в твердом теле. Выполнен анализ работ по исследованию взаимодействия звуковых пучков с плоскостными препятствиями. Определены направления дальнейших исследований в работе.

Во втором разделе с помощью представления звуковых пучков, формируемых пьезоэлектрическим контактными преобразователем дефектоскопа, в виде суперпозиции плоских волн получены интегральные

выражения для определения дифракционных погрешностей при распространении звуковых пучков в твердой среде, и проанализированы на основании численных оценок.

При исследовании возбуждения продольных волн использовалась модель поршневого преобразователя, колеблющегося по толщине, с акустическим контактом с образцом в виде тонкого жидкостного слоя. При исследовании возбуждения поперечных волн применялась модель преобразователя, совершающего сдвиговые колебания вдоль поверхности образца (в направлении оси X), и жестко приклеенного к поверхности образца. В обоих случаях при гармоническом и импульсном возбуждении в образец учитывались волны обоих типов.

При задании граничных условий считалось, что поршневой излучатель радиуса a расположен на поверхности тела, совпадающей с плоскостью XOY прямоугольной системы координат, и совершает гармонические колебания.

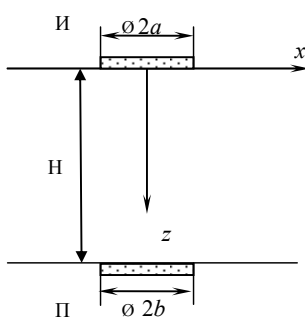


Рисунок 1.

Граничные условия на плоскости $z=0$ под излучателем определяются типом возбуждаемых им колебаний в пределах площади излучателя. А на остальной части поверхности все упругие напряжения равны нулю. В связи с этим граничные условия задавались в виде:

$$\sigma_{mn} = \begin{cases} \sigma_0 e^{j\omega t} & \text{при } x^2 + y^2 \leq a^2; \\ 0 & \text{при } x^2 + y^2 > a^2. \end{cases}$$

где σ_{mn} - компоненты тензора упругих напряжений в матричной форме записи; ω - круговая частота, σ_0 - амплитуда заданной нормальной компоненты, определяемой через заданную амплитуду скорости ξ_m на поршне соотношением $\sigma_0 = \xi_m \rho c$; ρ и c - плотность твердого тела и скорость волн в нем соответственно.

Компоненты тензора упругих напряжений определяется законом Гука:

$$\sigma_{mn} = \lambda u_{mn} \delta_{mn} + 2\mu u_{mn}, \quad (1)$$

где λ и μ - упругие постоянные Ламе; u_{mn} - компоненты тензора упругих деформаций;

Амплитуда электрического сигнала от принятой волны будет определяться как среднее значение напряжения на приемном преобразователе

$$U_l = \frac{1}{S_n} \left| \iint_{S_n} \sigma_{zz}^{l \text{ mp}} dS_n \right|, \quad U_t = \frac{1}{S_n} \left| \iint_{S_n} \sigma_{xz}^{l \text{ mp}} dS_n \right|.$$

Подставка в эти выражения соответствующих компонентов тензора упругих напряжений из (1):

$$\sigma_{zz}^{l \text{ mp}} = -(\lambda k_l^2 + 2\mu \zeta^2) \varphi \Big|_{z=H}, \quad \sigma_{xz}^{l \text{ mp}} = \mu [k_x k_y A_x + (\eta^2 - k_x^2) A_y - k_y \eta A_z] \Big|_{z=H}.$$

с использованием выражения для компонент векторного потенциала, приводила к интегральным соотношениям для оценки амплитуд сигналов:

$$U_l = \frac{1}{S_{\Pi}} \left| \iint_{S_{\Pi}} \left[(\lambda k_l^2 + 2\mu\zeta^2) \frac{\sigma_0 S_{\Pi}}{(2\pi)^2 \mu k_t^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2J_1(ka)}{ka} \cdot \frac{(\eta^2 - k^2)(\eta^2 + k^2)}{F(k)} \cdot e^{-j(k_x x + k_y y + \zeta H)} dk_x dk_y \right] dS_{\Pi} \right| \quad (2)$$

$$U_t = \frac{1}{S_{\Pi}} \left| \iint_{S_{\Pi}} \left\{ \frac{\sigma_0 S_{\Pi}}{(2\pi)^2 k_t^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{k_t^2 \left[(2k^2 - k_t^2)^2 + 4k_y^2 \zeta \eta \right]}{F(k)} \frac{2J_1(ka)}{ka} e^{-j(k_x x + k_y y + \eta H)} dk_x dk_y \right\} dS_{\Pi} \right|. \quad (3)$$

