

УДК 519.688

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В АКУСТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

**Ю.К. Шелковников, К.С. Ермолин, А.И. Кириллов, Н.И. Осипов**

Институт механики УрО РАН,  
г. Ижевск

В статье приведены результаты электромеханического моделирования акустического поведения образца с металлическими включениями. Для исследования механической модели образца применено электрическое моделирование на основе метода аналогий. Рассмотрена зависимость эхо-сигнала акустического микроскопа от размеров и свойств включений в образце.

**Ключевые слова:** акустический микроскоп, эхо-сигнал, ультразвук, электромеханическое моделирование.

Одним из наиболее распространенных и универсальных методов неразрушающего контроля является ультразвуковая дефектоскопия, которая позволяет обнаруживать и исследовать поверхностные и глубинные дефекты, трещины, раковины, расслоения в металлических и неметаллических образцах благодаря использованию проникающей способности упругих волн ультразвукового диапазона частот. Применение моделирования позволяет проводить эти исследования, не прибегая к трудоемким экспериментам, что уменьшает время и материальные затраты на их проведение [1-4]. Моделирование процесса исследования образцов из стали (например, инструментальной, оружейной и др.) с металлическими включениями или дефектами с использованием акустического микроскопа позволяет изучать внутреннюю структуру образца, оценить влияние размеров и количества включений [5].

Рассмотрим процесс формирования акустических изображений внутренней структуры образцов более подробно. Акустический мик-

роскоп позволяет работать в двух режимах. В первом режиме с ходом лучей «на прохождение» (рисунок 1а) пьезопреобразователь 1 излучает ультразвуковые колебания, которые фокусируются акустической линзой 2 через иммерсионную жидкость 3 на образец исследования 4, закрепленный с помощью держателя 5. Далее через объект исследования и иммерсионную жидкость, ультразвуковые колебания передаются в приемную акустическую линзу 6 и приемный пьезопреобразователь 7. В этом режиме можно проводить исследования пленок и специально подготовленных тонких образцов.

Второй режим – с ходом лучей «на отражение» (рисунок 1б). Его отличие состоит в том, что ультразвуковые (УЗ) волны проходят в образец 4, отражаются от внутренних дефектов и поступают обратно на передающую линзу 1, которая становится приемником эхо-сигнала. Это позволяет исследовать толстые образцы и нет необходимости в специально подготовленных тонких образцах, как при применении первого режима.

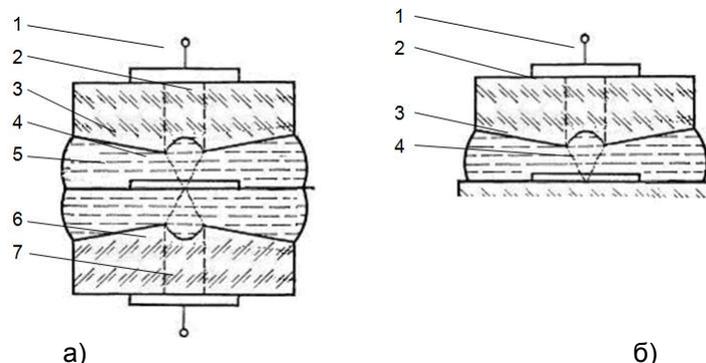


Рисунок 1 – Режимы работы акустического микроскопа: а – с ходом лучей «на отражение»; б – с ходом лучей «на прохождение»

Акустическое изображение в обоих режимах имеет растровый тип и формируется следующим образом. С помощью акустической линзы 2 осуществляется фокусирование УЗ волны от пьезопреобразователя 1 в исследуемую точку образца 4. Каждая точка изображения – это результат измерения параметров эхо-сигнала (таких, как время от посылки зондирующего импульса до появления эхо-сигнала, его амплитуда и скорость распространения). Вследствие фокусирования УЗ волны все измерения имеют локальный характер, т.е. измерения в каждой точке никак не могут влиять на результаты соседних измерений. Для формирования полного изображения применяется система XY позиционирования. Она перемещает образец, либо сканирующий элемент по всем точкам сканирования, и формирует растровую информационную матрицу поверхности образца. Минимальное перемещение по координатам XY определяет разрешающую способность акустического микроскопа. Также на разрешающую способность влияет частота УЗ волны. Чем короче длина волны, тем выше разрешающая способность микроскопа. Полученная информационная матрица эхо-сигнала преобразуется в визуальный растровый кадр.

Примем, что металлическое включение имеет форму сечения в виде окружности, а зона распространения УЗ волны в образце – форму цилиндра. В итоге имеем однокоординатную модель образца в исследуемой точке растра.

