

УДК 51-72; 53.082.4; 620.179.16.

ЧАСТОТНО-ИМПЕДАНСНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКУСТОЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Кузнецов В.П.

Научно-технический кооператив «Экология» (НТК «Экология»), г. Кемерово, Россия 650000, пр. Октябрьский, 64avpk-51@mail.ru

На основании теории распространения упругих волн в слоистых материалах реализовано импедансное математическое моделирование неразрушающего контроля акустоэлектромагнитным методом композиционных материалов. С помощью этой модели получены резонансные частоты модельного композиционного материала. В структуру композиционного материала закладывались дефекты. Первый тип дефектов в виде отсутствия адгезива – раскрытый непрочлей. Второй тип дефекта отсутствие адгезива – прижатый непрочлей. Полученная математическая модель позволяет находить резонансные частоты для композиционных материалов, не имеющих дефекты, а также имеющих дефекты типа отсутствие адгезива в зажатом и раскрытом состоянии. В качестве примера рассмотрена трехслойная модель, для которой рассчитаны резонансные частоты, хорошо согласующиеся с результатами акустического резонансного метода. Из работы следует, что резонансные частоты дефектных образцов сдвигаются. Так, для образцов с дефектом типа раскрытый непрочлей резонансные частоты сдвигаются в сторону меньших частот. Для образцов с дефектами типа прижатый непрочлей резонансные частоты сдвигаются в сторону больших частот. Таким образом, показано, что активированный адгезив является датчиком дефектов как в активированном адгезионном соединении, так и в соседних.

Ключевые слова: импеданс, акустоэлектромагнитный, частота, резонанс, неразрушающий контроль, композиционный материал.

FREQUENCY IMPEDANCE PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELS AKUSTOELEKTROMAGNITNOGO METHOD OF NONDESTRUCTIVE TESTING COMPOSITE MATERIALS

Kuznetsov V.P.

Scientific and technical cooperative "Ecology" (NTC "Ecology"), Kemerovo, Russia 650000, etc. October, 64avpk-51@mail.ru

On the basis of the theory of propagation of elastic waves in layered materials sold impedance mathematical modeling akustoelektromagnitnym NDT method of composite materials. Using this model, the model obtained resonance frequencies of the composite material. The structure of the composite material laid defects. The first type of defects in the form of a lack of adhesive – neprokley disclosed. The second type of defect no adhesive - pressed neprokley. The resulting mathematical model to find the resonant frequency of composite materials having no defects, as well as having defects such as lack of adhesive and clamped in the open state . As an example, the three-layer model that calculated resonant frequencies are in good agreement with the results of the acoustic resonance method. Of work that the resonant frequency shift of defective samples. So for samples with defect type disclosed neprokley resonance frequencies are shifted to lower frequencies. For samples with defects such as pressed neprokley resonance frequencies are shifted to higher frequencies. We have thus shown that the activated adhesive is a sensor defect in activated adhesive joint and neighboring.

Keywords: impedance, akustoelektromagnitny, frequency, resonance, non-destructive testing, the composite material.

Математическое моделирование акустоэлектромагнитного метода (АЭМ) неразрушающего контроля (НК) композиционных материалов (КМ) и полимеров с применением частотно-импедансного физико-математического подхода позволяет решить большое количество научных задач и полней интерпретировать результаты измерений при оценке механических свойств КМ. Несомненным преимуществом физико-математического моделирования АЭМ является возможность оценки свойств КМ и параметров зондирующих

излучений с точки зрения информационной достоверности НК АЭМ, чем это можно было бы выполнить в экспериментах. Недостатком моделирования в некоторых случаях является введение допущений и ограничений в исходные параметры и режимы из-за сложности применяемого для решения задачи математического аппарата или необходимости учета большого количества факторов, не оказывающих серьезного влияния на исследуемый процесс, но существенно усложняющий модель [10].

При математическом моделировании волновых механических и электромагнитных процессов в веществе, как правило, используется волновая теория [9].

В силу новизны рассматриваемой задачи, а также судя по современным литературным данным, в настоящее время нет четкого понимания и толкования физических основ акустоэлектромагнитного метода [3]. Поэтому в материалах этой работы возникает необходимость рассмотреть факторы, влияющие на параметры электромагнитного излучения от кристаллитов частиц сегнетокерамики клеевого слоя, стимулируемые акустическими волнами, а также рассмотреть связь этих факторов от прочности клеевого соединения и установить их функциональную зависимость. Лишь установив эти функциональные зависимости, можно обоснованно выбирать коррелирующие параметры, исключая большое бесполезное количество экспериментальной работы и вычислительных операций по распознаванию образов [3].