После представления проекций волновых чисел в сферической системе координат, интегрирования по площади преобразователя, и выполнения ряда преобразований из (2) и (3) получались выражения для дифракционных поправок при распространении продольной и поперечной волны:

$$\frac{U_l}{K_u^l U_{\Gamma}} = \frac{1}{2} (k_l a)^2 \left| \int_0^{\infty} \frac{2J_1(k_l a x)}{k_l a x} \frac{2J_1(k_l a \beta x)}{k_l a \beta x} \cdot \frac{(\alpha^2 - 2x^2)^2}{(\alpha^2 - 2x^2)^2 + 4x^2 \sqrt{1-x^2} \sqrt{\alpha^2 - x^2}} \cdot e^{-j \frac{1}{2\pi} (k_l a)^2 s_l \sqrt{1-x^2}} x dx \right| \quad (4)$$

$$\frac{U_t}{K_u^t U_{\Gamma}} = \frac{1}{2} (k_l a)^2 \left| \int_0^{\infty} \frac{2J_1(k_l a x)}{k_l a x} \frac{2J_1(k_l a \beta x)}{k_l a \beta x} \cdot \frac{(1-2x^2)^2 + 2x^2 \sqrt{1-x^2} \sqrt{\frac{1}{\alpha^2} - x^2}}{(1-2x^2)^2 + 4x^2 \sqrt{1-x^2} \sqrt{\frac{1}{\alpha^2} - x^2}} \cdot e^{-j \frac{1}{2\pi} (k_l a)^2 s_t \sqrt{1-x^2}} x dx \right|$$

где $s_l = H/a^2/\lambda_l$; $s_t = H/a^2/\lambda_t$; $\alpha = c_l/c_t$; K_u^l и K_u^t - коэффициенты двойного электромеханического преобразования. Остальные обозначения ясны из рис. 1.

Проведенный численный анализ полученных выражений дифракционных поправок (4) для измерения коэффициента затухания продольных и поперечных волн показал, что они зависят от соотношения волновых размеров излучателя и приемника, расстояния между ними и акустических характеристик материала.

На рис.2 и 3 представлены зависимости амплитуды продольной волны U_l , регистрируемой приемником, от обобщенного расстояния s при различных соотношениях размеров приемник – излучатель β , для случая $\alpha = 1.8$ и $k_l a = 40$ (рис.2). и для различных волновых размеров преобразователей в диапазоне $k_l a$ от 1 до 100 при одинаковых соотношениях размеров излучатель - приемник (рис. 3).

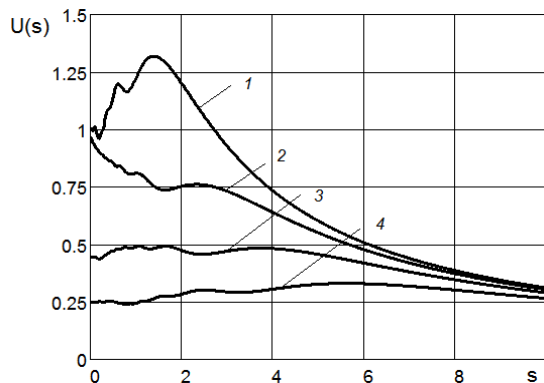


Рисунок 2.

1 - $\beta=0,5$; 2 - $\beta=1$; 3 - $\beta=1,5$; 4 - $\beta=2$

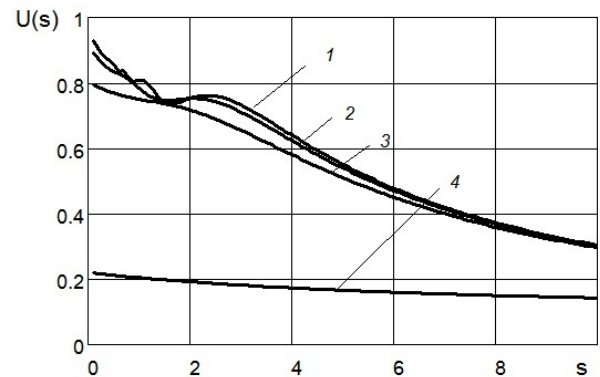


Рисунок 3.