Рассмотрим механическую модель процесса локального измерения параметров эхо-сигнала в одной точке растра. Модель представим состоящей из слоев, через которые проходит УЗ волна от пьезопреобразователя 1: слой иммерсионной жидкости 2; слой стального образца 4 с металлическими включениями; снова слой с иммерсионной жидкостью 2. Каждый слой представляется в виде комплекса масс, пружин и элементов трения [6,7]. Каждая пружина связана со своей массой. Это вносит в модель инерционность, так как скорость распространения ультразвука не может изменяться мгновенно. Необходимо внести в модель элементы трения, установив

их параллельно упругим пружинам, потому что распространение ультразвука в среде сопровождается его поглощением.

Для упрощения модели взята зеркальная среда, т.е. массы иммерсионной жидкости до и после образца совпадают, массы металла в первом и последнем слое также совпадают. Свойства среды неизменны, поэтому элементы масс и трения одинаковые до и после металлического включения. Чтобы перевести механическую модель исследуемой среды в электрическую схему воспользуемся методом аналогий [8]. Он позволяет переводить сложные механоакустические системы в их электрические аналоги, которые могут быть исследованы в среде Micro-Cap. Данная среда позволяет проводить моделирование переходных процессов, частотный анализ и др. Поскольку пьезопреобразователь акустического микроскопа является источником колебаний, то в качестве эквивалента в электрической схеме используется источник напряжения. В этом случае эквивалентом массы будет емкость, а гибкости – индуктивность [8]. Для перевода механической модели в электрическую схему, необходимо выполнять ряд условий [8]:

1. Каждый узел механической модели замещается электрическим контуром.
2. Каждой механической величине соответствует электрическая величина (таблица 1).
3. Аналогом последовательного соединения механических элементов является параллельное соединение электрических элементов и наоборот.
4. Совмещение всех электрических контуров в единую схему.
5. Количество контуров равно количеству узлов механической модели.

На рисунке 2 представлен электрический аналог механической модели. Для определения параметров электрической схемы необходимо подставить величины, соответствующие геометрическим параметрам и свойствам сред, в формулы (1) – (3), и таким образом, получить номиналы элементов для электрической модели (рисунок 2) [6]:

$$C = A \cdot \rho \cdot h; \quad (1)$$

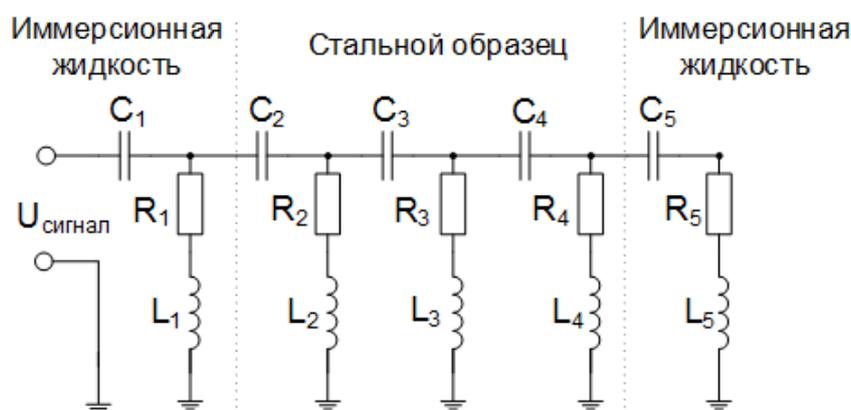


Рисунок 2 – Электрическая модель образца с включениями из металла

Таблица 1 – Соотношение электрических и механических величин

Механическая величина	Электрическая величина
Масса, кг	Емкость, Ф
Гибкость, м/Н	Индуктивность, Гн
Трение, кг/с	Проводимость, 1/Ом
Колебательная скорость, м/с	Напряжение, В
Сила, Н	Ток, А

$$R = \frac{1}{\rho \cdot c_B \cdot A}; \quad (2)$$

$$L = \frac{h}{k \cdot A}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность вещества;  $c_B$  – скорость ультразвуковой волны в среде;  $h$  – толщина слоя;  $A$  – площадь «размытой» точки фокусирования;  $k$  – коэффициент упругости среды.