Анализ эмпирических результатов АЭМ [1,2,5,6] позволяет сделать заключение, что только процесс синфазного преобразования акустической энергии в электромагнитную кристаллитами частиц сегнетокерамики дает возможность оценить прочностные свойства клеевого соединения. Это становится возможным благодаря тому, что и адгезив, и частицы, введенные в него, одновременно испытывают на себе действие одних и тех же факторов [6].

Знание физических основ АЭМ позволяет: анализировать протекающие процессы в нем, находить границы его применения и выявлять причины корреляции параметров электромагнитного излучения с прочностными свойствами клеевого соединения. Кроме того, позволяет выявить не только реальные уровни корреляции и увеличить чувствительность АЭМ, но находить регрессионные соотношения, описывающие связь электромагнитного излучения АЭМ и адгезионной прочности КМ [1,2,5,6].

Таким образом, задачей настоящей работы является исследование частотной зависимости электромагнитного излучения от прочностных свойств клеевого соединения.

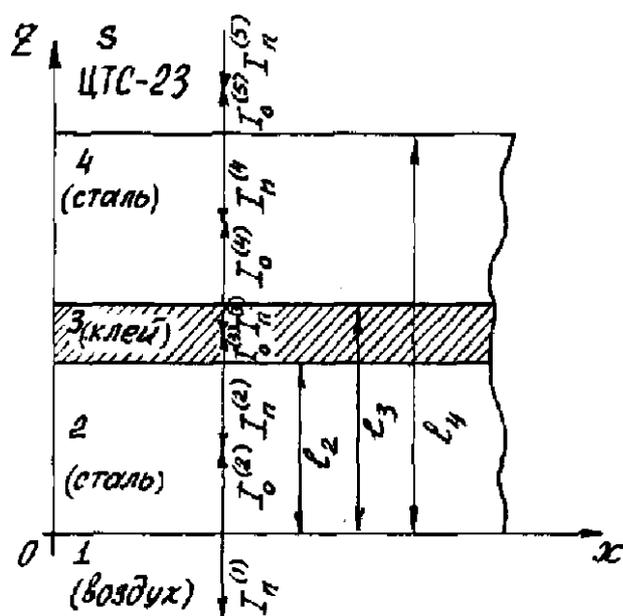


Рис.1. К вопросу о нахождении резонансных свойств трехслойной системы. $I_n^{(1)}, I_n^{(2)}, I_n^{(3)}, I_n^{(4)}, I_n^{(5)}$ – интенсивность падающей упругой волны соответственно в 1-й, 2-й, 3-й, 4-й, 5-й средах, l_2 – толщина второго слоя, l_3 – толщина второго слоя вместе с клеевым соединением, l_4 – толщина композиционного трехслойного изделия

При реализации АЭМ в изделие или образец излучают широкополосные механические колебания [5]. При этом механические колебания разных частот взаимодействуют с образцом, усиливаются или ослабляются в зависимости от резонансных свойств КМ. В соответствии с теориями, излагаемыми в [4,7,9], в жестко связанных с большим коэффициентом затухания системах резонансы возникают лишь на частоте системы и ее гармониках. Так как частицы сегнетодобавок имеют размеры (10^{-5} – 10^{-8} м) и соизмеримы или меньше длины акустических волн, лежащие в области сотен МГц, то они одинаково реагируют на частоты, лежащие в области резонансных свойств изделий. Этот факт позволяет считать в области рассматриваемых частот КМ коэффициент электромеханической связи активированного клеевого шва постоянным.

В общем случае все слои такой системы должны рассматриваться как элементы с распределенными параметрами [4]. Исключив из рассмотрения площади поперечного сечения луча акустических колебаний, перейдем к удельным величинам. Тогда определяющий резонансные свойства системы входной механический импеданс можно найти, решая систему волновых уравнений с соответствующими граничными условиями.

При дальнейшем рассмотрении, для упрощения математической модели будем считать, что композиционное изделие состоит из 3-х слоев. Присвоим соответственно номера 5, 4, 3, 2 и 1 среде, из которой падает волна, слоям системы и среде, в которую проходит волна, это изображено на рис.1.

