

Теплякова Александра Викторовна

РАССЕИВАЮЩИЕ СВОЙСТВА НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СО СЛОЖНОЙ  
СТРУКТУРОЙ В МЕТАЛЛАХ В ЗАДАЧАХ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И  
КОНТРОЛЯ

Специальность: 01.04.06 – Акустика

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» имени В.И.Ульянова (Ленина)

Научный руководитель –  
доктор технических наук, профессор Аббакумов К.Е.

Официальные оппоненты:

1. Богородский Алексей Витальевич, д.т.н.
2. Кривцова Галина Борисовна, к.т.н.

Ведущая организация – Петербургский Государственный Университет Путей  
Сообщения

Защита диссертации состоится « 25 » октября 2011 года в 13 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.06 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И.Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, ауд. 5108

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « 23 » сентября 2011 года.

Ученый секретарь совета  
по защитам докторских  
и кандидатских  
диссертаций Д212.238.06

к.т.н. А.М. Боронахин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Проблема качества выпускаемой продукции в современной промышленности заслуживает особого внимания, так как именно качество сырья, материалов и изделий в значительной степени определяет качество и срок службы машин и механизмов. С совершенствованием производства изделий и материалов модернизируются технологии их получения, что приводит к возрастанию многообразия дефектов естественного происхождения.

Неоднородности твердых упругих сред могут быть обусловлены многими причинами: инородными включениями, градиентами температуры, концентрации, зернистым строением вещества и т.д. В ходе технологических процессов производства металлоизделий в последних в результате действия различных случайных факторов, обусловленных некоторыми неизбежными отклонениями от "идеальной" технологии, могут формироваться самые разнообразные, нежелательные нарушения в требуемой структуре материала. В зависимости от своих характеристик неоднородности могут быть отнесены к потенциально опасным из-за сильного влияния на физико-механические свойства материала. По этой причине возникает необходимость в совершенствовании методов и средств обнаружения и оценки параметров неоднородностей на основе получения дополнительной информации об их строении в процессе производства и разработки предпосылок прогнозирования поведения конструкций в условиях эксплуатационных нагрузок в реальных производственных условиях.

Важным этапом в разработке прогрессивных методов и средств контроля материалов является анализ акустических трактов дефектоскопической аппаратуры при наличии в них замечающих по рассеивающим свойствам моделей неоднородностей. При теоретическом изучении рассеивающих свойств неоднородностей различных типов в твердых, упругих средах широко используются их идеализированные математические модели. Используемый для этих целей ряд объектов традиционных форм, ввиду многообразия строения неоднородностей естественного происхождения, не позволяет учесть многие особенности их строения, влияющие на их рассеивающие свойства. И как следствие этого в большинстве методов акустической диагностики в рамках традиционных подходов используют далеко не весь объем доступной информации о взаимосвязи характеристик рассеянного естественной неоднородностью ультразвука и строением самой неоднородности. Одной из особенностей строения, которая ранее не учитывалась при рассмотрении взаимодействия упругих волн с естественными неоднородностями, является сложная структура зоны контакта неоднородности с вмещающей средой, что позволяет утверждать о недостаточно полном изучении её влияния на характеристики рассеянных упругих полей применительно к задачам ультразвукового контроля.

В связи с вышеизложенным, данная диссертационная работа посвящена систематизированному изучению влияния состояния границы раздела "вмещающая среда – включение" на формирование характеристик полей упругих волн ультразвукового диапазона, рассеянных, как на отдельных, так и на множественных совокупностях локальных неоднородностей.

**Объектом исследования** в диссертации являются неоднородности естественного (в т.ч. металлургического) происхождения в металлах листового

проката, поковок, отливок и др., и композиционных материалах специального назначения.

**Предметом исследования** в работе являются волновые процессы, характеризующие рассеяние упругих волн в твердой среде объектами со сложной структурой строения.

**Целью диссертационной работы** является расширение и углубление физических предпосылок использования закономерностей рассеивающих свойств неоднородностей металлов для разработки усовершенствованных средств неразрушающего контроля с функциональными возможностями получения дополнительной информации о свойствах обнаруженных неоднородностей и повышения реалистичности интерпретации результатов акустических измерений.

**Достижение цели работы обеспечено решением следующих задач:**

- теоретическое и экспериментальное исследование влияния на результаты ультразвукового контроля особенностей состояния границы раздела "вмещающая среда – включение" при взаимодействии упругих плоских объемных волн с единичными неоднородностями (цилиндрической формы) упругих сред;

- теоретическое и экспериментальное исследование вопросов влияния на результаты ультразвукового контроля особенностей состояния границы раздела "вмещающая среда – включение" при взаимодействии упругих плоских объемных волн с множественными совокупностями цилиндрических неоднородностей упругих сред;

- установление связи между характеристиками рассеянных неоднородностями полей упругих полей и параметрами неоднородности, характеризующими её структуру и состояние границы раздела;

- разработка технологии и создание образцов с эталонными отражателями, имитирующими особенности состояния акустического контакта на границах неоднородностей по отношению к рассеянным на них упругим волнам;

- определение возможности и условий применения полученных закономерностей к задачам обнаружения и идентификации неоднородностей в металлах, в частности при разработке средств неразрушающего контроля.