1 - $k_l a = 100$; 2 - $k_l a = 10$; 3 - $k_l a = 5$; 4 - $k_l a = 1$

Из графиков видно, что при увеличении соотношения размеров излучатель – приемник дифракционные поправки уменьшаются. В ближней зоне наблюдаются осцилляции, причем, в случае, когда размеры излучателя больше размеров приемника эти осцилляции становятся значительными. В дальней зоне дифракционные поправки экспоненциально спадают с увеличением расстояния, и на больших расстояниях практически не зависят от соотношения размеров приемника и излучателя. Зависимость от волнового размера преобразователя $k_1 a$ весьма существенна и для прецизионных измерений поглощения, особенно, в слабопоглощающих материалах дифракционные поправки должны обязательно учитываться.

В третьем разделе диссертации проведена оценка предельной выявляемости плоскостных дефектов листового проката методами отражения. Получены интегральные соотношения для расчета амплитуд прошедших через лист и отраженных от донной поверхности сигналов при контроле эхо и эхо-сквозным методом продольными и поперечными волнами в зависимости от величины раскрытия плоскостной протяженной несплошности, имитирующей наличие в измерительном тракте дефектных областей.

Признаком наличия «дефектов» при контроле изделий эхо-методом является превышение амплитуды эхосигнала выше установленного порогового уровня в заданном временном промежутке. Величина порогового уровня устанавливается (в соответствии с утвержденной нормативной документацией) в долях к амплитуде первого донного импульса на бездефектном участке изделия. С целью сокращения неконтролируемой мертвой зоны при автоматизированном контроле проката используется регистрация сигналов во втором временном интервале, а величина порогового уровня в этом случае устанавливается в долях амплитуды донного сигнала на дефектном участке изделия.

Таким образом, для того чтобы оценить предельные возможности эхо-метода применительно к дефектам в виде протяженной плоскопараллельной прослойки с малым раскрытием и заполненной твердой средой (шлаком) с регистрацией сигналов в первом и втором временном интервале необходимо:

- рассчитать амплитуду эхо-сигнала от плоскостной несплошности, амплитуду донного сигнала на бездефектном участке и их отношение при регистрации сигналов в первом временном интервале;
- амплитуду эхо-сигнала от несплошности во втором временном интервале, амплитуду первого донного сигнала на дефектном участке и их отношение.

Для получения расчетных соотношений амплитуд регистрируемых сигналов на дефектном и бездефектном участках изделия достаточно в полученных ранее интегральных выражениях (4) дополнительно учесть коэффициент отражения звукового пучка от нижней грани изделия, коэффициент отражения звукового пучка от плоскопараллельного слоя малой толщины и квадрат коэффициента прохождения звукового пучка через плоскопараллельную прослойку.

Коэффициенты отражения и прохождения находились из решения задачи отражения и преломления волн на плоском слое толщиной d и на свободной

поверхности твердого полупространства с использованием скалярного и векторного потенциалов смещения для системы волн, приведенных на рис. 4.