Система волновых уравнений, с помощью которых найдем волновой импеданс КМ, будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2} - \frac{1}{\rho_1 \beta_{S1}} \cdot \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x \partial z} &= 0, \\
 \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial t^2} - \frac{1}{\rho_2 \beta_{S2}} \cdot \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial x \partial z} &= 0, \\
 \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial t^2} - \frac{1}{\rho_3 \beta_{S3}} \cdot \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial x \partial z} &= 0, \\
 \frac{\partial^2 \varphi_4}{\partial t^2} - \frac{1}{\rho_4 \beta_{S4}} \cdot \frac{\partial^2 \varphi_4}{\partial x \partial z} &= 0, \\
 \frac{\partial^2 \varphi_5}{\partial t^2} - \frac{1}{\rho_5 \beta_{S5}} \cdot \frac{\partial^2 \varphi_5}{\partial x \partial z} &= 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где φ_i – звуковой поток в i -й среде, x, z, t – координаты и время соответственно, ρ_i – плотность i -й среды, β_{Si} – сжимаемость i -й среды, причем решение системы уравнений должно удовлетворять граничным условиям:

$$\begin{aligned}
 \rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} \Big|_{z=0} &= \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} \Big|_{z=0}, & \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} \Big|_{z=0} &= \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} \Big|_{z=0}, \\
 \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} \Big|_{z=l_2} &= \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} \Big|_{z=l_2}, & \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} \Big|_{z=l_2} &= \frac{\partial \varphi_3}{\partial z} \Big|_{z=l_2}, \\
 \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} \Big|_{z=l_3} &= \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} \Big|_{z=l_3}, & \frac{\partial \varphi_3}{\partial z} \Big|_{z=l_3} &= \frac{\partial \varphi_4}{\partial z} \Big|_{z=l_3}, \\
 \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} \Big|_{z=l_4} &= \rho_5 \frac{\partial \varphi_5}{\partial t} \Big|_{z=l_4}, & \frac{\partial \varphi_4}{\partial z} \Big|_{z=l_4} &= \frac{\partial \varphi_5}{\partial z} \Big|_{z=l_4},
 \end{aligned} \tag{2}$$

где l_2, l_3, l_4 – соответственно координаты границ от границы слоя 1 – 2. Решение системы дифференциальных уравнений (1) с учетом граничных условий (2) имеет вид волновых функций, характеризующих упругие волны в соответствующих слоях КМ:

$$\begin{aligned}
 \varphi_1 &= A_1 \exp j(\omega t - k_1 z), \\
 \varphi_2 &= A_2 \exp j(\omega t - k_2 z) + B_2 \exp j(\omega t - k_2 z), \\
 \varphi_3 &= A_3 \exp j(\omega t - k_3 z) + B_3 \exp j(\omega t - k_3 z), \\
 \varphi_4 &= A_4 \exp j(\omega t - k_4 z) + B_4 \exp j(\omega t - k_4 z), \\
 \varphi_5 &= A_5 \exp j(\omega t - k_5 z) + B_5 \exp j(\omega t - k_5 z).
 \end{aligned} \tag{3}$$

где A_i – амплитуда падающей упругой волны в i –й среде, B_i – амплитуда отраженной упругой волны в i –й среде, ω – круговая частота упругих колебаний среды, $k_i = \omega/c_i$ – волновое число i –й среды, c_i – скорость распространения упругих волн в i –й среде.

Зная, что импеданс определяется отношением давления P к скорости смещения частиц среды \vec{v} [9], получим, решая систему (3), систему уравнений для давления упругих волн и скорости смещения частиц среды, выразив в соответствии с выражениями:

$$P = -i\omega\rho\varphi, \quad \vec{v} = -grad \varphi. \quad (4)$$

Таким образом, звуковое давление и скорость частиц в средах композиционного изделия будет иметь вид:

$$\begin{aligned} P_1 &= -i\omega\rho_1\varphi_1, & \vec{v}_1 &= k_1\varphi_1, \\ P_2 &= -i\omega\rho_2\varphi_2, & \vec{v}_2 &= k_2\varphi_2, \\ P_3 &= -i\omega\rho_3\varphi_3, & \vec{v}_3 &= k_3\varphi_3, \\ P_4 &= -i\omega\rho_4\varphi_4, & \vec{v}_4 &= k_4\varphi_4, \\ P_5 &= -i\omega\rho_5\varphi_5, & \vec{v}_5 &= k_5\varphi_5. \end{aligned} \quad (5)$$

