

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет» (научно-исследовательский университет)
Институт естественных и точных наук
Физический Факультет
Кафедра физической электроники

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

д.х.н., профессор

_____/Викторов В.В./

« ____ » _____ 2017г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

д.т.н., профессор

_____/Гуревич С.Ю./

« ____ » _____ 2017г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ИЗМЕРЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК В МИКРОМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ
С ПОМОЩЬЮ ВОЛН ЛЭМБА
ЮУрГУ – 11.04.04.2017.114/444 ПЗ ВКР

Автор, студент группы ЕТ – 263

_____/Храмец Д.В./

" ____ " _____ 2017г.

Нормоконтролер, к.т.н., доцент

_____/Колмакова Н.С./

" ____ " _____ 2017г.

Руководитель, к.т.н., доцент

_____/Толипов Х.Б./

" ____ " _____ 2017г.

Челябинск 2017

АННОТАЦИЯ

Храмец Дмитрий Валерьевич. Измерение тонких пленок микрометрового диапазона с помощью волн Лэмба. – Челябинск: ЮУрГУ, ИЕиТН, Ф; 2017, 45с. 14 ил., библиогр. список – 23 наим.

Объектом исследования данной выпускной квалификационной работы являются различные процессы по измерению тонкопленочных материалов.

Цель выпускной квалификационной работы - исследование тонких пленок и их последующее измерение.

В ходе работы были исследованы образцы тонких пленок различного состава, был проведен эксперимент по измерению тонкопленочных материалов.

Впервые изучена характеристика по использованию акустических волн в условиях контроля за выращиванием тонкопленочных материалов.

Получены графики и особенности выращивания и контроля тонкопленочных материалов.

						Лист
					ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР	2
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	5
1.1. Понятие о волнах Лэмба. Структурные особенности и их применение.....	5
1.1.1. Особенности использования волн Лэмба	5
1.1.2. Формулы с использованием потенциала Φ	7
1.2. Компонентные особенности волн Лэмба.....	8
1.3. Условия за наблюдением поперечного типа волны.	9
1.4. Соотношение групп волн и их использование.....	11
1.4.1. Фазовые и групповые скорости волн Лэмба	13
1.4.2. Характерные особенности волн Лэмба	15
1.4.3. Особенности Пуассоновского эффекта.....	17
1.4.4. Метод (ЭМА)	20
1.5. Распределение акустических методов	22
1.5.1. Методы возбуждения волн и их колебания.....	23
1.5.2. Основные достоинства и недостатки метода (ЭМА).....	26
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	28
2.1. Оборудование	28
2.1.1. Основные характеристики просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) и его методов.....	28
2.1.2. Параметры ЭМА дефектоскопии.....	38
2.1.3. Анализ сравнительных возможностей прямых ЭМАП волн.....	39
2.2. Описание эксперимента.....	41
2.3. Выводы	46
Заключение	47
Библиографический список.....	48

ВВЕДЕНИЕ

Тема исследования – разработка метода измерения толщины тонких пленок с помощью волн Лэмба.

Актуальность данной темы обусловлена тем, что на сегодняшний день не существует методики измерения толщины тонких пленок с достаточной для практики точностью.

В данной работе в ходе разработки методики эксперимента были использованы акустические антисимметричные волны Лэмба, где скорость распределения волны будет характерно зависеть от ее толщины. Так как скорость распространения в импульсных методах будет определяться временем прохождения импульса между датчиками, которые находятся на определенных расстояниях.

Задачами работы являются проверка возможности измерения тонких пленок акустическими методами.

						Лист
					ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР	4
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Понятие о волнах Лэмба. Структурные особенности и их применение

На сегодняшний день использование ультразвуковых волн строится по принципу, введенному Лэмбом в 1917 г. В соответствии с волнами Релея, волны Лэмба используются в дефектоскопии ультразвуковых упругих волн, по отношению к пластинчатым образцам, либо заданным материалам. Среди них керамика, пластик, а так же различные металлы.

Применение этих типов волн помогает в различных областях современной электроники твердого тела. На сегодняшний день контроль выращивания тонких пленок становится универсальным, данный подход в практическом использовании помогает выращивать тонкопленочные образцы любой толщины и любого размера.

До применения данных типов волн, а именно использование продольных типов волн было нецелесообразно контролировать тонкостенные образцы, а так же поверхностное состояние.

Связано это в первую очередь с тем, что размер волнового фронта составляет много длин волн.

1.1.1. Особенности использования волн Лэмба

Использование ультразвуковых волн данного типа, а именно волн Лэмба позволяет устранять ограничения в условиях системного роста тонкопленочного образца.

Волны Лэмба в условиях линий задержки на сегодняшний день помогает создавать новый тип волн, так называемых дисперсионных, особенностью которых является регулирование процесса задержки прохождения между волнами и тонкопленочным материалом, при различных условиях выращивания тонких

									Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР				5

пленок.

Использования упругих волн или упругого возмущения обладают глубиной затухания и ограничением твердотельного материала.

Рассмотреть данную систематизацию можно на примере гармонической волны на границе изотропного пространства в условиях вакуума и упругости образцов.

Пространство области можно описать как $Z > 0$, а направление волны должно соответствовать оси X . Для этого необходимо обозначить и задействовать полупространство, скалярную и векторную величину Φ и вектор смещения V будет соответствовать данному типу:

$$V = \text{grad}\varphi + \text{rot}\psi$$

В данном случае используется плоская волна координаты Y . Исходя из этого потенциал вектора будет во многом отличаться от нуля, согласно оси Y .

Потенциал Φ является продольным и соответствует волнам сдвигаемых образцов.

Гармонические колебания можно выразить:

$$\frac{\delta^2 \varphi}{\delta Z^2} + \frac{\delta^2 \varphi}{\delta x^2} + k_l^2 \varphi = 0;$$

$$\frac{\delta^2 \psi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta Z^2} + k_t^2 \psi = 0;$$

Помимо этого необходимо задействовать:

Здесь $k_l = \omega \sqrt{\frac{\rho}{\lambda + 2\mu}}$, $k_t = \omega \sqrt{\frac{\rho}{\mu}}$ - волновые числа соответственно продольных и поперечных волн; ω - круговая волна.

1.1.2. Формулы с использованием потенциала Φ

Соответственно смещение частицы можно представить через потенциал Φ по формулам:

$$U = \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\delta \psi}{\delta z},$$

$$\sigma_{xx} = \lambda \left(\frac{\delta^2 \varphi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \varphi}{\delta z^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\delta^2 \varphi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta x \delta z} \right),$$

$$\sigma_{zz} = \lambda \left(\frac{\delta^2 \varphi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \varphi}{\delta z^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\delta^2 \varphi}{\delta z^2} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta x \delta z} \right),$$

$$\sigma_{xz} = \mu \left(2 \frac{\delta^2 \varphi}{\delta x \delta z} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta x^2} - \frac{\delta^2 \psi}{\delta z^2} \right).$$

Необходимо найти решение уравнений, согласно гармонической волне, направленной по направлению оси X.

Используем дифференциальное уравнение:

$$\varphi = F(z)e^{i(kx - \omega t)};$$

$$\psi = G(z)e^{i(kx - \omega t)}.$$

Дифференциальное уравнение для функции $F(z)$ и $G(z)$:

$$\frac{d^2 F(z)}{dz^2} - (k^2 - k_l^2)F(z) = 0;$$

$$\frac{d^2 G(z)}{dz^2} - (k^2 - k_t^2) G(z) = 0.$$

Составляя выражение для потенциала Φ , можно получить соотношение:

$$\varphi = -Ae^{i(kx - \omega t - qz)};$$

$$\psi = iA \frac{2kq}{k^2 + s^2} e^{i(kx - \omega t - sz)}.$$

$$\eta^6 - 8\eta^4 + (3 - 2\xi^2)\eta^2 - 16(1 - \xi^2) = 0.$$

$$\eta = \frac{k}{k_t} = \frac{c_t}{c}; \quad \xi = \frac{k_l}{k_t} = \frac{c_t}{c_l};$$

где введены обозначения

В данном случае искомое уравнение имеет шесть корней, а так же коэффициент Пуассона упругой среды.

Стоит отметить, что упругой волне характерен искомый корень, находящийся на пересечении нуля и единицы. Его можно обозначать индексом R . Помимо этого искомый корень будет находиться в соотношении 0 и 0,5 в упругой среде, согласно коэффициенту Пуассона. Также описывается уравнением по отношению к коэффициенту и индексу R .

$$\eta_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu}.$$

1.2. Компонентные особенности волн Лэмба

Стоит отметить, что упругие волны, распространяемые в определенной среде, называемые волнами Лэмба, между волнами смещения плоскости используемого материала являются основным компонентом в ходе использования тонкопленочных образцов в твердотельной электронике.