**Методы исследования:** теоретические исследования, осуществлялись методами математической физики и анализа, интегрального исчисления. Экспериментальные исследования проводились в условиях компьютерного и натурального моделирования исследуемых процессов с использованием математических пакетов MathCAD, MatLab и данных акустических измерений.

**Достоверность полученных результатов** оценивалась путем сопоставления теоретических результатов с результатами проведенных экспериментов, а также при сопоставлении с более простыми частными случаями, известными по ранним исследованиям при установлении доказанной корректности.

**Научная новизна работы:**

1. Решены задачи о взаимодействии объемных плоских продольных гармонических волн, а так же поперечных волн разной поляризации в твердой изотропной среде с объектами, обладающими неоднородным качеством акустического контакта на граничных поверхностях: одиночным упругим изотропным цилиндрическим включением; со слоистым цилиндрическим

включением, на границе слоев которого присутствуют области с «не жесткой» связью; с набором конечного числа однонаправленных цилиндрических включений на части поверхности "не жестко" связанных с вмещающей средой;

2. Установлены ранее не известные зависимости между характеристиками рассеянных от цилиндрических неоднородностей упругих полей с параметрами их моделей; в частности показана возможность образования порогового значения протяженности контактной зоны с существенным влиянием на изменение рассеивающих свойств единичных и множественных объектов.

3. Показана возможность применения выявленных в работе закономерностей для совершенствования методов ультразвуковой диагностики материалов при эталонировании неоднородностей и интерпретации результатов контроля.

**Практическая ценность** диссертационной работы заключается в применении полученных результатов для:

– повышения информативности, достоверности, методов ультразвукового контроля материалов и изделий с неоднородностями сложного строения путем увеличения числа оцениваемых параметров;

– совершенствования метрологического обеспечения методов и средств ультразвуковой диагностики прокатных листовых материалов и изделий из них, поковок, отливок и т.д. и композиционных материалов специального назначения;

– научно-технического обоснования инженерных методик проектирования систем акустического контроля с учетом особенностей строения неоднородностей контролируемых изделий;

– внедрения в учебный процесс кафедры электроакустики и ультразвуковой техники;

### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Анализ цилиндрических включений, «не жестко» связанных с вмещающей средой на части поверхности позволяет сформировать модели неоднородностей естественного происхождения в упругих изотропных средах.

2. Рассеивающие свойства цилиндрических неоднородностей в зависимости от геометрических и физических параметров включения и его границы могут соответствовать: "свободной" поверхности, идеальному «скользящему» контакту, идеальной «сварной» границе или промежуточным состояниям («полужесткая» связь); изменение свойств рассеянного поля происходит «скачкообразно».

3. Характеристики поля, рассеянного совокупностью ориентированных включений "не жестко" связанных с вмещающей средой, в установленном диапазоне частот, зависят от расстояния между рассеивателями и их количества; при превышении «порогового» размера областей с нарушенным контактом рассеяние может быть соизмеримым с рассеянием от совокупности «полостей» тех же волновых размеров.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты исследований докладывались и обсуждались в рамках следующих мероприятий:

- IV и V науч.-техн. конференциях «Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів» («Физические методы и средства контроля сред, материалов и изделий «Леотест-2004 и Леотест-2005», Львов, 16-21 февраля 2004 г, 14-19 февраля 2005 г.
- Научно-техническая конференция «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов». – Могилев: 2004.
- Научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 2004 - 2010 годов.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 статей, из них – 2 статьи в журнале из Перечня изданий, рекомендованных ВАК, 1 статья в другом издании, 9 докладов на международных научно-технических конференциях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения, списка литературы, включающего 291 наименований и двух приложений. Основная часть работы изложена на 246 страницах машинописного текста. Работа содержит 101 рисунок и 22 таблицы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы объективные роль и место, принадлежащие существующим моделям неоднородностей твердых сред в задачах ультразвуковой дефектоскопии для целей усовершенствования ручных и автоматизированных средств контроля изделий из металлов и спецматериалов, обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований. Сформулированы научные положения, выносимые на защиту. Рассмотрена структура диссертационной работы.

В **разделе 1** рассмотрено современное состояние и проведен анализ известных работ по вопросам взаимодействия объемных упругих волн с естественными неоднородностями и их моделями в твердых упругих телах. Определены направления дальнейших исследований взаимодействия плоских упругих объемных волн и неоднородностей с несплошными зонами контакта с вмещающей средой на основе математических идеализированных моделей.

В **разделе 2** проведено решение на примере задачи дифракции плоской упругой продольной гармонической волны на отдельном упругом изотропном цилиндрическом включении в упругой изотропной среде с использованием граничных условий в приближении «линейного скольжения».