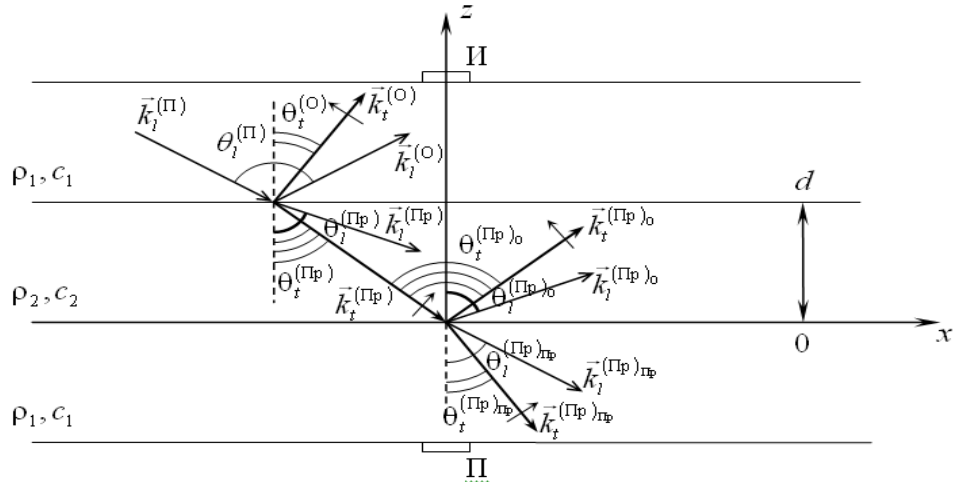


Рисунок 4. Схема образования информационных сигналов при взаимодействии упругих волн с «плоским» слоем

Коэффициент отражения от свободной поверхности твердого тела определялся выражением:

$$R_{ll}^{\Gamma} = \frac{4 \frac{x^2}{\alpha_{ll11}^4} \sqrt{\alpha_{ll11}^2 - x^2} \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \left(1 - 2 \frac{1}{\alpha_{ll11}^2} x^2 \right)^2}{4 \frac{x^2}{\alpha_{ll11}^4} \sqrt{\alpha_{ll11}^2 - x^2} + \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \left(1 - \frac{1}{\alpha_{ll11}^2} x^2 \right)^2} \quad (5)$$

Коэффициенты отражения и прохождения через плоскопараллельную прослойку имели вид:

$$R_{ll}^{\Delta} = \frac{\Delta_2}{\Delta}; \quad T_{ll}^{\Delta} = \frac{\Delta_7}{\Delta}, \quad (6)$$

где:

$$\Delta = \begin{vmatrix} x \cdot e^{-j\alpha} & a \cdot e^{-j\beta} & ab \cdot e^{j\delta} & -x \cdot e^{j\gamma} & -x \cdot e^{-j\gamma} & -ab \cdot e^{-j\delta} & 0 & 0 & a \cdot e^{j\beta} \\ 0 & 0 & -ab & x & x & ab & a & -x & 0 \\ \alpha c \cdot e^{-j\alpha} & -x \cdot e^{-j\beta} & x \cdot e^{j\delta} & \alpha d \cdot e^{j\gamma} & -\alpha d \cdot e^{-j\gamma} & x \cdot e^{-j\delta} & 0 & 0 & x \cdot e^{j\beta} \\ 0 & 0 & -x & -\alpha d & \alpha d & -x & x & \alpha c & 0 \\ Ax \cdot e^{-j\alpha} & Ac \cdot e^{-j\beta} & -\rho \cdot Ad \cdot e^{j\delta} & \rho \cdot Ay \cdot e^{j\gamma} & -\rho \cdot Ay \cdot e^{-j\gamma} & -\rho \cdot Ad \cdot e^{-j\delta} & 0 & 0 & -Ac \cdot e^{j\beta} \\ 0 & 0 & \rho \cdot Ad & -\rho \cdot Ay & \rho \cdot Ay & \rho \cdot Ad & -Ac & Ax & 0 \\ -Ac \cdot e^{-j\alpha} & Az\alpha \cdot e^{-j\beta} & \rho \cdot Aw\alpha \cdot e^{j\delta} & \rho \cdot Ad \cdot e^{j\gamma} & \rho \cdot Ad \cdot e^{-j\gamma} & -\rho \cdot Aw\alpha \cdot e^{-j\delta} & 0 & 0 & Az\alpha \cdot e^{j\beta} \\ 0 & 0 & \rho \cdot Aw\alpha & \rho \cdot Ad & \rho \cdot Ad & -\rho \cdot Aw\alpha & -Az\alpha & -Ac & 0 \end{vmatrix}$$

$$\alpha = k_{l1} \frac{c_{l1}}{c_{11}} \sqrt{\alpha_{ll11}^2 - x^2} d; \quad \beta = k_{l1} \sqrt{1-x^2} d; \quad \gamma = k_{l2} \frac{c_{l2}}{c_{11}} \sqrt{\alpha_{ll12}^2 - x^2} d; \quad \delta = k_{l2} \frac{c_{l2}}{c_{11}} \sqrt{\alpha_{ll12}^2 - x^2} d; \quad a = \sqrt{1-x^2};$$