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР	8

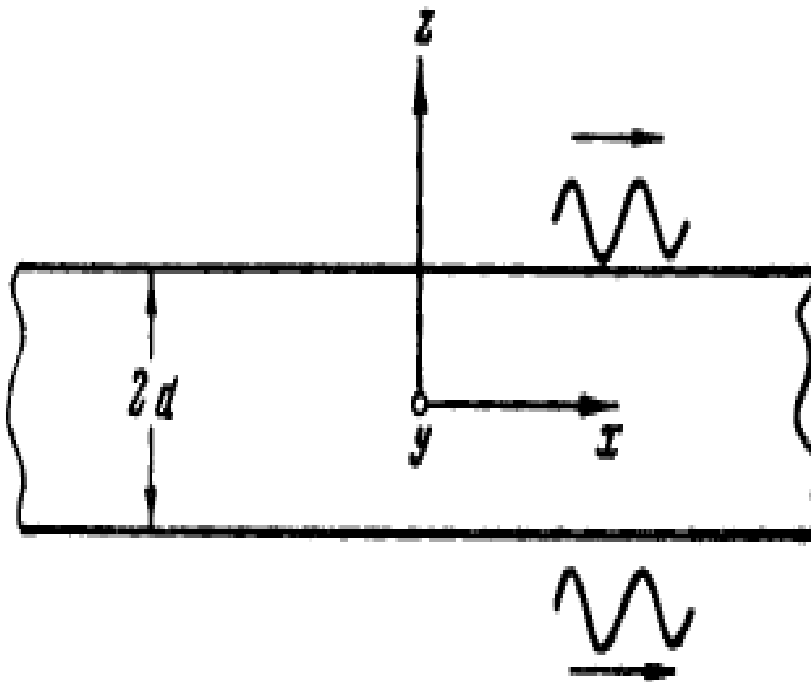


Рис. 1. Использование тонких пленок, на основе упругих волн Лэмба.

Волны Лэмба представляют собой тип волн, которые распространяются в так называемом упругом волноводе. Это может быть различный материал:

- Керамические материалы;
- Металлические материалы;
- Синтетические материалы;

1.3. Условия наблюдения за поперечным типом волны

Помимо этого в волноводе и в самой волне может преобладать дополнительный тип волны, так называемый поперечный тип волны. Данный тип волны создается согласно направлению распространения к границе пленочного материала. Также, как и в волне Релея у векторного потенциала будет отличаться компонента, которая соответственно находится в необходимом положении Y . Необходимая связь компонентов с потенциалами дается формулами:

$$\varphi = A_s \cosh qz e^{ikx} + B_a \sinh qz e^{ikx},$$

$$\psi = D_S s_h q z e^{ikx} + C_a c_h q z e^{ikx}.$$

Где А, В, С, D – произвольные постоянные; К–волновое число волн Лэмба.

$$(k^2 + s^2) c_h q d A_S + (k^2 + s^2) s_h q d B_a + z i k s s_h s d C_a + z i k s c_h s d D_S = 0;$$

$$(k^2 + s^2) c_h q d A_S - (k^2 + s^2) s_h q d B_a - z i k s s_h s d C_a + z i k s c_h s d D_S = 0;$$

$$-z i k q s_h q d A_S + z i k q c_h q d B_a - (k^2 + s^2) c_h s d C_a + (k^2 + s^2) c_h s d D_S = 0;$$

Данная система удовлетворяется, если удовлетворяются следующие подсистемы:

$$(k^2 + s^2) c_h q d A_S + z i k s c_h s d D_S = 0,$$

$$(k^2 + s^2) s_h q d B_a + z i k s s_h s d C_a = 0,$$

Следовательно, подсистемы имеют решения в случае с равенствами к нулю и определителю.

$$(k^2 + s^2)^2 c_h q d s_h s d - 4k^2 s_h q d s_h c d = 0,$$

$$(k^2 + s^2)^2 s_h q d s_h c d - 4k^2 c_h q d s_h s d = 0;$$

Исходя из данных уравнений можно получить выражения для искомым материалов.

$$\varphi = A_S c_h q_S z e^{ik_s x} + B_a s_h q_a z e^{ik_a x};$$

В тонкопленочной пластине может находиться разное количество симметричных и антисимметричных волн Лэмба. Это связано с тем, что каждая группа будет обладать только свойственными ей характеристиками, такими как фазовые скорости и напряжение толщины пластины.

Количество волн можно определить с помощью корней уравнения, так как корень будет являться фазовой скоростью каждой из групп.

Помимо корней, которые будут использоваться в уравнении, так же будет преобладать большое число мнимых корней согласно экспоненциальным движениям. Мнимые корни не участвуют в формировании волны, поэтому необходимо учитывать вещественные корни данных уравнений.

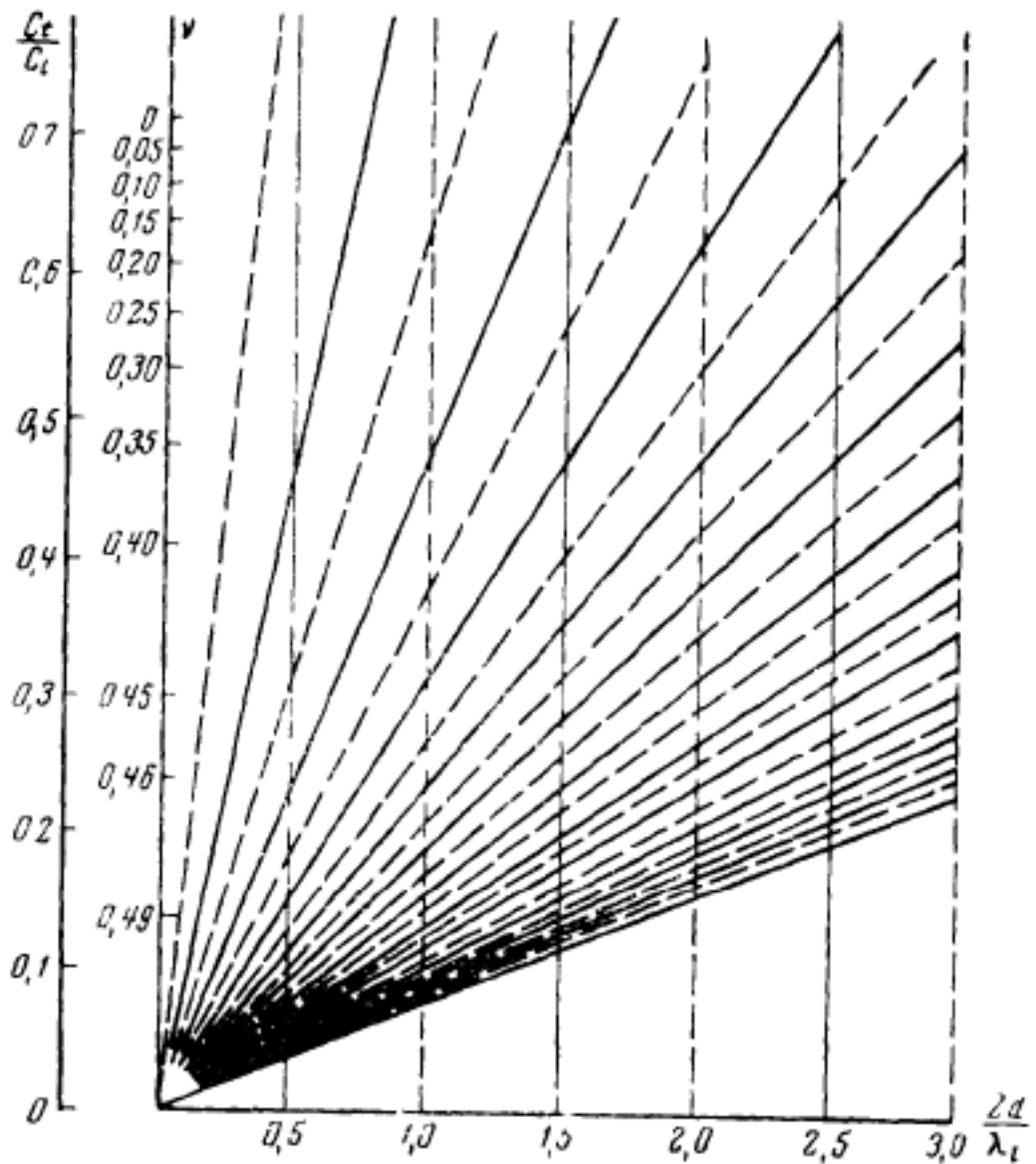
Так же стоит учитывать, что корень уравнения соответствует симметрии волны. Появление новых корней можно обозначить как критические по отношению к толщине и частоте пленки.

$$\text{Для симметричных волн: } \begin{cases} 2d = \frac{\lambda_l}{2}, \frac{3\lambda_l}{2}, \frac{5\lambda_l}{2}, \dots \\ 2d = \lambda_t, 2\lambda_t, 3\lambda_t, \dots \end{cases}$$

$$\text{Для антисимметричных волн: } \begin{cases} 2d = \lambda_l, 2\lambda_l, 3\lambda_l, \dots \\ 2d = \frac{\lambda_t}{2}, \frac{3\lambda_t}{2}, \frac{5\lambda_t}{2}, \dots \end{cases}$$

Помимо этого необходимо учитывать монограмму для определения количества волн Лэмба в пластине. На оси абсцисс представлена толщина пластины согласно длине упругой волны. На оси ординат представлено соотношение скоростей, а так же коэффициент Пуассона. Вертикальные кривые монограммы обозначены критическими частотами упругих волн.