Для упрощения задачи и однозначной интерпретации полученных результатов считалось, что нарушение контакта наблюдается по всей длине сектора на поверхности цилиндра, ограниченного двумя образующими (рис.1).

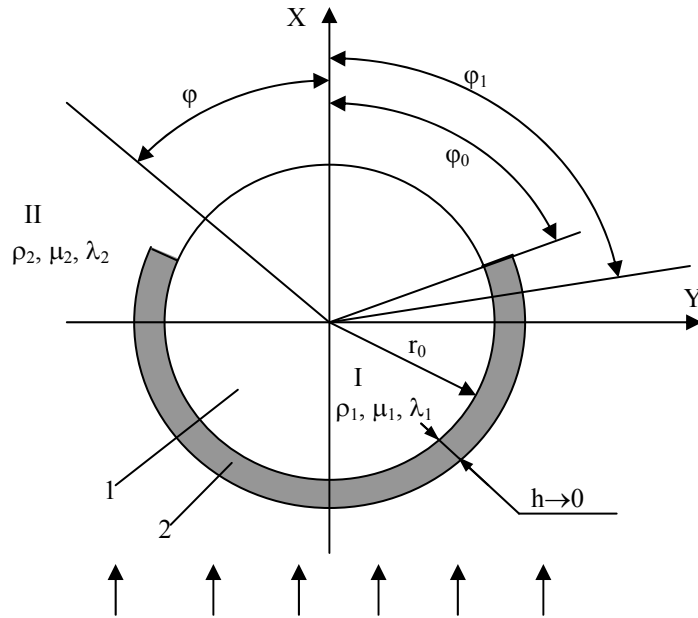


Рис. 1. Нормальное сечение упругого цилиндра 1, расположенного в незамкнутом кольцевом слое бесконечно малой толщины 2.

Для решения поставленной задачи поле падающей, отраженной и преломленных волн задавалось через скалярный и векторный потенциалы смещения и напряжения:

$$\begin{aligned}
 \Phi_{пад} &= \sum_n \varepsilon_n i^n J_n(k_l^{(2)} r) \cos(n\varphi); & \Phi_{np} &= \sum_n D_n J_n(k_l^{(1)} r) \cos(n\varphi); \\
 \Phi_{отр} &= \sum_n A_n H_n(k_l^{(2)} r) \cos(n\varphi); & \Pi_{np} &= \sum_n E_n J_n(k_t^{(1)} r) \sin(n\varphi); \\
 \Pi_{отр} &= \sum_n B_n H_n(k_t^{(2)} r) \sin(n\varphi); & & \\
 \varepsilon_n &= \begin{cases} 1, & n = 0 \\ 2, & n > 0 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $k_l$  и  $k_t$  - волновые числа продольной и поперечной волн,  $J_n, H_n$  - цилиндрические функции Бесселя и Ханкеля 1-го рода,  $A_n, B_n, D_n, E_n$  - неизвестные амплитудные коэффициенты упругих волн в каждой из частичных областей (временной множитель  $\exp(-j\omega t)$  здесь и далее опущен).

Введенные потенциальные функции должны удовлетворять решению уравнения Гельмгольца и граничным условиям. На участке с нарушением акустического контакта граничные условия задавались в приближении «линейного скольжения». Нарушение акустической связи на искривленной поверхности цилиндра количественно характеризовалось введением модулей контактных жесткостей  $KGN$  и  $KGT$ ,

ответственных за передачу упругих смещений соответственно в нормальном и тангенциальном направлениях по отношению к границе. Количественное изменение  $KGN$  и  $KGT$  в пределах  $10^{17} \div 10^{12}$  имитировало переход от условий «жесткой» связи к условиям «свободной» границы. Для того, чтобы выполнялось условие непрерывности поля в каждой из областей вводилась некоторая область, ограниченная углами  $\varphi_0, \varphi_1$  (рис. 1), в которой  $KGN$  и  $KGT$  изменялись плавно. При задании, таким образом, модулей контактных жесткостей, граничные условия принимали вид:

$$U_r^{II} = U_r^I + \frac{\sigma_{rr}^I}{KGN(\varphi)}; \quad U_\varphi^{II} = U_\varphi^I + \frac{\sigma_{r\varphi}^I}{KGT(\varphi)}; \quad \sigma_{rr}^{II} = \sigma_{rr}^I; \quad \sigma_{r\varphi}^{II} = \sigma_{r\varphi}^I. \quad (2)$$