$$ab = \sqrt{\alpha_{ll12}^2 - x^2}; \quad ac = \sqrt{\alpha_{ll11}^2 - x^2}; \quad ad = \sqrt{\alpha_{ll12}^2 - x^2}; \quad Ax = 2 \frac{1}{\alpha_{ll11}^2} x \sqrt{\alpha_{ll11}^2 - x^2}; \quad Ac = 1 - 2 \frac{1}{\alpha_{ll11}^2} x^2;$$

$$Ad = 1 - 2 \frac{1}{\alpha_{ll12}^2} x^2; \quad Az\alpha = 2 \frac{1}{\alpha_{ll11}^2} x \sqrt{1-x^2}; \quad Ay = 2 \frac{1}{\alpha_{ll12}^2} x \sqrt{\alpha_{ll12}^2 - x^2}; \quad Aw\alpha = 2 \frac{1}{\alpha_{ll12}^2} x \sqrt{\alpha_{ll12}^2 - x^2}.$$

На рис. 5 и 6 представлены результаты численного расчета полученных выражений (4) с учетом (5) и (6) для заданного типа волн (продольных и поперечных) для различных волновых размеров преобразователя (рис. 5) и для разных типов волн, при одинаковом волновом размере преобразователя (рис. 6)

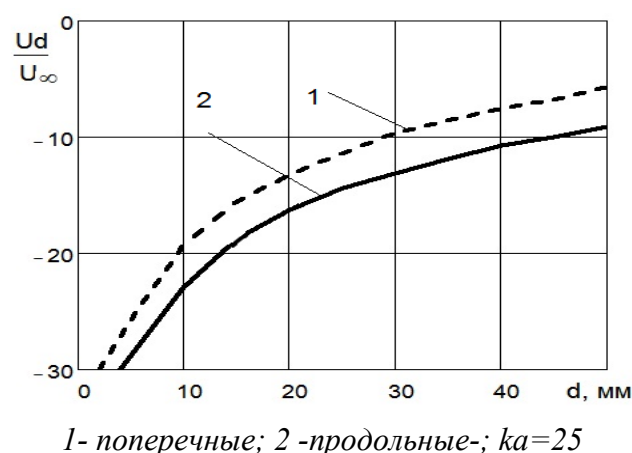
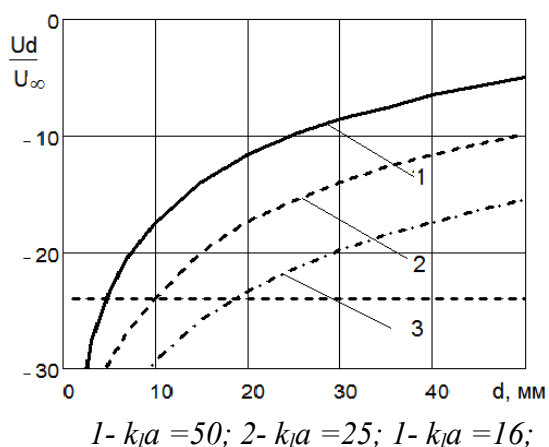


Рисунок 5. Зависимость амплитуды от величины раскрытия несплошности при различных значениях волновых размеров ПЭП

Рисунок 6. Зависимость амплитуды от величины раскрытия несплошности при одинаковых волновых размерах ПЭП для продольных и поперечных волн.

На основе анализа результатов численных оценок исследованы закономерности влияния на предельную выявляемость ультразвукового контроля листового проката: волнового размера излучателя и приемника, толщины контролируемого изделия, соотношения акустических импедансов контролируемого материала и материала заполнения плоскостного дефекта.

В случае использования стандартных пьезоэлектрических преобразователей (волновые числа от 6 до 60), предельная выявляемость плоскостных дефектов в листовом прокате оказалась ограниченной значением 5 мкм. Предельная выявляемость плоскостных дефектов листового проката при использовании поперечных волн несколько выше, чем при использовании продольных волн.