Решая систему (5) методом, описанным в [4], получим для входного импеданса трехслойной системы (при $Z_1 \approx 0$, $Z_5 \approx 0$, так как среда 1 и 5 – воздух, а среда 2 и 4 – сталь, на границе сталь – воздух происходит полное отражение упругой волны) выражение вида:

$$Z_{\text{вх}}^{(3)} = \frac{-i[Z_2^2 Z_3 \delta_2 + Z_2 Z_3^2 \delta_3 + Z_2 Z_3 Z_4 \delta_4 - Z_2^2 Z_4 \delta_2 \delta_3 \delta_4]}{Z_2 Z_3 Z_4 - Z_2^2 Z_4 \delta_3 \delta_2 - Z_2^2 Z_4 \delta_2 \delta_4 - Z_2 Z_3^2 \delta_3 \delta_4} \cdot Z_4, \quad (6)$$

где $Z = \rho \cdot c$ – импеданс, $\delta = tg(kd)$, d – толщина слоя.

Модель уравнения (6) для трехслойной системы, у которой слой 4 и 2 имеют одинаковые акустические параметры, будет иметь вид:

$$\frac{\rho c}{\rho_1 c_1} = tg\left(\frac{2\pi f_0}{c_1} d_1\right) \cdot tg\left(\frac{2\pi f_0 d}{c} \frac{d}{2}\right), \quad (7)$$

где ρ и ρ_1 – плотность соответственно клеящего полимера с кристаллитами сегнетокерамики и склеиваемых деталей, c и c_1 – скорость распространения упругих волн соответственно в клеящем полимере с кристаллитами сегнетокерамики и склеиваемых деталях, f_0 – резонансная частота трехслойного композиционного изделия.

Для произвольной, т.е. имеющей несопоставимые параметры, трехслойной композиционной системы решение уравнения (6) будет иметь вид:

$$Z_{\text{ВХ}}^{(3)} = \frac{\sin\left(\frac{2\pi f_0}{c_3} d_3\right) \cdot \left[Z_3 \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_0 d_3}{c_3} \frac{d_3}{2}\right) + Z_2 \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_0}{c_2} d_2\right) \right] \cdot \left[Z_3 \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_0 d_3}{c_3} \frac{d_3}{2}\right) + Z_4 \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_0}{c_4} d_4\right) \right]}{2Z_3 \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_0 d_3}{c_3} \frac{d_3}{2}\right) + Z_2 \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_0}{c_2} d_2\right) + Z_4 \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_0}{c_4} d_4\right)}, \quad (13)$$

где d_2, d_3, d_4 – соответственно толщины 2, 3 и 4-го слоев КМ. Решение уравнения (13) аналогично решению уравнения (7), но имеет более сложное решение и описывает большее количество резонансных частот. Для понимания АЭМ достаточно решения уравнения (7).

Найдем резонансные частоты композиционного материала, описанного уравнением (7), для этого представим это уравнение в виде.

$$A = \operatorname{tg}(\alpha x) \cdot \operatorname{tg}(\beta x) \quad (9)$$

где $A = \frac{\rho c}{\rho_1 c_1}$, $\alpha = d_1/c_1$, $\beta = d/2c$, $x = 2\pi f_0$,

продифференцируем дважды выражение (9), получим второе уравнение, характеризующее процесс распространения акустических волн в нашей трехслойной системе, которое будет иметь вид:

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha x)}{\operatorname{tg}(\beta x)} \cdot \frac{(1 - \operatorname{tg}^2(\beta x))}{(1 - \operatorname{tg}^2(\alpha x))}. \quad (10)$$

Решая совместно уравнения (9) и (10), найдем значения тангенсов,

$$\operatorname{tg}(\alpha x) = \pm \sqrt{A \frac{\alpha + \beta A}{\beta + \alpha A}}; \quad \operatorname{tg}(\beta x) = \pm \sqrt{A \frac{\beta + \alpha A}{\alpha + \beta A}}. \quad (11)$$