После подстановки компонент вектора смещения и напряжения падающей и рассеянной волн в систему (2) получались уравнения, содержащие члены всех порядков  $n$ . Используя свойства полноты и ортогональности функций  $\sin(n\varphi)$  и  $\cos(n\varphi)$  на интервале  $(0, 2\pi)$ , и элементарные математические преобразования эта система сводилась к следующему виду:

$$\begin{cases} D_n + \sum_m D_m \alpha_{1n,m} + \sum_m E_m \beta_{1n,m} = g_1 \\ E_n + \sum_m D_m \alpha_{2n,m} + \sum_m E_m \beta_{2n,m} = g_2 \\ A_n = \Delta a_{1n} + D_n \Delta a_{2n} + E_n \Delta a_{3n} \\ B_n = \Delta b_{1n} + D_n \Delta b_{2n} + E_n \Delta b_{3n} \end{cases} \quad (3)$$

В работе показано, что данная система уравнений является квазирегулярной и разрешимой методом усечения. В роли одной из количественных характеристик поля, рассеянного цилиндрической неоднородностью с нарушенной адгезией на части поверхности, исследовалось нормированное поперечное сечение рассеяния:

$$Q = \frac{2}{k_2} \left( 2|A_0|^2 + 2|B_0|^2 + \sum_{n=1}^{\infty} (|A_n|^2 + |B_n|^2) \right) \cdot (\rho_2 \omega^2)^2$$

На основе результатов численного анализа решения системы (3) для амплитудных коэффициентов проведено изучение влияния на характеристики рассеянного поля параметров граничных условий, размера области с «нежестким» контактом, ее ориентации относительно фронта падающей волны и наличия затухания упругих волн.

На рис. 2 и 3 показаны примеры расчета полного нормированного поперечного сечения рассеяния (рис.2) и отношения частного нормированного поперечного сечения рассеяния продольной волны к частному нормированному поперечному сечению рассеяния поперечной волны при падении продольной волны с теневой стороны зоны нарушенного контакта для графитового включения в стали (рис. 2, 3 а) и в меди (рис. 2, 3 б). При полном отсутствии контакта поперечное сечение рассеяния совпадает с расчетом для полости, а при очень малом угле раскрытия – с результатами для идеального состояния поверхности. Резонансные явления наблюдаются в переходной области и при малых значениях волнового размера включения ( $k_{12}a < 1$ ), и оказывают существенное влияние на рассеивающие свойства такой неоднородности в низкочастотной области.



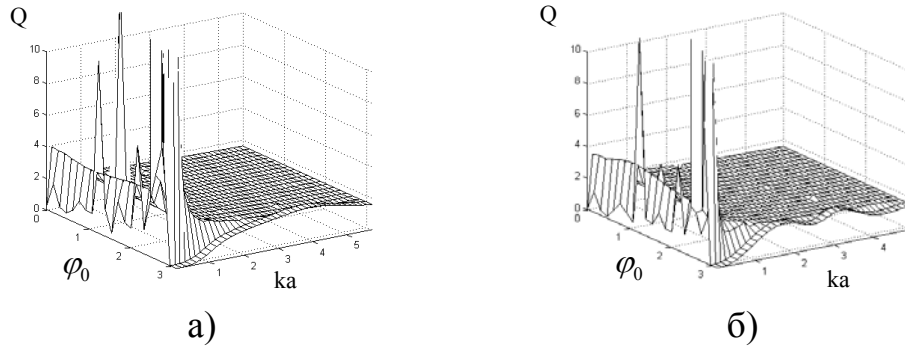


Рис. 2. Зависимость нормированного поперечного сечения рассеяния от величины зоны нарушенной адгезии и волнового размера для графитового включения в: а) стали; б) меди.

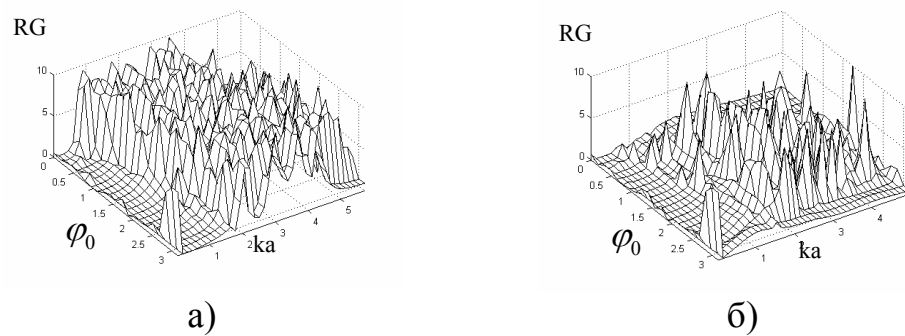


Рис. 3. Зависимость отношения поперечного сечения рассеяния, связанного с продольной волной к поперечному сечению рассеяния, связанного с поперечной волной, от величины зоны с нарушенной адгезией и волнового размера для графитового включения в: а) стали; б) меди.

Из анализа зависимостей, представленных на рис. 3 следует, что резонансные явления сопровождаются интенсивным перераспределением энергии между типами волн, как в случае полости (вся поверхность имеет нарушенный контакт), так и в случае промежуточного состояния (только часть поверхности имеет нарушенную адгезию).