Параметры модели выбраны следующими. Диаметр «размытой» точки фокусирования 500 мкм; диаметр акустической линзы – 5 мм; расстояние от линзы до поверхности пленки – 5 мм; диаметр металлических включений – 50 мкм, 15 мкм, 5 мкм, 1 мкм; толщина пленки, в которой располагаются включения 500 мкм; материал металлических включений – титан; материал образца – сталь. Следует отметить, что титан добавляется в сплавы для повышения прочности, стойкости к коррозии и температурам. В инструментальных сталях титан позволяет повысить теплостойкость [4].

Распространение волн в иммерсионной жидкости от акустической линзы к образцу представим в виде усеченного конуса, верх-

нее основание которого образовано кромкой вогнутой части акустической линзы, а нижнее основание – «размытой» точкой фокусировки на поверхности образца. Высота конуса – расстояние от образца до линзы. Проходя сквозь образец с металлическими включениями, волны распространяются перпендикулярно его поверхности, образуя фигуру цилиндра, поэтому распространение УЗ волн вокруг «размытой» точки фокусирования не учитывается. Диаметр моделируемого цилиндра равен диаметру «размытой» точке фокусирования, а его высота соответствует толщине тонкого образца. Внутри цилиндра располагаются металлические включения из титана.

Для построения электрической модели подставим в формулы (1) – (3) параметры соответствующей среды. В результате формируются параметры электрической модели, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры электрической модели

Тип материала	C	R	L
Иммерсионная жидкость (вода)	40,5 мкФ	1,17 Ом	31,3 мкГн
Сталь	3,06 мкФ	31,4 Ом	343 нГн
Титан (1мкм)	0,01 пФ	105 нОм	200 мГн

В качестве источника ультразвука для электрической модели примем идеальный источник напряжения, так как он поддерживает постоянное напряжение, и колебательная скорость для механического аналога при идеальном источнике всегда будет одинаковой. При этом для токов, протекающих в электрической схеме, аналогом механической

модели являются силы, которые возникают в ее слоях.

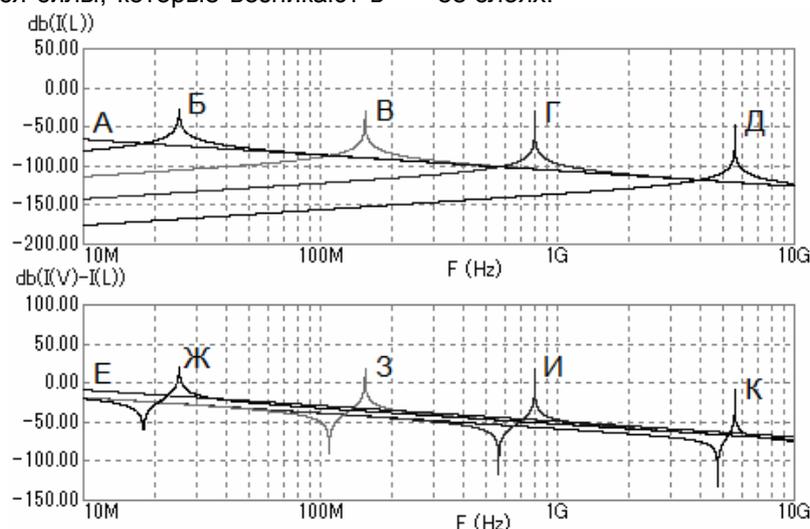


Рисунок 3 – Графики, иллюстрирующие работу имитационной модели (А,Е – без титановых включений; Б,Ж – титановые включения диаметром 50мкм; В,З – титановые включения – 15мкм; Г,И – титановые включения – 5мкм; Д,К – титановые включения – 1мкм)

Прохождение УЗ волны в акустическом тракте микроскопа осуществляется следующим образом. При наличии включения внутри образца УЗ волны отражаются от его границы и не попадают на ультразвуковой приемник (рисунок 1). Если размер включения больше длины УЗ волны, то вся энергия волн отразится от него, и приемник ультразвука не будет принимать сигнал. При этом эхо-сигнал регистрирует включение внутри исследуемого объекта. Если диаметр включения в плоскости, перпендикулярной направлению распространения УЗ волн, меньше длины волн, то в силу явления дифракции УЗ волны обогнут включение и пройдут к приемнику ультразвука [9,10]. В этом случае включение может быть не зарегистрировано.

Несмотря на явление дифракции, при соответствующем размере включения по отношению к длине УЗ волны, все же значительная часть звуковой энергии будет отражена от границы включения, и только ее часть попадет на приемник ультразвука. В этом случае амплитуда эхо-сигнала на входе приемника будет сильно ослаблена по сравнению с амплитудой УЗ волн, прошедших через объект в бездефектном месте.