откуда получим, что наша композиционная система имеет восемь основных резонансных частот и $8n$ гармоник, которые описываются системой уравнений:

$$\begin{aligned} f_{n1} &= \frac{1}{2\pi\alpha} \operatorname{arctg} \sqrt{A \frac{\alpha + \beta A}{\beta + \alpha A}} + \frac{n}{4\alpha}, f_{n3} = \frac{1}{2\pi\alpha} \operatorname{arctg} \left(-\sqrt{A \frac{\alpha + \beta A}{\beta + \alpha A}} \right) + \frac{n}{4\alpha}, \\ f_{n2} &= \frac{n+1}{4\alpha} - \frac{1}{2\pi\alpha} \operatorname{arctg} \sqrt{A \frac{\alpha + \beta A}{\beta + \alpha A}}, f_{n4} = \frac{n+1}{4\alpha} - \frac{1}{2\pi\alpha} \operatorname{arctg} \left(-\sqrt{A \frac{\alpha + \beta A}{\beta + \alpha A}} \right), \\ f_{n5} &= \frac{1}{2\pi\beta} \operatorname{arctg} \sqrt{A \frac{\beta + \alpha A}{\alpha + \beta A}} + \frac{n}{4\beta}, f_{n7} = \frac{1}{2\pi\beta} \operatorname{arctg} \left(-\sqrt{A \frac{\beta + \alpha A}{\alpha + \beta A}} \right) + \frac{n}{4\beta}, \\ f_{n6} &= \frac{n+1}{4\beta} - \frac{1}{2\pi\beta} \operatorname{arctg} \sqrt{A \frac{\beta + \alpha A}{\alpha + \beta A}}, f_{n8} = \frac{n+1}{4\beta} - \frac{1}{2\pi\beta} \operatorname{arctg} \left(-\sqrt{A \frac{\beta + \alpha A}{\alpha + \beta A}} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Рассмотрим модели композиционных материалов, отображающих: качественное изделие КМ №1, изделие с дефектом типа «пустота» КМ №2, изделие с дефектом типа «прижатый непрочлей» КМ №3.

1. Композиционный материал № 1 состоит из двух стальных пластин ($\rho_1 = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $d_1 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $c_1 = 5100 \text{ м/с}$), качественно склеенных эпоксидным клеем с добавками кристаллитов сегнетокерамики ($\rho = 1100 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $d = 10^{-4} \text{ м}$, $c = 2350 \text{ м/с}$). КМ будет иметь характеристики уравнения (9): $A = 0,06498$, $\alpha = 9,8 \cdot 10^{-7} \text{ с}$, $\beta = 2,1 \cdot 10^{-8} \text{ с}$, $x = 2\pi f_{ni}$. Подставляя эти значения в систему (12), получим значения резонансных частот от основной до n гармоники, соответствующих нашему композиционному изделию. Изделие имеет восемь основных ($n = 0$) резонансных частоты и бесконечное множество гармоник.

2. Композиционный материал № 2 состоит из двух стальных пластин $\rho_1 = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $d_1 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $c_1 = 5100 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, имеет непрочлей толщиной $d = 10^{-4} \text{ м}$, заполненный воздухом, для которого $\rho = 1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $c = 330 \text{ м/с}$. Вычислим параметры для уравнения (9) $A = 1,07 \cdot 10^{-5}$, $\alpha = 9,8 \cdot 10^{-7} \text{ с}$, $\beta = 15,1 \cdot 10^{-8} \text{ с}$, $x = 2\pi f_{ni}$. Подставляя эти значения в выражение (12), получим значения восьми резонансных частот основных гармоник, соответствующих изделию при наличии таких дефектов в зоне контроля.

3. Рассмотрим КМ №3, состоящий из двух стальных пластин $\rho_1 = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $d_1 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $c_1 = 5100 \text{ м/с}$, имеющий прижатый непрочлей с толщиной слоя $d = 0 \text{ м}$, а воздух и клей отсутствуют. Вычислим параметры для уравнения (9) $A = 1$, $\alpha = 9,8 \cdot 10^{-7} \text{ с}$, $\beta = 0 \text{ с}$, $x = 2\pi f_{ni}$. Подставляя эти значения в выражение (12), получим значения восьми резонансных частот основных гармоник упругих колебаний, соответствующих изделию при наличии такого дефекта в зоне контроля.