Поскольку вещество, находящееся даже в монолитном состоянии, может характеризоваться значительным затуханием упругих волн, а для веществ, находящихся в состоянии различной степени «консолидированности» или «раздробленности», коэффициент затухания может достигать значений порядка  $10^3$  1/м, то было оценено влияние затухания на процесс рассеяния плоской упругой продольной волны на цилиндрическом, упругом включении, из вещества, обладающего затуханием, при изменении размеров зоны с «неидеальным» контактом.

На рис. 4 и 5 представлены результаты, аналогичные рассмотренным на рис. 2 и 3, но с учетом затухания волн в материале включения.

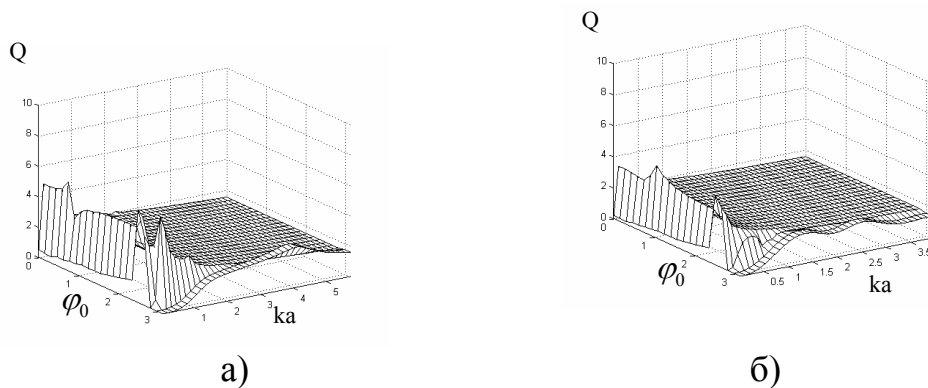


Рис. 4. Зависимость нормированного поперечного сечения рассеяния от величины зоны с нарушенной адгезии и волнового размера с учетом затухания для графитового включения в: а) стали; б) меди.

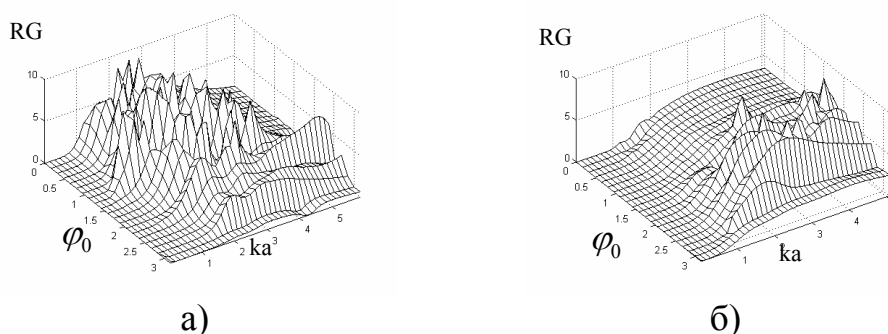


Рис. 5. Отношение поперечного сечения рассеяния, связанного с продольной волной к поперечному сечению рассеяния, связанного с поперечной волной с учетом затухания для графитового включения в: а) стали; б) меди.

При отклонениях технологии общем случае зона с нарушенным акустическим контактом может располагаться произвольно, относительно фронта падающей волны. Поэтому проведен анализ поля, рассеянного включением, с частичным нарушением акустического контакта на поверхности при произвольном расположении этой зоны относительно фронта падающей волны.

На рис. 6 показана зависимость угла раскрытия (размера) сектора с нарушением контакта, от угла его поворота относительно фронта падающей волны при заданных значениях волнового размера включения.

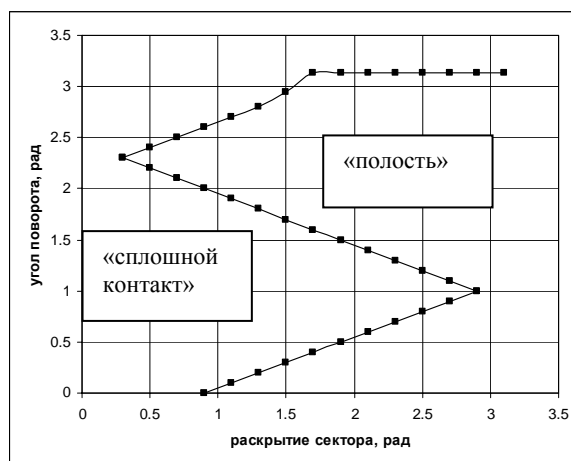


Рис. 6. Зависимость угла раскрытия сектора с нарушенным контактом от угла его поворота

относительно фронта падающей волны.

Так же проведен расчет поля, рассеянного такой неоднородностью с учетом вязкого трения на границе матрица – включение и проанализировано влияние вязкого трения на итоговое поле.

**В разделе 3** проведено решение задачи дифракции плоской упругой продольной гармонической волны на отдельном упругом цилиндрическом включении, окруженном кольцевым слоем конечной толщины, с частичным нарушением условий контакта на границе слоев (рис. 7).