Для определения движения упругих волн, необходим подсчет числа линий волны распространяющихся по движению согласно коэффициенту



Пуассона.

Рис. 3. Монограмма для определения количества волн Лэмба в пластине.

1.4.1. Фазовые и групповые скорости волн Лэмба

Стоит отметить про фазовые и групповые скорости волн Лэмба. К фазовой скорости волны Лэмба можно отнести ее основные характеристики. Их применение позволяет вычислять смещение, а так же напряжение в волне, согласно любой точке пластины.

Помимо этого, характеристики волн помогают вычислять групповую скорость волны.

Фазовая скорость находится с помощью численного решения уравнений характеристического вида. Для данного типа уравнений существует безразмерная форма вычислений, представленная ниже:

$$\frac{tg\sqrt{1-\zeta^2} * a}{tg\sqrt{\xi^2-\zeta^2} * a} = -\frac{4\xi^2\sqrt{1-\zeta^2}\sqrt{\xi^2-\zeta^4}}{(2\zeta^2-1)^2}$$

Для антисимметричных

$$\frac{tg\sqrt{1-\zeta^2} * a}{tg\sqrt{\xi^2-\zeta^2} * a} = -\frac{(2\zeta^2-1)^2}{4\xi^2\sqrt{1-\zeta^2}\sqrt{\xi^2-\zeta^4}}$$

здесь

$$\bar{d} = k_t d; \quad \zeta^2 = \frac{c_t^2}{c^2}; \quad \xi^2 = \frac{c_t^2}{c_l^2};$$

Ниже представлена диаграмма для фазовых скоростей используемых волн. Помимо этого данный тип волн является упругими и используется в групповых скоростях этих же волн.

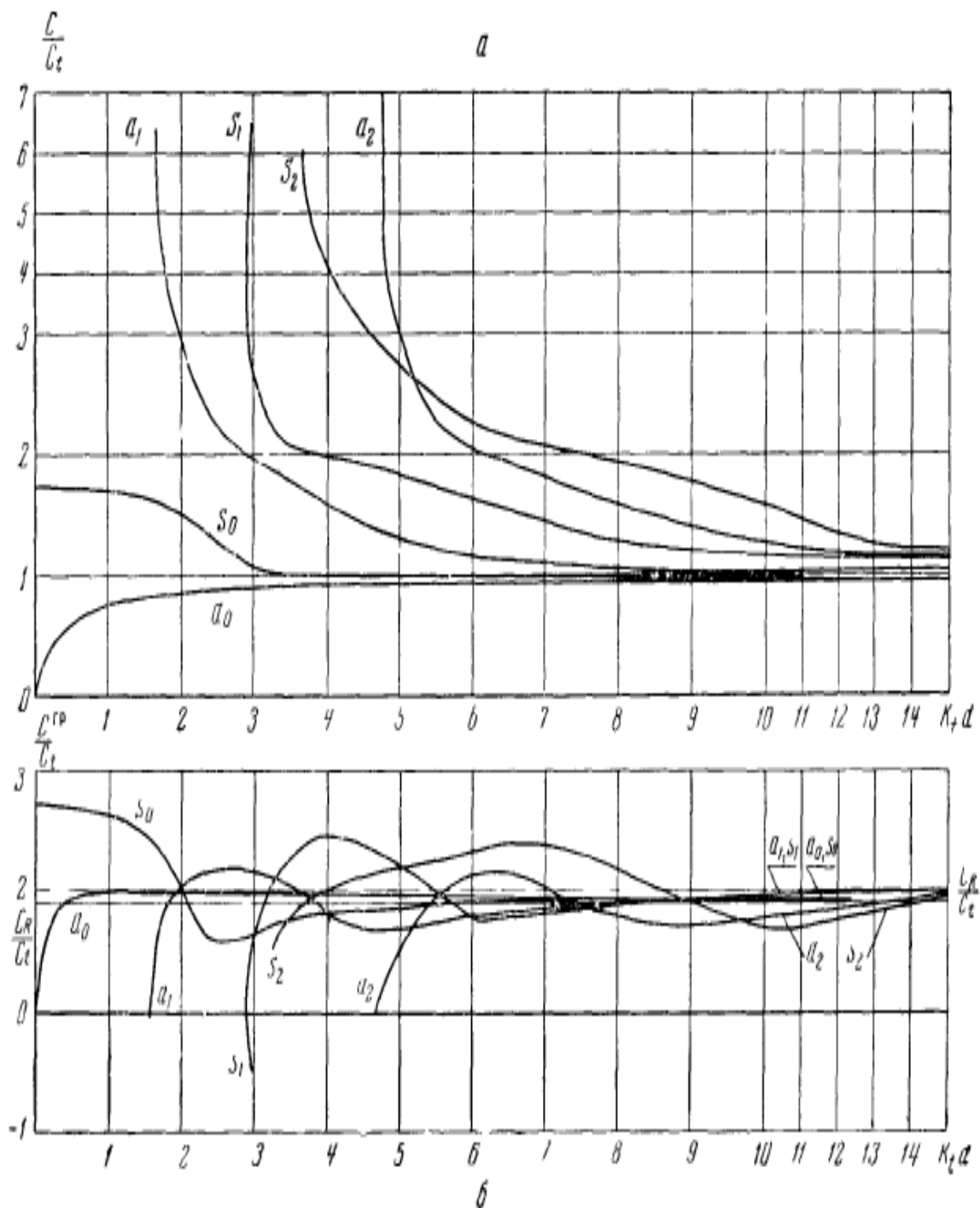


Рис. 4. Диаграмма для фазовых скоростей волн Лэмба, а так же для групповых скоростей этих же волн.

1.4.2. Характерные особенности волн Лэмба

Для этих типов волн характерна дисперсия скоростей. Фазовые скорости ненулевых волн подвержены изменению, согласно бесконечности.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Групповые скорости упругих волн меняются от нуля до величин близких к температурным зависимостям и показателям. Отрицательные характеристики групповых скоростей направлены таким образом, что фазовые и групповые скорости имеют противоположное направление.

Все типы упругих волн, которые расположены выше нуля будут обладать определенным максимумом фазовой скорости. Для определенных типов волн групповая скорость может быть использована в виде нескольких максимумов.

Помимо этого стоит отметить, что когда волна будет возрастать, вместе с ней будет возрастать и максимум, тем самым приближаясь к температурному режиму.

Таким образом, когда волна будет возрастать, согласно направленному максимуму симметричной волны, будут преобладать интервалы, согласно которым групповая скорость будет оставаться неизменной.

Особенностью относительного интервала, в котором групповая скорость будет изменяться не более чем на 3 %, фазовая скорость будет изменяться довольно медленно.

Так как квазипостоянные значения в определенных интервалах упругих волн будут резко меняться, то следует что в этих интервалах будут преобладать резкие спады.

При изменяемых значениях для фазовых скоростей характерным будет использование интервальных промежутков для упругих волн в групповых и фазовых скоростях.

Исходя из того, что дисперсионные кривые групповых скоростей и фазовых скоростей определены, можно необходимым образом отслеживать движение в упругих волнах различной размерности.

Для этого необходимо знать характер смещения по осям x и y в необходимых точках пластины. Так же по смещениям можно находить напряжение в упругих

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР	16

волнах по необходимой формуле, представленной ниже.

$$\sigma_{xx} = \lambda \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial U}{\partial x};$$

$$\sigma_{zx} = \mu \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right);$$

$$\sigma_{zz} = \lambda \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial W}{\partial z};$$

Из данных формул видно, что смещение находится согласно продольной волне, при этом характерной особенностью амплитуды будет являться то, что она будет равна во всех используемых точках пластины.

1.4.3. Особенности Пуассоновского эффекта

Помимо этого, В поперечном сечении направления достигается благодаря Пуассонскому эффекту. Исходя из этого эффекта в середине пластины его необходимо приравнять к нулю. Его так же можно назвать максимальным.

Что касемо изгибной волны, то в ней будет преобладать смещение поперечного типа, при этом амплитуда остается неизменной и будет одинаковой во всех используемых точках пластины.

Так как смещение продольного типа будет приравнено к нулю, то исходя из этого можно отметить то, что поперечное сечение будет меньше в несколько раз.

При малых смещениях в используемых волнах поверхности можно фиксировать зависимость амплитуд смещения от глубины и до середины. Отличительной особенностью в распределении смещений в волнах симметричных и антисимметричных будет преобладание спада на симметричных типах упругих волн.

Рядом с каждой из поверхностей распределения будут происходить равномерно, или они будут обладать схожестью по равномерному распределению.

Что касается волн, которые будут находиться выше нулевого порядка, то здесь следует заметить, что при доктрических толщинах и фазовых частот, можно сказать о том, что волновые числа в этом случае будут являться мнимыми.

Это говорит о том, что волнового распределения не происходит, а происходит движение частиц которое распространяется синфазно по оси.

Если четное или нечетное число волн укладываются при критических значениях по заданной толщине пластины, то исходя из этого продольные упругие волны Лэмба будут образовывать хаотично разрозненные стоячие волны, исходя из их поляризации, которая распространяется с положительными и отрицательными направлениями используемых амплитуд.