В четвертом разделе приведены результаты оценки предельной чувствительности эхо-методов контроля на основе рассмотрения отражения пучков продольных и поперечных волн, создаваемых преобразователями ультразвуковых дефектоскопов, от дна контролируемого листа. Учитывалось, что пьезоэлектрический преобразователь, совершающий колебания по толщине, помимо основной волны, одновременно излучает и волны другого типа - поперечные, являющиеся источником помех.

При контроле эхо-методом из-за существенно меньшей скорости распространения поперечных волн по сравнению с продольными, такая помеха может попадать только во временной интервал между первым и вторым донными импульсами. При контроле изделий малой толщины, а также с целью сокращения величины неконтролируемой мертвой зоны, этот временной интервал может использоваться для регистрации дефектов. В этом случае

амплитуда импульса помехи будет ограничивать предельную чувствительность контроля.

При контроле поперечными волнами, излучаемая продольная волна приходит как в первом, так и во втором временном интервале.

Для определения амплитуды побочно излученного поперечного сигнала U_{lt} использовалось выражение для упругого напряжения, действующего на приемный преобразователь, вызванного падающей на него поперечной волной

$$\sigma_{zz}^{lt \text{ np}} = \mu(2k_y \eta A_x - 2k_x \eta A_y) \Big|_{z=H}, \quad (7)$$

Амплитуда электрического сигнала от принятой поперечной волны определяется средним значением этого напряжения по площади S преобразователя с учетом (7) в режиме приема:

$$U_{lt} = \frac{1}{S_{\Pi}} \left| \iint_{S_{\Pi}} \sigma_{zz}^{lt \text{ np}} dS_{\Pi} \right|, \quad (8)$$

При подстановке в это выражение (8) формулы для нормальной компоненты упругого напряжения (7), и с использованием выражения для компонент векторного потенциала, получалось интегральное соотношение для оценки амплитуды электрического сигнала акустической помехи от распространяющейся трансформированной поперечной волны.

$$U_{lt} = \frac{4\sigma_0}{(2\pi)^2} \left| \iint_{S_{\Pi}} \left[\int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \frac{2J_1(ka)}{ka} \cdot \frac{\xi\eta}{F(k)} \cdot (k_y^2 + k_x^2) \cdot e^{-j(k_x x + k_y y + \eta H)} dk_x dk_y \right] dS_{\Pi} \right|, \quad (9)$$

После представления проекций волновых чисел в сферической системе координат, аналогично (4), интегрирования по площади преобразователя и выполнения простых преобразований, из (9) было получено:

$$\frac{U_{lt}}{\sigma_0} = 2(k_i a)^2 \left| \int_0^{\alpha} \frac{2J_1(k_i a x)}{k_i a x} \frac{2J_1(k_i a \beta x)}{k_i a \beta x} \frac{x^2 \sqrt{1-x^2} \sqrt{\alpha^2 - x^2}}{(1-2x^2)^2 + 4x^2 \sqrt{1-x^2} \sqrt{\alpha^2 - x^2}} e^{-j\frac{1}{2\pi}(k_i a)^2 s \sqrt{1-x^2}} x dx \right|. \quad (10)$$

где $\alpha = c_t/c_l$, $s = H/a^2 / \lambda_t$, a^2 / λ_t - ближняя зона преобразователя для поперечных волн.

Аналогичным образом получены интегральные соотношения для оценки амплитуды электрического сигнала акустической помехи от распространяющейся трансформированной продольной волны.

На основе анализа результатов численных оценок установлено, что предельная чувствительность контроля листового проката методами отражения зависит от волнового размера излучателя и приемника, толщины контролируемого изделия и соотношения скоростей продольных и поперечных волн. С уменьшением волновых размеров преобразователя уровень помехи существенно возрастает, что может быть причиной перебраковки.

На рис. 7 и 8 представлены зависимости отношения амплитуд помехи и донного сигнала, от обобщенного расстояния s для ряда волновых размеров преобразователя $k_1 a$ и для различных типов волн.