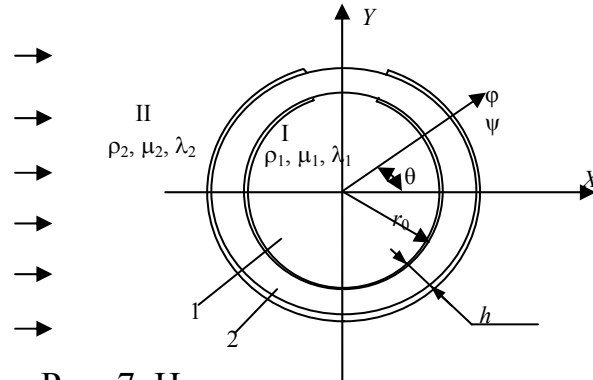


Рис. 7. Нормальное сечение упругого цилиндра 1, расположенного в замкнутом кольцевом слое 2.

При решении этой задачи уравнения для нахождения амплитудных коэффициентов рассеяния записывались в матричной форме, используя обобщенную мультипликативную матрицу “переноса”, связывающую матрицы-столбцы “упругие смещения-напряжения” во внешней среде и внутреннем слое:

$$\begin{Bmatrix} u_r^{(0)} \\ u_\theta^{(0)} \\ u_z^{(0)} \\ \sigma_{rr}^{(0)} \\ \sigma_{r\theta}^{(0)} \\ \sigma_{rz}^{(0)} \end{Bmatrix} = \{KP^{(0)}\} \{ZS^{(1)}\} \{KP^{(1)}\} \dots \{KP^{(j-1)}\} \{ZS^{(j)}\} \{KP^{(j)}\} \begin{Bmatrix} u_r^{(j+1)} \\ u_\theta^{(j+1)} \\ u_z^{(j+1)} \\ \sigma_{rr}^{(j+1)} \\ \sigma_{r\theta}^{(j+1)} \\ \sigma_{rz}^{(j+1)} \end{Bmatrix},$$

$$\{KP^{(j)}\} = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 & KPN^{(j)} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & KPT^{(j)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & KPT^{(j)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix}.$$

$$\left[ zS_n^j \right] = \begin{bmatrix} -\frac{\lambda}{r(\lambda+2\mu)} & -\frac{in\lambda}{r(\lambda+2\mu)} & \frac{1}{(\lambda+2\mu)} & 0 \\ -\frac{in}{r} & \frac{1}{r} & 0 & \frac{1}{\mu} \\ \frac{4\mu(\lambda+\mu)}{r^2(\lambda+2\mu)} - \rho\omega^2 & \frac{4in\mu(\lambda+\mu)}{r^2(\lambda+2\mu)} & -\frac{2\mu}{r(\lambda+2\mu)} & -\frac{in}{r} \\ -\frac{4in\mu(\lambda+\mu)}{r^2(\lambda+2\mu)} & \frac{4n^2\mu(\lambda+\mu)}{r^2(\lambda+2\mu)} - \rho\omega^2 & -\frac{in\lambda}{r(\lambda+2\mu)} & -\frac{2}{r} \end{bmatrix},$$

где  $\{zS_n^j\}$ -матрицы “переноса” для “j”-го цилиндрического слоя и её элементы;  $\{K_{p(n)}\}$ -матрицы “переноса” “нежесткой” связи для податливостей на “j”-й границе.

На основе результатов численного анализа исследованы закономерности влияния на характеристики рассеянного поля толщины слоя, размера и расположения области с «нежестким» контактом. В целом они оказались сопоставимы с закономерностями и результатами, ранее полученными для дифракции на одиночном цилиндре.

**В разделе 4** выполнено решение задачи рассеяния объемных продольной плоской упругой гармонической волны на произвольной совокупности однонаправленных упругих изотропных круговых цилиндров, на поверхности которых наблюдается нарушение акустической связи в пределах некоторого сектора (рис. 8).

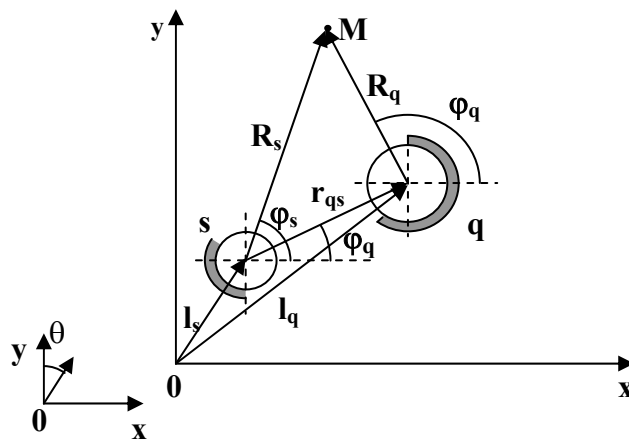


Рис. 8. К постановке задачи дифракции продольной волны на конечной системе однонаправленных цилиндрических включений.