В том случае, если значения превышают критические, то волновые числа упругих волн Лэмба будут отличаться от нуля и заданных показателей.

В данном случае будет происходить поворот продольных, а так же поперечных упругих волн. При этом будут появляться стоячие волны. Помимо этого будут появляться и образовываться волны других поляризаций.

При этом волны будут состояться из четырех компонентов:

- Две продольные волны:
- Две поперечные волны;

Они располагаются рядом, таким образом, что все волновые числа будут приравнены к основной оси.

Напряжение же на этих типах волн, согласно граничным областям будет равно нулю.

Смещение же будет распределяться согласно толщине используемой

								Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР			18

пластины. Основной траекторией движения частиц в данном случае можно считать эллипсы, которые зависят от глубины, размера и коэффициента Пуассона в используемой пластине.

При этом волновые векторы продольного типа имеют направление по оси, а волновые векторы поперечного типа будут образовывать на оси определенный угол.

Если рассматривать данный тип движения при увеличении, то можно наблюдать продольный компонент, который будет превращаться в неоднородную волну, исходя из того, что она будет отдаляться от заданных границ.

В остальных случаях смещения образуются только поперечными компонентами.

Исходя из этого можно сказать о том, что смещения становятся локализованными.

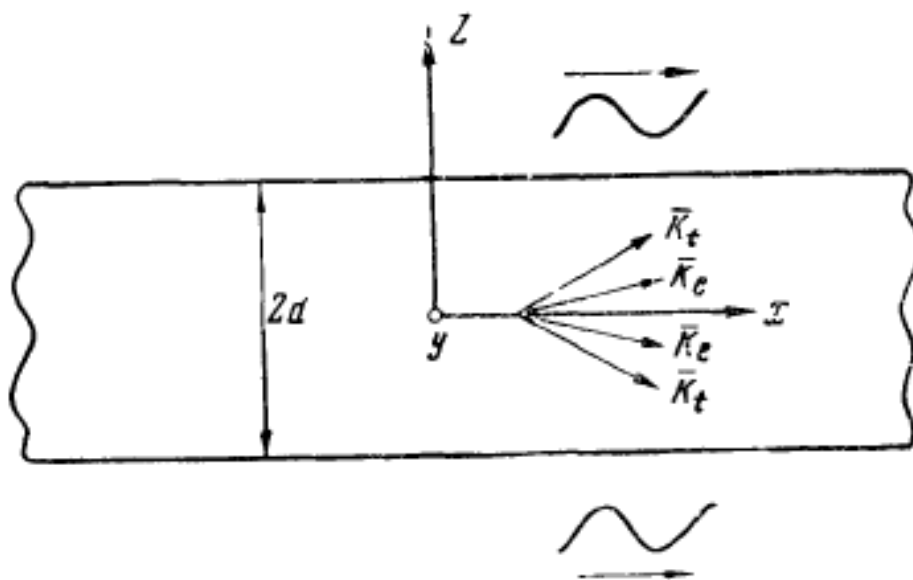


Рис. 5. Распространение продольной упругой волны в зависимости от направления.

1.4.4. Метод (ЭМА)

На сегодняшний день в промышленности находит применение акустические методы контроля.

Акустические методы контроля считаются одним из главных, имеющие такие преимущества:

- определение дефектов в виде трещин;
- проверка отсутствия инородных элементов;
- высокая производительность;
- улучшенный технологический процесс;

В настоящее время использование ультразвуковых методов контроля способствуют получению информации о материале, дефектов, которые в нем преобладают, и многих других характеристик, способных наладить наилучший контроль в производстве, при низких экономических затратах.

Основными факторами при использовании подобного типа технологий является:

- особенности используемого материала;
- особенности используемой конструкции;
- особенности использования и дальнейшая эксплуатация;

В этом случае необходимо учитывать различные виды:

- излучения;
- отражения;
- дифракции волн;
- особенности дефектов;
- ультразвуковой контроль, в соотношении вносимых дефектов.

						Лист
					ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР	20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- процесс последовательного проектирования;
- использования ультразвуковых характеристик;
- учет наименьших экономических затрат и получении положительных результатов;

Особенности контроля и использования упругих колебаний и волн в объекте называется контролем, основанным на акустических методах.

Использование акустических методов дефектоскопии вызвано в первую очередь тем, что прочность материала основана на распространении механических колебаний, а они в свою очередь способствуют распределению ультразвуковых волн.

В данном случае необходимыми и основными задачами остаются:

- выявление дефектов;
- измерение параметров изделия;
- физико-химические характеристики изделия;
- выявление несплошности;
- Определение механических свойств материала;

В соответствии с ГОСТ 18353-79 все методы ультразвуковой дефектоскопии можно распределять по различным признакам, среди них:

- По характеру взаимодействия контролируемого объекта и взаимодействие физических полей;
- По взаимодействию вещества и полям используемых объектов;
- По первичному параметру, характеристикам физического поля;
- По особенностям информации, по первичной информации;
- По различным типам взаимодействий с физическим полем;



Рис. 6. Классификационная схема акустических методов.

На данной схеме представлена схема акустических методов, согласно ГОСТ 23829-79.

1.5. Обзор акустических методов

Можно отметить, что акустические методы можно разделять на несколько групп.

Одни группы подразделяются по принципу излучения акустических колебаний ультразвуковых волн. Другие группы разработаны для приема колебаний и ультразвуковых волн. В данном случае эти группы можно делить на активные и пассивные методы.

Так или иначе все группы основываются и работают по принципу бегущих и стоячих волн и колебаний.

Активные методы акустических ультразвуковых волн в свою очередь поделены на две группы, среди них можно выделить методы прохождения и методы отражения.

Пассивные методы акустических ультразвуковых волн делятся на акустико-

эмиссионный метод. Исходя из этого эмиссия акустических волн будет содержать в себе излучение упругой волны, согласно динамической структурной перестройки компонентов. Поэтому необходимо учитывать ее структурность и способы использования метода.



Рис. 7. Классификационная схема акустических методов диагностики.

Что касается пассивных методов, то здесь стоит заметить то, что к ним относятся вибрационно-диагностический и шумодиагностический методы.

Вибрационно-диагностический метод используют характеристики вибраций используемого материала с приемниками контактных типов.

В свою очередь шумодиагностический метод использует спектр шумов материала с помощью приборов, которые помогают анализировать спектр шума и в целом ультразвуковых акустических волн.

1.5.1. Методы возбуждения волн

Использование методов при возбуждении волны и колебаний, их так же можно

охарактеризовать как методы интегрального типа, а так же методов, которые называются локальными. В этом случае колебания возбуждают согласно кратковременным внешним воздействиям. При этом используется связь с генератором, а так же измеряемую частоту.

К эффектам электромагнитного поля в данном случае можно отнести:

- намагничивание;
- магнитострикционный эффект;
- внешнее магнитное поле;
- магнитодинамический эффект;
- вихревые токи;

Основными свойствами вихревых токов являются преобразования ЭМАП.

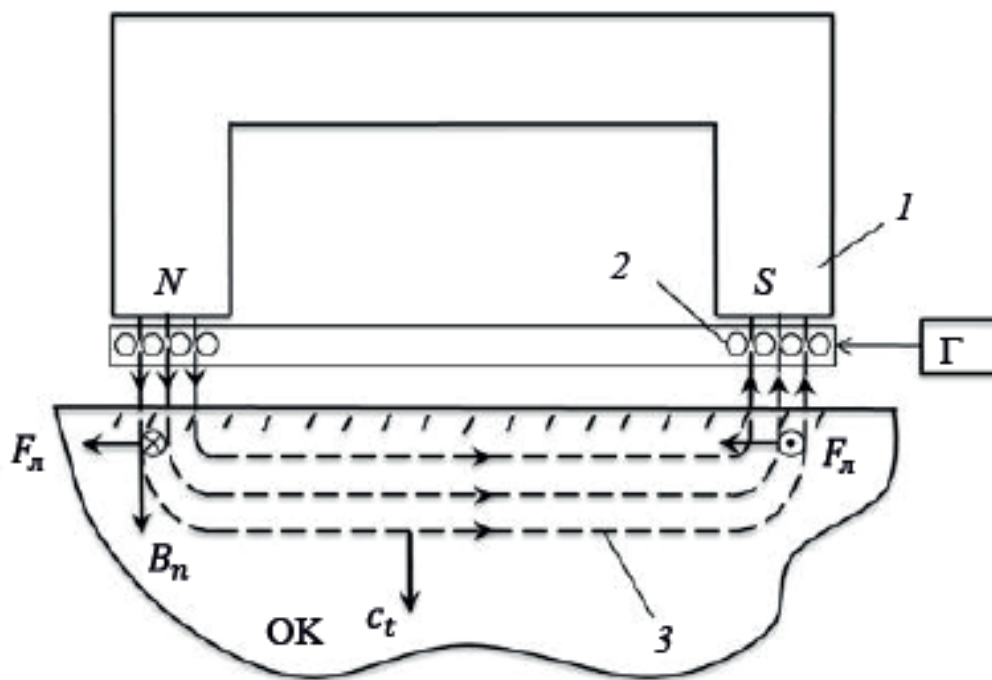


Рис. 8. Схема электромагнитно-акустического преобразователя.