На рисунке 3 графики А-Д (полученные в среде Micro-Cap) отображают амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) тока, протекающего через катушку  $L_5$ . В данном случае это сигнал, который попадает на приемный пьезопреобразователь микроскопа в режиме

с ходом лучей «на прохождение». Графики Е-К иллюстрируют АЧХ разности токов от входного источника  $V_1$  и тока, текущего через катушку  $L_5$ :  $I_{\text{ЭХО}} = I_{V1} - I_{L5}$ . Это сигнал, который формируется в режиме с ходом лучей «на отражение».

Источник сигнала  $V_1$  генерирует ультразвуковые колебания с частотой от 10 МГц до 10 ГГц. Диапазон частот выбран из спецификации работы ультразвуковых акустических микроскопов [11]. Графики А, Е соответствуют образцу без металлических включений; графики Б, Ж – титановым включениям диаметром 50 мкм; графики В, З – титановым включениям – 15 мкм; графики Г, И – титановым включениям – 5 мкм; графики Д, К – титановым включениям – 1 мкм. Пики на АЧХ соответствуют резонансным явлениям.

Анализ графиков (рисунок 3) показывает, что с добавлением титановых включений в модель изменяется подъем характеристики АЧХ тока, протекающего через катушку  $L_5$ . При уменьшении размера включений от 50 мкм до 1 мкм подъем тока в графике АЧХ занимает все более верхний диапазон частот. При этом ток, протекающий через катушку  $L_5$ , соответствует силе, которая воздействует на приемный пьезопреобразователь через акустическую линзу и формирует информационный сигнал.

В целом, можно сделать следующие выводы. При подаче зондирующего УЗ импульса в образец, который содержит металлическое включение, максимальная сила в отраженном эхо-сигнале (которая воздействует на приемный пьезопреобразователь) возникает при частоте резонанса. Частота этого резонанса зависит от массы и габаритов металлического включения. Чем меньше его габариты, тем выше располагается частота резонанса. Аналогично с применением предложенного подхода можно исследовать влияние физико-механических свойств материалов образца и включений на работу акустического микроскопа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Целуйкин В.Н. и др. Электролит для осаждения композиционных покрытий никель-коллоидный графит // Патент РФ на изобретение №2354760 МПК С25D15/00; опубл. 10.05.2009, бюл. №13.
2. Б.И. Капранов, М.М. Коротков Акустические методы контроля и диагностики // Томск, 2008. – 186с.
3. С.Н. Пономарев, М.В. Гущин, И.И. Михайлов Особенности контроля сварных соединений из нержавеющей стали с применением дефектоскопа с фазированной решеткой // NDT World Review 2007. – №4. – Р38.
4. Ультразвуковая дефектоскопия [Интернет ресурс] // URL:
5. Алексеев А.Г. и др. Технология конструкционных материалов // СПб., «Питер», 2015. – 512с.
6. Ленк А. Электромеханические системы. Системы с распределенными параметрами // М.- Энергоиздат, 1982, С.339.
7. Сапожков М.А. Электроакустика. Учебник для вузов. М., «Связь», 1978. – 272с.
8. Маркин Д. Теоретические основы электроакустики. Конспект лекций // СПб.– СПбГУКИТ, С.25.
9. Дефектоскопы непрерывного излучения. Энциклопедия по машиностроению XXL [Интернет ресурс] // URL: <http://mash-xxl.info/info/192091/> (Дата обращения 01.10.2017).
10. Ультразвук. Основы теории распространения ультразвуковых волн [Интернет ресурс] // URL: <http://engineering-solutions.ru/ultrasound/theory/> (Дата обращения 25.09.2017).
11. Микроскопия акустическая. Энциклопедия физики и техники [Интернет ресурс] // URL: [http://femto.com.ua/articles/part\\_1/2285.html](http://femto.com.ua/articles/part_1/2285.html) (Дата обращения 25.09.2017).

**Шелковников Юрий Константинович** – д.т.н., г.н.с. ИМ УРО РАН, тел.: 8(3412)214583 доб. 210, e-mail: [evshelk@mail.ru](mailto:evshelk@mail.ru); Ермолин Кирилл Сергеевич – м.н.с. ИМ УрО РАН, e-mail: [ermolin@udm.ru](mailto:ermolin@udm.ru); Кириллов Андрей Игоревич – м.н.с. ИМ УрО РАН, e-mail: [pattl7@mail.ru](mailto:pattl7@mail.ru); Осипов Николай Иванович – к.т.н., с.н.с. ИМ УрО РАН, e-mail: [niosip@mail.ru](mailto:niosip@mail.ru)