Для описания взаимодействия падающей волны с набором цилиндров в матрице и в упругих цилиндрах возбуждаются волновые процессы, для которых при данной геометрии задачи достаточно скалярного потенциала и одной компоненты векторного потенциала. Исходя из принципа суперпозиции, рассеянные поля представлялись в виде суммы полей, рассеянных каждым цилиндром, и которые в каждой из локальных систем координат  $(r_q, \varphi_q)$ , и имели вид:

$$\begin{aligned}\Phi_s &= \sum_{q=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^{(q)} H_n^{(1)}(k_{l2} r_q) e^{in\varphi q} \\ \Psi_s &= \sum_{q=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n^{(q)} H_n^{(1)}(k_{t2} r_q) e^{in\varphi q}\end{aligned}\quad (4)$$

где  $H_n^{(1)}$  функции Ганкеля 1-го рода, удовлетворяющие условию излучения на бесконечности,  $A_n^{(q)}$ ,  $B_n^{(q)}$  - неизвестные коэффициенты в разложениях потенциалов продольной и поперечной волн в матрице соответственно, в q-ой системе координат.

Рассеянные поля во внутренней области q-го цилиндра записывались аналогичным образом:

$$\begin{aligned}\Phi_f^{(q)} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n J_n(k_{l1} r_q) e^{in\varphi q}, \\ \Psi_f^{(q)} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_n J_n(k_{t1} r_q) e^{in\varphi q},\end{aligned}\quad (5)$$

где  $k_{l1}$ ,  $k_{t1}$  - волновые числа продольной и поперечной, соответственно, волн в упругих цилиндрах,  $J_n$  - цилиндрические функции Бесселя, ограниченные при нулевом значении аргумента. Применяя теорему сложения для цилиндрических функций, выражения для потенциалов полей, записанных в системе координат  $q=s$  в виде, записывались в виде:

$$\begin{aligned}\Phi_s &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ A_n^{(s)} H_n^{(1)}(k_{l2} r_s) + \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} A_{n,m}^{(s)} H_{m-n}^{(1)}(k_{l2} r_{qs}) J_n(k_{l2} r_s) \right] e^{in\varphi S}, \\ \Psi_s &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ B_n^{(s)} H_n^{(1)}(k_{t2} r_s) + \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} B_{n,m}^{(s)} H_{m-n}^{(1)}(k_{t2} r_{qs}) J_n(k_{t2} r_s) \right] e^{in\varphi S}.\end{aligned}\quad (6)$$

$$\begin{aligned}\Phi_f &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n J_n(k_{l1} r) e^{in\varphi S} \quad \Psi_f = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_n J_n(k_{t1} r) e^{in\varphi S} \\ \Phi_0 &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n J_n(k_{l2} r) e^{-in(\varphi S + \theta)}.\end{aligned}$$

Подстановка выражений (6) в граничные условия приводила к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений для определения неизвестных амплитудных коэффициентов рассеянного поля:

$$X_{m,s,j} + \sum_n \sum_q \sum_g X_{n,q,g} Y_{1,n,m,q,j,g} + \sum_n \sum_g X_{n,s,g} Y_{2,n,m,s,j,g} = F_{m,s,j} \quad (7)$$

В (7) слагаемое в виде «тройной» суммы учитывает взаимодействие между цилиндрами, которое, как показал анализ, «ослабевает» с увеличением расстояния между цилиндрами. «Двойная» сумма учитывает вклад компонентов, возникающих из-за «нарушения акустического контакта» на поверхностях цилиндров. Данная система, как показано в работе, разрешима методом усечения и для ее решения использовались приближенные численные методы.

На основе результатов численного анализа системы (7) изучено влияние на характеристики рассеянного поля параметров граничных условий и наличия затухания упругих волн в цилиндрах, а также других параметров системы цилиндров, таких как

«геометрическое расположение» цилиндров в системе, параметров зон нарушения контакта, акустических свойств материалов включения и пр.

**В разделе 5** рассмотрено и проанализировано уравнение акустического тракта при наличии в нем цилиндрической неоднородности с частично нарушенной адгезией на границе при реализации эхо-метода контроля, и на его основе оценено ослабление пришедшего на приемник сигнала по отношению к излученному.

Для дальнего поля искателя при ограничении «нулевым» приближением, получено приближенное выражение для оценки амплитуды отраженного от включения поля:

$$|T'_{ZZ}| \approx |T_{ZZ}^0| \frac{RNL(k_2 a) S_a}{z \cdot \lambda} \cdot \exp(-2 \cdot \delta \cdot z) = \pi |T_{ZZ}^0| RNL(k_2 a) \left( \frac{z f}{z} \right) \exp(-2 \cdot \delta \cdot z) \quad (8)$$

где  $RNL(k_2 a)$  - коэффициент отражения, зависящий от волнового размера цилиндрической неоднородности и состояния адгезионной связи на границе цилиндра. Аналогичные выражения были получены и исследованы применительно к рассмотрению и других моделей: типа «многослойного цилиндра» и системы однонаправленных цилиндрических включений.