Исходя из этого можно отметить, что для поперечных волн в электромагнитно-акустическом преобразователе характерно:

- 1) постоянный магнит;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

- 2) высокочастотная катушка;
- 3) силовые линии магнитного поля;

Помимо этого, учтены генератор с частотой 10 МГц, а так же сила Лоренца и составляющая магнитного поля. В данном случае направление тока будет меняться с частотой 1 МГц.

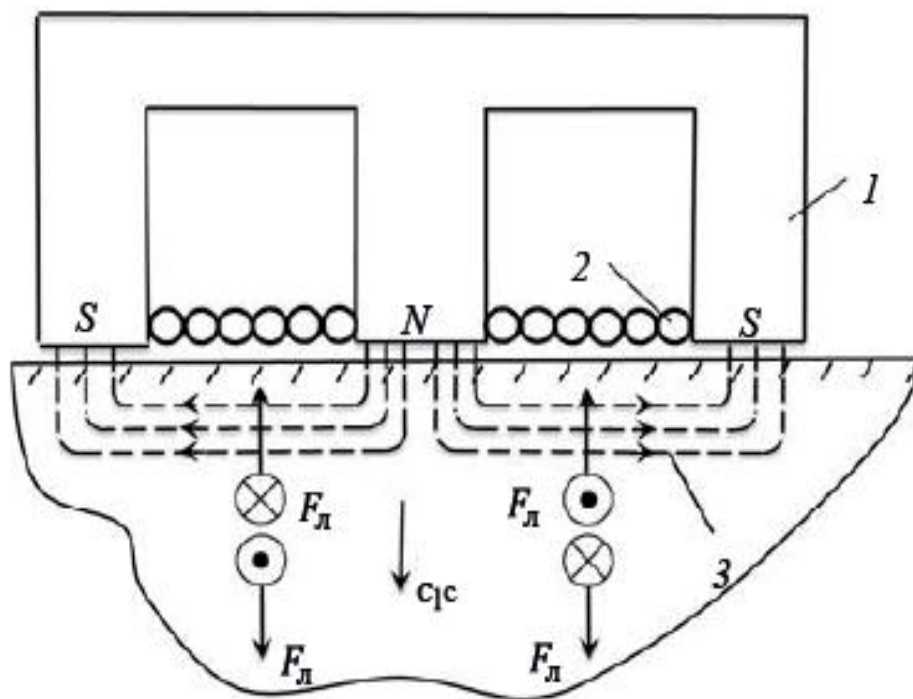


Рис.9. Схема электромагнитно-акустического преобразователя для продольных волн.

В данном случае направление движения волны силы Лоренца можно находить по правилу левой руки. Тогда же, когда происходит изменение в направлении электромагнитного поля, будет происходить разворот вектора.

При этом катушка будет возбуждаться согласно токам Фуко, их же можно обозначить как вихревые токи.

От кольцевого излучателя будет двигаться волна поперечного типа, при этом основные показатели будут усредняться, согласно силе Лоренца.

В упругой среде происходит смещение точек по всем касательным и доходит до поверхностного слоя. При этом поперечные акустические волны будут возбуждаться.

Исходя из этого смещение точек упругой среды будет происходить по касательной и до поверхности поперечной ультразвуковой акустической волны.

Появление кольцевого излучения создает интенсивную направленность, согласно полю излучения. При этом будут задействованы все основные дефекты. В случае если происходит прием акустических ультразвуковых колебаний, происходит изменение напряженности электрического поля.

При смещении колебательной скорости в электромагнитном поле проводника, происходит получение сигнала. Данный преобразователь используется на прием колебаний, которые подвержены излучению.

Приемником и излучением акустических волн будет являться используемый материал, а именно поверхностный слой металла. Этот способ способствует безконтактному возбуждению поперечной волны.

При этом можно изменять параметры фаз, а так же направление сдвига электромагнитной ультразвуковой волны.

Тем самым, если происходит использование продольных и поперечных волн, можно получать информацию не только о дефектах, но и о структуре материала.

1.5.2. Основные достоинства и недостатки метода (ЭМА)

Достоинства:

- акустический контакт при высокой скорости, согласно преобразователю;
- генерация импульсов;
- контроль за объектами, при высоких температурах;
- излучение перпендикулярных волн согласно поверхности;

						Лист
					ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР	26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- управление углом ввода, согласно волнам Рэлея и волнам Лэмба;

Области применения:

- дефектоскопия;
- толщинометрия;
- ультразвуковой анализ;

Если будут отсутствовать промежуточные слои, то при использовании поперечных волн будет использована наилучшая точность измерений.

При этом ЭМА метод будет обеспечивать наилучший вариант контроля при дефектоскопии исходных материалов.

Недостатками ЭМА метода можно назвать следующее:

- контроль за электропроводящими материалами;
- размеры и габариты;
- коэффициент двойного преобразования его понижение;

Несмотря на недостатки этот метод позволяет производить контроль за материалом на достаточно высоких скоростях.

					ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Оборудование

2.1.1 Основные характеристики просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) и его методов

1. Катод.
2. Фокусирующий электрод.
3. Анод.
4. Первый конденсатор.
5. Диафрагма первого конденсатора.
6. Второй конденсатор.
7. Диафрагма второго конденсатора.
8. Стилматор второго конденсатора.
9. Корректор юстировки.
10. Объект исследования.
11. Столик для объектов.
12. Объективная линза.
13. Апертурная диафрагма.
14. Стилматор объективной линзы.
15. Секторная диафрагма.
16. Стилматор промежуточной линзы.
17. Промежуточная линза.
18. Диафрагма поля зрения.
19. Проекционная линза.
20. Экран для наблюдения.

Характеристики микроскопа типа ПЭМ (Просвечивающий электронный микроскоп).

В основе использования атомно-силовой микроскопии выделяется силовое взаимодействие самого зонда с поверхностью используемого материала. Помимо

									Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР				28

этого могут использоваться различные зондовые датчики, в виде упругого материала с зондовой частью.

При этом если сила будет действовать на зонд с края поверхности, этот процесс нарушит изгиб используемой консоли. Если отслеживать нарушения при деформации, можно производить контроль за взаимодействием зонда и поверхностью используемого материала.

В том случае, если действие силы будет изменяться, то можно выделить основные принципы контроля за тем, чтобы не привнести дефект в используемый материал, среди разновидностей контроля можно выделить:

- контактный;
- полуконтактный;
- бесконтактный;

Среди достоинств данного типа методов можно отметить:

- универсальность;
- упрощенное получение изображений образцов;
- компактность;
- детальное рассмотрение образцов;
- минимальное количество разграничителей;

С помощью данного метода можно определять:

- толщину пленки;
- шероховатость;
- дефекты поверхности;

На протяжении длительного периода времени в изучении тонкопленочных материалов различной классификации ведутся разработки по изучению упругих волн. В частности волн ультразвукового диапазона. К данному типу волн можно отнести волны Лэмба и волны Рэлея.

									Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР				29

Согласно использованию этих волн можно производить контроль поверхностных слоев тонких пленок в различных состояниях (дефекты поверхностного и околоповерхностного состояния).

Помимо этого можно выделять материалы, участвующие в синтезе, использовании и выращивании тонких пленок: среди них выделяются различные типы керамики, металлов, стекла и пластика.

Дефектоскопия поверхностного слоя хорошо просматривается при использовании подходящих материалов для выращивания тонких пленок в условиях упругих ультразвуковых волн. Эти характеристики позволяют использовать и выявлять напряжение поверхностного слоя различных материалов, а так же выявлять особенности механических и термических свойств используемого материала.

В ходе исследования термоэлектрических характеристик тонких пленок наблюдаются хорошие перспективы, в частности в использовании гетероструктур тонкопленочных материалов.

На сегодняшний день самыми актуальными материалами при выращивании тонких пленок являются:

- основные типы теллуридов;
- теллуриды висмута;
- теллуриды свинца;

Использование этих материалов обусловлено в первую очередь тем, что взаимодействие квантово-размерного наноструктурированного материала на фононные потоки будут приводить к увеличению добротности и соответственно увеличению коэффициента полезного действия энергии.

Поэтому на сегодняшний день происходит создание тонкопленочных структур:

- с верным получаемым результатом;

						Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР	

- с обученным персоналом;
- с издержками в производстве;
- с мобильностью и внедрением данного типа производства;

Помимо издержек и разного рода нововведений необходимо учитывать стоимость используемого оборудования, а так же технологию измерения тонкопленочных образцов.

В этом случае активно применяется метод, под названием эллипсометрия, в основе которого лежит исследование основных характеристик используемого вещества, в различных средах по состоянию поляризации отраженного и преломленного света.

Основные области применения эллипсометрии:

- выявление оксидных пленок;
- выявление толщины пленок в различных диапазонах;

Основные характеристики эллипсометра:

- фотоэлектрический приемник;
- поляризатор;
- анализатор;
- компенсатор;
- модулятор света;

Основными особенностями метода эллипсометрии являются измерение характеристик световых лучей при влиянии их на используемую поверхность, а так же возможности и характеристики используемого материала. При изменении определяются отражательные свойства, которые зависят от коэффициента преломления вещества, а так же элементов отражения в необходимом поверхностном слое поля отражения, или поверхностного прозрачного слоя поверхности.