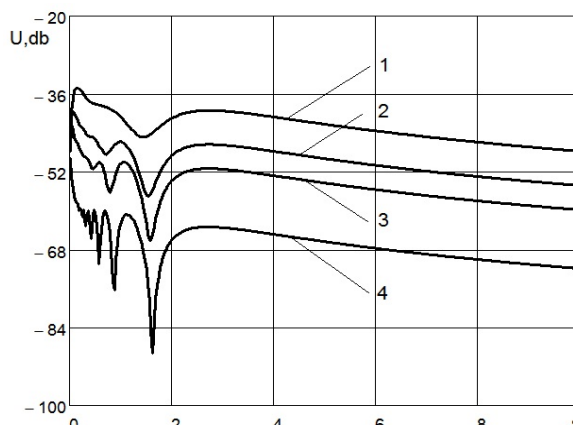
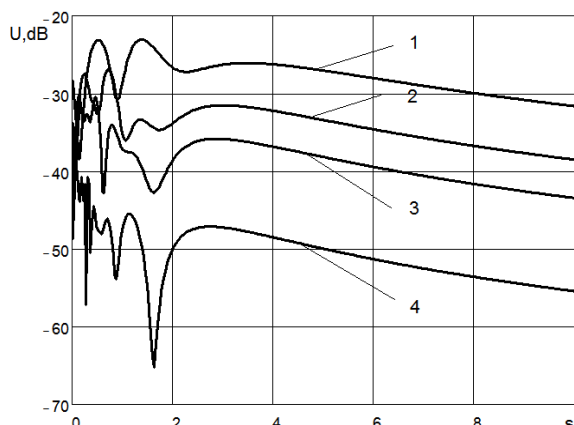


Рисунок 7. Амплитуда поперечной помехи для различных волновых размеров преобразователя. Рисунок 8. Амплитуда продольной помехи для различных волновых размеров преобразователя,

Пятый раздел диссертации посвящен экспериментальным исследованиям влияния дифракционных поправок при измерениях коэффициента затухания продольных и поперечных волн, предельной выявляемости и предельной чувствительности эхо-метода ультразвуковой дефектоскопии листового проката в контактном варианте.

При оценке ослабления сигнала в «теневом» измерительном тракте показано соответствие данных теоретического анализа и эксперимента по определению величины дифракционной поправки, вызванной расходимостью волнового пучка в измерительном тракте (рис. 9).

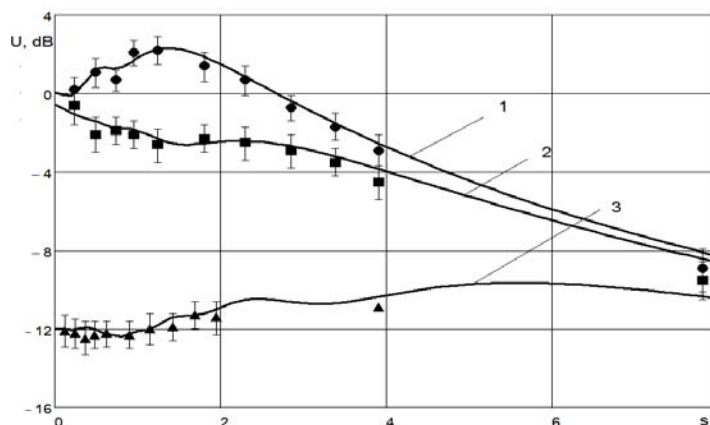


Рисунок 9. Сравнение теоретических расчетов и экспериментальных данных зависимости амплитуды «теневого» сигнала в стали от расстояния между излучателем и приемником при разных соотношениях их диаметров, где:

- 1 - излучатель 2,5МГц Ø12мм - приемник 5МГц Ø6мм
- 2 - излучатель - приемник 5МГц Ø6мм,
- 3 - излучатель 5МГц Ø6мм - приемник 2,5МГц Ø12мм,

Представлены результаты измерений изменений амплитуды отраженного и донного сигналов в зависимости от величины раскрытия плоскостного протяженного дефекта, выполнены эксперименты по анализу помех, вызванных паразитными пучками продольных и поперечных волн.

Показано, что экспериментальные значения достаточно хорошо согласуются с данными расчетов по полученным аналитическим выражениям. Отмеченное расхождение между данными экспериментов и расчетов можно объяснить тем, что аналитические расчеты были выполнены для непрерывного режима излучения, а в экспериментальных исследованиях использовался импульсный режим излучения ультразвука. Кроме того отмечено учитываемое влияние переходных контактных слоев при перестановках датчиков на образцах.