Полученные выражения позволили установить аналитические зависимости между параметрами информационных сигналов, регистрируемых при акустических измерениях, и параметрами, используемыми для описания сложной структуры рассеивателей, что подтверждается соответствующими зависимостями, приведенными в работе. Они использовались далее (раздел 6) для сопоставления данных теории и эксперимента.

**В разделе 6** рассмотрены вопросы экспериментального моделирования нарушения акустических связей на границе металл-включение при создании экспериментальных образцов, имитирующих свойства дефектов в упругой твердой среде.

Экспериментально подтверждена возможность моделирования криволинейной границы раздела «включение – вмещающая среда» с помощью "бесконечно тонкого" в смысле пренебрежимо малой волновой толщины промежуточного слоя в широком диапазоне волновых размеров рассеивателей, для имитации условий «линейного скольжения», имеющих важность для практических задач ультразвукового контроля. Разработана технология изготовления образцов с неоднородностями, имитирующими свойства естественных цилиндрических включений с частичным нарушением акустического контакта на поверхности включения.

На основании данных анализа и теоретических предпосылок осуществлен выбор, доработка и настройка соответствующей измерительной аппаратуры в экспериментальной установке, даны описания методик и результаты экспериментов, подтверждающих основные выводы теории.

**В заключении** сформулированы основные результаты, достигнутые в ходе выполнения диссертационной работы.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ** *В рецензируемом журнале из списка ВАК*

1. Аббакумов К.Е., Сидоренко И.Г., Таганов И.Н., Теплякова А.В. Ультразвуковые способы оценки структуры многослойных металлов. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», - 2010, - №6. - С. 75-82.

2. Теплякова А.В. Дифракция на цилиндрической неоднородности с несимметричной структурой в твердой среде. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», - вып.1., - 2006. - С. 23-28

### *В других изданиях*

3. К.Е. Аббакумов, В.Ф. Горбачевич, С.К. Паврос, С.В. Ромашкин, А.В. Теплякова, А.В. Щукин. Рассеивающие свойства периодической плоскостной совокупности цилиндрически рассеивающей с нарушенной адгезией на границе раздела. //Збірник наукових праць. III міжнародна наукова-технічна конференція «Фізика методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів.» ЛЕОТЕСТ-2001. Славське 12-16 Лютого 2001р., Стр. 28-31.

4. К.Е. Аббакумов, В.Ф. Горбачевич, Д.В. Новокшенов, А.В. Теплякова. Особенности рассеивающих свойств сферических неоднородностей с нерегулярным строением. //Сборник трудов XI сессии Российского Акустического Общества. Физическая акустика, распространение и дифракция волн. Т.1, М., ГЕОС, 2001г., Стр. 198-201.

5. Аббакумов К.Е., Теплякова А.В., Фурман И.В. Рассеивающие свойства цилиндрических неоднородностей с нерегулярной структурой в твердой среде. //Збірник наукових праць. ЛЕОТЕСТ-2004. Славське 16-21 Лютого 2004р.

6. Аббакумов К.Е., Львов Р.Г., Теплякова А.В. Дифракция плоских звуковых волн на конечной системе цилиндрических включений с нерегулярной структурой в твердой среде. //Збірник наукових праць. ЛЕОТЕСТ-2004. Славське 16-21 Лютого 2004р.

7. Аббакумов К.Е., Егоров Н.Н., Теплякова А.В., Фурман И.В. Моделирование акустического контакта при контроле изделий наклонным преобразователем. //Збірник наукових праць. ЛЕОТЕСТ-2004. Славське 16-21 Лютого 2004р.

8. Аббакумов К.Е., Львов Р.Г., Теплякова А.В. Дифракция на цилиндрическом включении в упругой среде. //Збірник наукових праць. ЛЕОТЕСТ-2005, стр.48-52. Славське 14-19 Лютого 2005р.

9. Аббакумов К.Е., Львов Р.Г., Теплякова А.В. Дифракция упругих волн на компактной неоднородности с несимметричным строением. //Збірник наукових праць. ЛЕОТЕСТ-2005, стр. 44-47. Славське 14-19 Лютого 2005р.

10. Аббакумов К.Е., Львов Р.Г., Теплякова А.В. Рассеивающие свойства цилиндрических неоднородностей с нерегулярной структурой в твердой среде. //Материалы международной научно-технической конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов». Могилев: 2004. - С. 28-29

11. Теплякова А.В. Дифракция на конечной системе цилиндрических включений со сложной структурой.//Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», - 2008, - №1. - С. 55-60

12. Теплякова А.В. Особенности рассеяния акустических волн на сложноструктурированных объектах.//8-я Международная конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности». Москва, Издательский дом «Спектр», 2009г, С. 56-57