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР	31

В данном случае поляризация при характеристиках отражения от поверхности тонкой пленки будет зависеть от коэффициента преломления, а так же толщины пленки.

В этом случае к положительным особенностям данного метода можно отнести быстродействие и простоту в использовании, а так же возможность производить измерения в вакууме, а так же в различных средах.

Основным недостатком данного метода в первую очередь является выбор модели отражающей системы и ход вычисления измерений.

В том случае, если материал будет с известными оптическими постоянными, то в этом случае использование метода эллипсометрии будет актуально.

Помимо этого, хотелось бы отметить рентгеноструктурный анализ, в основе которого заложен дифракционный метод, при исследовании структуры тонкопленочных образцов.

В основе данного метода заложено явление дифракции рентгеновских лучей на используемой трехмерной кристаллической решетке.

Данный метод позволяет довольно точно определять структуру используемого вещества, которая включает в себя группу:

- пространственных элементарных ячеек;
- размеры;
- форму;
- симметричность;

Помимо этого рентгеноструктурный метод является методом анализа в разы уступающим по своей себестоимости, в отличие от других методов.

Главной особенностью рентгеноструктурного метода является использование дифрактометра, который состоит из:

- источник излучения;
- гониометр;
- детектор излучения;
- измерительный регистр;

В этом случае детектором будет служить счетчик квантов. На счетчик будет выводиться дифракционный луч, который достигается перемещением в ходе измерений.

Дифрактометр измеряет интенсивность и колебания дифрагированного в используемом направлении заданного излучения, а так же учитывает дифракционные лучи.

Помимо этого данный элемент позволяет измерять не только тонкие пленки, но и многослойные структуры разных материалов, а так же их составов.

В этом случае можно узнать различные параметры, среди них:

- толщина;
- шероховатость;
- плотность;
- однородность;

Так же рентгеновский спектрограф состоит из:

- счетчик Гейгер-Мюллера;
- разборная трубка;
- кристалл;

Следующим этапом хотелось бы выделить резерфордовское рассеяние, в зависимости от ионного рассеяния. Данный метод позволяет получать информацию о составе используемого материала, а так же об особенностях кристаллической решетки, добротности и глубины залегания.

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР	33

Основная особенность состоит в использовании ионов, которые задействованы в твердом теле и будут рассеиваться согласно глубине лежащего атома. В этом случае энергия, которая испускала ионы будет представлять определенную сумму.

Их можно обозначить как непрерывные потери энергии при движении ионов вперед и назад в твердом теле. Согласно этому скорость энергии при торможении будет переходить от шкалы энергии к шкале глубин.

Помимо этого, можно сказать о том, что потеря энергии при рассеянии будет определяться исходя из массы атома.

При этом рассеяние будет происходить как хаотично, так и согласно заявленным требованиям. В том случае, если происходит исследование структуры кристаллического образца с использованием элементов спектроскопии, то необходимо учитывать эффект каналирования.

Данный эффект заключается в том, что когда происходит ориентация ионов согласно основным направлениям монокристаллов, то те ионы, которые избежали столкновения с атомами поверхности, будут проникать в кристалл до определенной глубины.

Когда происходит сравнение спектров, которые были получены при ориентации ионов согласно направлению каналирования, можно получать данные о кристаллических свойствах исследуемых образцов.

Исходя из этого можно сказать о том, что величины поверхностного пика являются основой при столкновении ионов с атомами поверхности. При этом можно получать информацию об:

- структуре;
- различных реконструкциях;
- дефектах;

- релаксациях;
- адсорбатах;

Помимо этого, стоит учитывать:

- скорости выращивания;
- недостатки при использовании;
- особенности материалов;
- технология внедрения;
- качество выращенных образцов;

Если говорить о методе Резерфордовского рассеяния, то так же можно сказать о том, что использование пленок, которые содержат в своем составе тяжелые атомы, при нанесение на подложки, которые в свою очередь состоят из атомов со значительно малым атомным номером, можно говорить о том, что измерения будут довольно информативными и перспективными.

В частности при изучении пленочных покрытий на подложках MgO, LiBO₃, Al₂O₃, SiO₂, Si, C и многие другие.

Если происходит исследование элементов, которые будут нанесены на подложку с большим атомным номером, среди них Ge, GaAs и многие другие, то в этом случае необходимо использовать нерезерфордовское рассеяние и ориентироваться на применение основных реакций.

Помимо этого стоит отметить о растровой электронной микроскопии, в основе которой лежит изучение развертки электронолуца, в условиях растрового режима. По своим характеристикам растровая электронная микроскопия исходит из оптической микроскопии, с необходимыми возможностями в исследовании топологии поверхностного слоя используемых кристаллических материалов.

В условиях небольших рахмеров при изучении топологии поверхности достаточным фактором будет служить использование низковольтных растровых

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР	35

элементов с небольшим диаметром пучка электронов.

В растровой электронной микроскопии объект будет формироваться в определенной последовательности и по определенным точкам, при взаимодействии электронного пучка с основной поверхностью материала.

Каждая точка будет облучаться определенным пучком, который в свою очередь будет смещаться по поверхности электронного луча.

В случае взаимодействия зонда электронов с элементами вещества, будет происходить сигнал с определенной различностью, а так же физическими составляющими, среди них:

- отраженные и вторичные электроны;
- рентгеновское излучение;
- свет;
- поглощенный ток;

При этом изменение основных характеристик масштабов изображения осуществляется в условиях выращивания пленок, а так же радиотехническими средствами.

Поэтому растровые электронные микроскопы будут в значительной мере отличаться от микроскопов, как дифракционных приборов.

Одним из достоинств растровой электронной микроскопии можно считать возможность проводить исследования образцов без так называемой подготовки.

В этом случае толщина образцов для растровой электронной микроскопии будет иметь неопределенное значение. Поэтому образцы будут иметь размеры, ограниченные возможностями держателя подложки.

Основными областями применения методов растровой электронной микроскопии будут служить так называемые исследования топографии

задействованных поверхностей, так называемых дефектах, среди них:

- структурные дефекты;
- электрически активные дефекты;
- электрические домены;
- магнитные домены;
- атомный состав поверхности;

Электронная микроскопия, названная прозрачной электронной микроскопией является одним из самых наиболее универсальных методов в изучении структурных дефектов используемых кристаллов, при выращивании тонкопленочных образцов.

Данный метод используется для изучения особенностей, в частности ориентации дефектов согласно расположению матрицы и соответственно решетки. В этом случае будет определяться их размер.

Использование просвечивающих электронных микроскопов требует использования препаратов, среди них:

- материалы соответствующие подложке;
- фольга;
- реплика;
- реагенты;

Фольга или реплика чаще всего используется для наблюдением за микрорельефом, а так же фактурой исследуемого материала. Исходя из этого и материал должен соответствовать подложке, для того чтобы не внести различные дефекты.

К реагентам применяются соответствующие требования, для того чтобы избежать образования дефектов при выращивании тонкопленочных образцов.

									Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР				37

2.1.2. Параметры ЭМА дефектоскопии

В работе исследовались параметры ЭМА дефектоскопа для контроля нормальными волнами ферромагнитных листов и труб. Обнаружено, что при любой ориентации магнитного поля не происходит дополнительного затухания ультразвука, обусловленного наличием магнитного поля. Противоречат этому выводу результаты работы, где отмечается, что характер и величина затухания ультразвука в ферромагнетиках в присутствии постоянного магнитного поля существенно зависят от размеров зерна ферромагнитных материалов.

Температурная зависимость амплитуды поверхностной волны, возбуждаемой в образце из низкоуглеродистой стали, изучена в работе. Стенд для проведения испытаний содержал водоохлаждаемые электромагнит и медный экран, в котором размещались приемная и передающая решетки из платиновой проволоки диаметром 0,5 мм, помещенные в керамическую форму. Индукция поляризующего магнитного поля составляла 0,3 Тл. Ток в решетке возбуждающего преобразователя на частоте 250 кГц достигал 600 А. Установлено, что, как и в случае с объемными продольными волнами, амплитуда сигнала резко возрастает в точке Кюри исследуемого материала. Автор связывает это с сосредоточением магнитного поля в поверхностном слое образца, охлаждаемого до температуры Кюри.

Влияние формы поверхности изделия на направленность акустического поля, формируемого ПЭП и ЭМАП. Качественный анализ формы акустических полей в лучевом приближении позволил им сделать следующие выводы. Выпуклая поверхность является дефокусирующим фактором для ПЭП и фокусирующим фактором для ЭМАП. Направленные свойства ЭМАП в случае контроля изделий с выпуклой криволинейной поверхностью лучше, чем у несфокусированных ПЭП такого же волнового размера. Это определяет повышенную чувствительность ЭМАП к дефектам в центральной зоне объекта контроля.