В заключении сформулированы основные результаты выполненных исследований:

1. Выполнен анализ дифракционных погрешностей при распространении звуковых пучков в твердой среде и получены интегральные выражения для расчета определяющего эти погрешности среднего значения упругого напряжения по площади приемника для продольных и поперечных волн.

2. Получены интегральные выражения для расчета амплитуды эхо-сигнала от плоскостного дефекта, амплитуды донного сигнала на бездефектном и дефектном участке и их отношения при регистрации сигналов в первом временном интервале при контроле продольными и поперечными волнами эхо и эхо-сквозным методом при регистрации сигналов во втором временном интервале. По результатам численного анализа выполнена оценка предельной выявляемости плоскостных дефектов листового проката методами отражения в диапазоне значений параметров актуальных для ультразвуковой дефектоскопии.

3. Получены интегральные выражения для оценки амплитуды эхо-сигнала акустической помехи от распространяющейся поперечной волны при контроле продольными волнами и продольной волны при контроле поперечными волнами. По результатам численного анализа выполнена оценка предельной чувствительности ультразвукового контроля листового проката в контактном варианте

4. Проведены экспериментальные исследования предельной выявляемости и предельной чувствительности плоскостных дефектов листового проката методами отражения. Показано, что экспериментальные значения удовлетворительно согласуются с данными расчетов по полученным аналитическим выражениям. На основании полученных данных сформулированы рекомендации для выбора параметров акустических трактов контрольно-измерительной аппаратуры в практических условиях.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Паврос С.К., Паврос К.С., Романович В.А. Анализ дифракционных погрешностей при измерении коэффициентов затухания продольных и поперечных волн в твердых телах // Известия СПбГЭТУ серия “Приборостроение и информационные технологии”,-2002,-№1,-с.25-32.
2. Паврос К.С., Сидоренко И.Г., О предельной выявляемости плоскостных дефектов листового проката методами отражения // Известия СПбГЭТУ серия “Приборостроение и информационные технологии”,-2013,-№6,-с.105-109.
3. Паврос К.С., Сидоренко И.Г., Теплякова А.В., Анализ акустической помехи при ультразвуковом контроле листов поперечными волнами // Известия СПбГЭТУ серия “Приборостроение и информационные технологии”,-2016,-№10,-с.73-76.

В других изданиях

4. Паврос К.С., Сидоренко И.Г., Рокштро Б., Сравнительная выявляемость плоскостных протяженных дефектов листового проката методами отражения и прохождения // “Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника”, - 2019, том 22, № 6, с. 75-83.
5. Паврос С.К., Паврос К.С., Шукин А.В. Дифракционные погрешности при измерении коэффициентов затухания продольных и поперечных волн в твердых средах. // Труды 7-ой НТК “Физические методы и средства контроля сред, материалов и изделий”, Леотест-2002,- с. 24-27,-Львов
6. Паврос С.К., Паврос К.С., Романович В.А. Анализ дифракционных погрешностей при измерении коэффициентов затухания продольных и поперечных волн в твердых средах // Труды XVI Российской конф. по неразрушающим физическим методам и средствам контроля,- Санкт-Петербург,-2002.
7. Паврос С.К., Паврос К.С., Романович В.А. О предельной чувствительности контроля листового проката продольными и поперечными волнами // Материалы международной научно-технической конференции ”Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов “, Могилев, 2004, С.70-71.
8. Паврос К.С., О предельной чувствительности ультразвукового контроля листового проката эхо-методом в контактном варианте // Известия СПбГЭТУ серия “Приборостроение и информационные технологии”,-2007,-№1,-с.11-14.
9. Паврос К.С., Сидоренко И.Г. Предельная выявляемость плоскостных дефектов листового проката зеркально-теневым методом//Вестник современных исследований. -2017 № 10-1(13), -с. 95-100.

Патенты

Способ измерения среднего размера зерна материала ультразвуковым методом [Текст]: пат. №2334224 Российская Федерация / Паврос С.К., Паврос К.С., Курков А.В.; патентообладатель Государственное образовательное учреждение Высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»-№ 2007101562/28; заявл. 16.01.2007; опубл. 20.09.2008 Бюл. №26.-3 с.