Влияние отклонения оси симметрии преобразователя от нормали к

								Лист
								38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР			

поверхности ОК исследовано в работах. Для ПЭП центральный луч в изделии отклонится от нормали на некий угол. Это приведет к отклонению всех остальных лучей ультразвукового пучка в металле от их номинального положения. Легко определить, что для случая вода-сталь отклонение центрального луча в воде всего на 5° от нормали приведет не только к его преломлению в металле на угол почти 20° , но и к появлению трансформированной поперечной волны. При этом периферийные лучи ультразвукового пучка могут возбуждать и поверхностную волну. Эти явления могут стать причиной возникновения помех в виде паразитных отражений, не связанных с наличием несплошностей в материале. Поскольку ЭМАП порождает ультразвуковую волну частью самой поверхности ОК, то отклонение его оси симметрии от нормали практически не сказывается на форме создаваемого им ультразвукового пучка. Из изложенного следуют следующие выводы: сдвиги и наклоны рабочей плоскости ЭМАП не влияют на направление прозвучивания, т.е. максимум диаграммы направленности всегда проходит через осевую зону прутка или заготовки круглого сечения.

2.1.3. Анализ сравнительных возможностей прямых ЭМАП волн

При точной ориентации и фокусировке ПЭП, а также при применении ЭМАП оба устройства осуществляют ввод и прием ультразвука в направлении, преимущественно перпендикулярном к поверхности. Однако ЭМАП и в этом случае могут иметь определенные преимущества, обусловленные следующим. ПЭП позволяет возбуждать и принимать по нормали к поверхности металла только продольные колебания, а ЭМАП (в зависимости от конструкции) - как продольные, так и поперечные. В последнем случае возбуждение и прием поперечных волн, распространяющихся по нормали к поверхности, особенно эффективно может быть осуществлено при контроле ферромагнитных материалов. Установлены следующие преимущества, обусловленные применением поперечных волн, возбуждаемых нормально поверхности изделия:

1. Увеличивается чувствительность контроля, уменьшается величина «мертвой» зоны и разрешающая способность, повышается точность измерения

									Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР				39

координат дефектов и толщины изделия. Это обусловлено тем, что скорость распространения поперечных волн в материалах почти в 2 раза меньше скорости продольных волн.

2. Поперечная волна лучше отражается от плоских дефектов, заполненных газом, жидкостью или сыпучим веществом, так как такого рода несплошности плохо передают сдвиговые напряжения.

3. Поперечная волна при правильном выборе направления поляризации не испытывает существенной трансформаций при отражениях от дефекта и поверхности ОК. Это дает возможность уменьшить влияние на результаты контроля когерентных акустических помех.

4. Амплитуда импульсов сдвиговых колебаний, возбуждаемых прямым ЭМАП, ослабляется в изделии с плоскими трещинами, ориентированными перпендикулярно поверхности ОК, в большей степени, чем амплитуда продольных колебаний, возбуждаемых прямым ПЭП. Это создает предпосылки для успешного обнаружения неблагоприятно ориентированных плоскостных дефектов.

5. В сравнении с продольной поперечная волна испытывает меньшее затухание в материале.

Для каждого из рассматриваемых типов преобразователей (ПЭП или ЭМАП) характерны специфические помехи. Как было показано ранее, для ПЭП большая часть такого рода помех связана с состоянием акустического контакта и качеством поверхности ОК. Эти помехи не характерны для устройств, содержащих ЭМАП. Для них не подходит и термин «акустический контакт». Более того, в акустическом контакте нет никакой необходимости, поскольку ультразвук возбуждается в тонком поверхностном слое ОК. Однако совершенно необходимо наличие электромагнитного контакта с поверхностью контролируемого изделия. Поэтому даже тонкий электропроводный материал, внесенный в зазор между ЭМАП и ОК, является электромагнитным экраном и

									Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР				40

способен частично или полностью исключить возбуждение ультразвука в ОК. Этим явлением объясняется высокая чувствительность ЭМАП к различным дефектам поверхности: пленам, закатам, трещинам и т. д. В то же время в работе показано, что медная фольга толщиной 0,1 мм ослабляет амплитуду полезного сигнала всего в 2...3 раза. Автор использовал пластины медной фольги для создания имитаторов дефектов при зеркально – теневом методе контроля.

2.2. Описание эксперимента

В нашей работе мы выяснили структуру рэлеевской волны. Определяя полюса в подынтегральном выражении по теореме о вычетах, вычисляем амплитуду продольного потенциала рэлеевской волны

$$|\Phi_p| e^{i\varphi} = \Phi_\tau + i\Phi_n,$$

которая выражается в комплексном виде.

Как показывает анализ, при больших углах клина основной вклад в формирование пространственной структуры акустического поля вносят касательные составляющие возмущающих сил. С уменьшением угла клина вклад этих сил падает, но в то же время увеличивается влияние нормальной составляющей, монотонно достигающей максимума. Отметим также, что экспериментальные точки сдвинуты вправо относительно расчетной кривой. Это можно объяснить следующим образом. Из физических соображений следует, что коэффициент прохождения рэлеевской волны на вторую грань клина должен изменяться с возникновением объемной волны, уносящей энергию вглубь среды. Объемная волна генерируется в том случае, когда проекция волнового вектора падающей волны меньше волнового вектора сдвиговой волны. Поэтому с изменением угла клина уменьшается проекция волнового вектора падающей волны до вектора сдвиговой волны. При этих углах клина возбуждаемые продольная и поперечная волны являются неоднородными с энергией, сосредоточенной вблизи поверхности. Эти волны затем перерождаются в

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР	
					41	

рэлеевские. Поэтому коэффициент прохождения при этих углах остается неизменным. Угол клина, с которого начинается снижение коэффициента прохождения, определяется соотношением

$$\theta_0 = \arccos k_t/k_r.$$

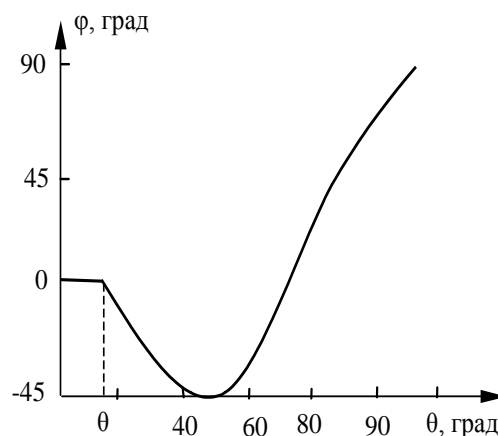
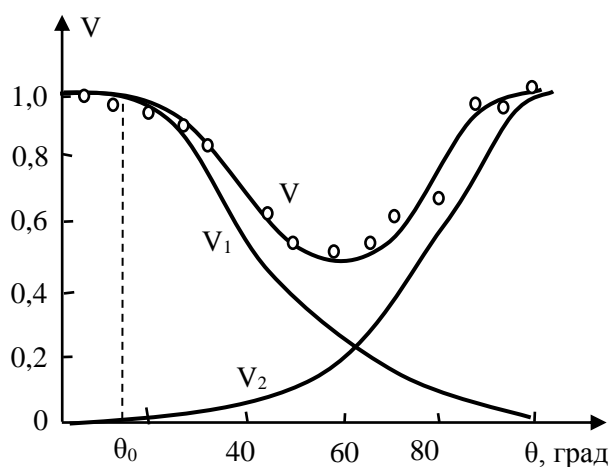


Рис. 10. Зависимость модулей коэффициентов прохождения волны Рэля

Рис. 11. Фазовая характеристика коэффициента прохождения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

Экспериментальные данные получены для материала с коэффициентом Пуассона $\sigma=0.34$. Для этого образца расчетный угол составляет $\theta_0=15^\circ$.

Исходя из этого видно, объемные волны формируются при $\alpha < \alpha_0$.

При этих углах происходит расщепление движений колебаний на объемную волновую компоненту, которая вносит заметный вклад в энергетику процесса, и пограничное движение поверхностных волн вдоль плоскости.

Как показывает анализ, амплитуда и фаза прошедшей волны на плоскость для вырожденного случая остается неизменной, а для другого – носит сложный характер, являясь результатом совместного действия и конкуренции нормальных и сдвиговых составляющих волновых возмущений, вызываемых падающей волной.

Амплитуда смещений возрастает по мере уменьшения угла клина, достигая максимума при углах близких к 120° , а затем уменьшается до нуля. Генерация этих волн, являясь результатом совместного действия и конкуренции продольных и сдвиговых составляющих падающей волны, зависит от структуры профиля волновых возмущений на второй грани клина.

Рассмотрим пример, в котором волна движется по нормали к границе при двух характерных положениях плоскости.

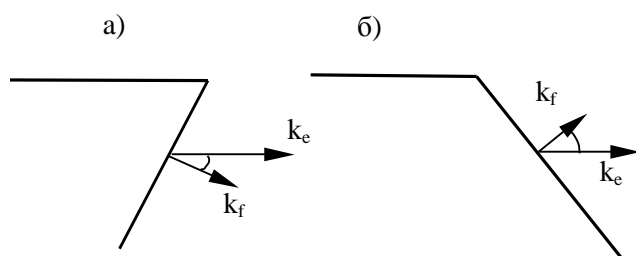


Рис. 12. Направления волновых векторов прошедшей (а) и отраженной (б) рэлеевских волн при двух характерных углах.

Как показывает детальный анализ, амплитуда смещений в прошедшей волне имеет максимум не в случае падения первичной волны по нормали к плоскости, а

тогда, когда фазовая скорость составляет прямой угол с плоскостью. Характер движения источника возмущений, определяемый первичной волной, для поверхностных волн остается неизменным. Однако, если для прошедшей волны амплитуда источника вторичных волн по мере движения убывает, то для отраженной волны, движущейся к месту излома поверхности, нарастает. В первом случае вектор фазовой скорости отстает от вектора лучевой скорости во втором — опережает.

Для прошедшей волны амплитуда возмущений на второй грани клина по мере движения волны убывает, а для отраженной волны, движущейся к месту излома поверхности, нарастает. В первом случае вектор фазовой скорости отстает от вектора лучевой скорости во втором — опережает.

Так же показаны распределения по азимутальным углам γ амплитуд смещений в продольных и поперечных волнах соответственно. (Кривые относятся к углам θ равным 30° , 40° , 60° , 80° соответственно).

Сравнительный анализ кривых, представленных на этих рисунках, показывает, что при углах γ , близких к 30° , наблюдается высокий уровень амплитуд смещений. При уменьшении угла наклона плоскости происходят как изменение амплитуды смещений в волне, так и небольшое смещение максимума угловой зависимости амплитуды от угла γ .

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР	44

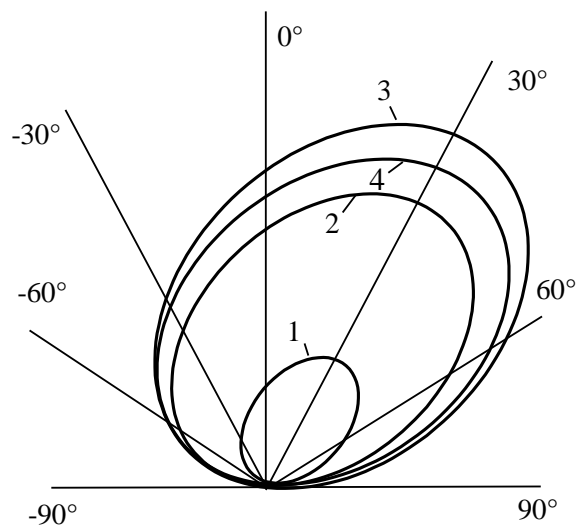


Рис. 13. Азимутальное распределение смещений в продольных волнах

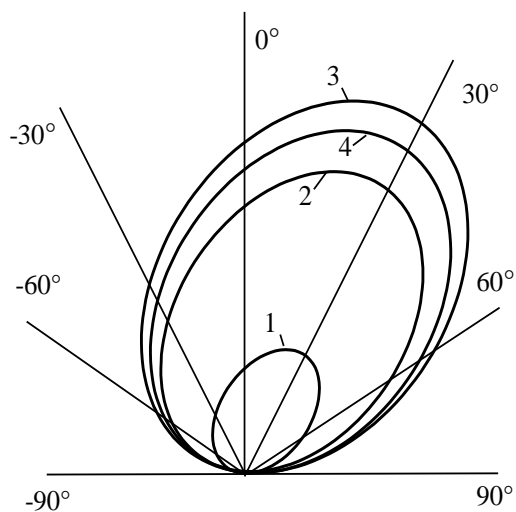


Рис. 14. Азимутальное распределение смещений в поперечных волнах

2.3. Выводы

1. Исследованы основные закономерности гармонического излучения волн ЭМА преобразователями.
2. Сформулированы рекомендации по эффективному возбуждению и приему акустических волн.
3. Получены соотношения, связывающие все основные параметры.
4. Получены выражения, определяющие структуру электромагнитного поля.
5. Найденная структура электромагнитного поля вблизи поверхности клиновидного изделия, она позволяет определить условия для оптимального проектирования приемных ЭМАП.

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР	46

Заключение

В ходе работы были решены следующие задачи:

1. Показана возможность измерения тонких пленок микрометрового размера акустическими методами.
2. Исследованы методы контроля тонких пленок в различных условиях.
3. Проведен эксперимент по обнаружению и выявлению различных аспектов в упругих волнах.
4. Впервые изучена особенность в использовании тонких пленок в условиях разных методов.
5. Получены графики зависимостей в условиях выращивания и внедрения пленок.
6. Получен ряд экспериментальных результатов, которые могут применяться в условиях выращивания тонкопленочных материалов. Эти пленки представляют интерес для дальнейшего исследования и возможного применения их в твердотельной электронике.

						Лист
						47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР	

Библиографический список

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.

2. Патон Б. Є., Троїцький В. О., Посипайко Ю. М. Неруйнівний контроль в Україні // Інформ. бюл. Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики. 2003. № 2(18). С. 5-9.

3. Сучков Г. М. О главном преимуществе ЭМА способа // Дефектоскопия. 2000. № 10. С. 67 70.

4. Сучков Г. М. Разработка и внедрение технологии сплошного автоматического обнаружения дефектов макроструктуры объемнозакаленных рельсов бесконтактным ультразвуковым методом. -Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук.- Харьков: ХАДИ, 1988.- 22 с.

5. Себко В.П., Сучков Г.М., Камардин В.М. Чувствительность ЭМА способа контроля железнодорожных рельсов ЗТМ // Дефектоскопия. 2004. № 3. С. 31 – 42.

6. Себко В. П., Сучков Г.М., Ищенко В. Н. Исследование факторов, влияющих на результаты контроля горячего металла ЭМА способом // Дефектоскопия. 2004. № 11. С. 40 49.

7. Сучков Г. М. Определение сечения рассеяния сдвиговых линейно поляризованных ультразвуковых колебаний с произвольной ориентацией вектора поляризации на длинном круговом цилиндрическом дефекте. – Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2000. №2. С. 3 – 9.

8. Сучков Г. М., Катасонов Ю.А., Гарькавый В.В. Экспериментальное исследование чувствительности ЭМА преобразователей при дефектоскопии эхо методом объемными сдвиговыми волнами // Дефектоскопия. 2000. № 2. С.12-16.

									Лист
									48
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР				

9. Сучков Г.М. Исследование ЭМА способом выявляемости плоскодонных отражателей в образцах из различных материалов // Контроль. Диагностика. 2002. № 5. С.50 - 51.

10.Сучков Г. М., Катасонов Ю.А. О практической применимости ЭМА преобразователей для дефектоскопии поверхности изделий сложной формы эхометодом. – Дефектоскопия. 1999. № 10 С. 15-19.

11.Себко В. П., Сучков Г.М., Горкунов Б. М. Новый способ обнаружения дефектов металлов с помощью электромагнитно – акустических преобразователей. – В сб.: Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. № 1. С. 54 58.

12.Сучков Г. М., Катасонов Ю.А. Экспериментальные исследования нового способа бесконтактной ультразвуковой дефектоскопии труб эхометодом // Дефектоскопия. 1999. № 11. С.77-80.

13.Сучков Г. М., Михайлова И. В., Савон А. И. и др. Исследование несплошностей в листах // Дефектоскопия. 2001. № 3. С. 83 – 87.

14.Себко В. П., Сучков Г.М. Новые возможности дефектоскопии рельсов. – Труды НТУ «ХПИ», Харьков, 2003, вып. 4. С. 87-90.

15.Сучков Г.М. Исследование особенностей распространения упругих волн, возбуждаемых ЭМА способом // Контроль. Диагностика. 2001. № 12. С. 36 – 39.

16.Себко В.П., Сучков Г.М. Электромагнитно - акустический способ неразрушающего контроля. Часть 1. Эффект электромагнитно - акустического преобразования // Український метрологічний журнал. 2003. Вип. 1. С. 35-38.

17.Себко В. П., Сучков Г.М., Горкунов Б. М. Электромагнитно – акустический способ неразрушающего контроля. Часть 2. Электромагнитно – акустические преобразователи // Український метрологічний журнал. 2003. Вип. 2. С. 20-25.

									Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР				49

18.Сучков Г.М. Разработка технологии и аппаратуры для ЭМА толщиномера // Контроль. Диагностика. № 11. 2001. С. 38 39.

19.Ваврив Д. М., Сучков Г.М., Виноградов В. В. и др. Создание электромагнитно – акустического толщиномера для контроля тонкостенных труб // Дефектоскопия. 2002. № 10. С. 7 13.

20.Себко В.П., Сучков Г.М., Малахов А.В. Ультразвуковой контроль головки рельсов ЭМА способом // Дефектоскопия. 2004. №7. С. 17 25

21.Сучков Г.М. Возможности современных ЭМА толщиномеров // Дефектоскопия. 2004. №12. С. 16 25

22.Сучков Г.М. Построение приборов для ультразвукового контроля и измерений с использованием ЭМА способа возбуждения и приема ультразвуковых импульсов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2005. № 2. С.36-39.

23.Себко В. П., Сучков Г.М., Алексеев Е. А. Оптимизация параметров ЭМА толщиномеров для контроля тонкостенных изделий. - Дефектоскопия. 2002. № 12. С. 21 28.

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ –11.04.04.2017. 114/444ПЗ ВКР	50