Вычисления сведем в таблицу, на основании которой построим диаграмму и проанализируем результаты. В первом столбце таблицы размещены номера резонансных основных частот спектра, вычисленных в порядке системы (12). Второй третий и четвертый столбец, соответственно резонансные частоты соответствующих изделий. Нижняя строка, вычисленная средняя частота спектров. Используя данные таблицы, построим диаграмму спектров. По оси абсцисс отложены десятичные логарифмы частот, по оси ординат приведенные амплитуды резонансных частот. На основании этой диаграммы сделаем выводы.

Таблица. Резонансные частоты, вычисленные для: КМ №1, КМ №2, КМ №3

Номер основной резонансной	КМ №1 без дефектов	КМ №2 с дефектом типа «пустота»	КМ «3 с дефектом типа «Прижатый

частоты	(кГц)		непроклей»
			(кГц)
1	115,902	1,350	127,494
2	625,902	511,351	637,494
3	904,098	1018,649	892,505
4	394,098	508,649	382,505
5	559,975	1,350	$1,1242 \cdot 10^6$
6	24059,975	33013,351	$3,3 \cdot 10^{11}$
7	46440,025	3298,649	$6,6 \cdot 10^{11}$
8	22940,025	6598,649	$3,3 \cdot 10^{11}$
\bar{f}	12005.96	5619,04	$1,65 \cdot 10^{11}$

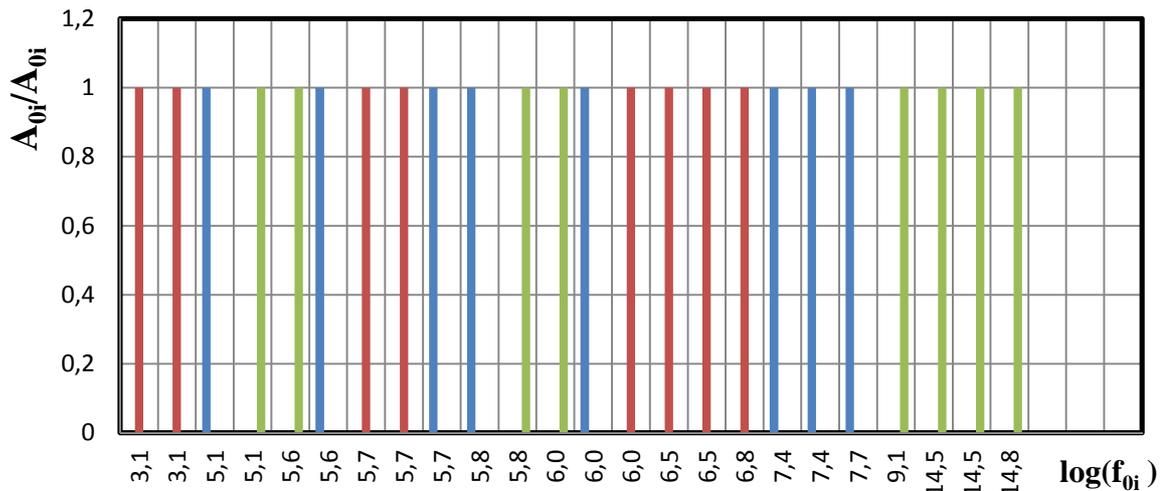


Рис. 2. Спектры основных резонансных частот изделий: КМ №1 (линии голубого цвета), КМ №2 (линии коричневого цвета), КМ №3 (линии зеленого цвета)

Выводы

1. Из диаграммы следует, что КМ № 2, имеющий дефект типа «Пустоты», имеет резонансный спектр, сдвинутый в сторону меньших частот относительно спектра нормального КМ № 1, и уменьшает в 2,14 раза среднюю частоту спектра. КМ № 3, имеющий дефект типа «Прижатый непрочлей», сдвигает резонансный спектр в сторону больших частот относительно спектра нормального КМ №1 и увеличивает в $15 \cdot 10^6$ раз среднюю частоту спектра.

2. Активированный ориентированными кристаллитами сегнетокерамики клеящий полимер выступает в композиционном изделии как датчик упругих волн и способен регистрировать резонансные частоты, присущие этому изделию. При этом активированное адгезионное соединение выявляет пустоты и прижатые непрочлеи как в себе, так и в соседних не активированных адгезионных соединениях.

3. Полученные данные хорошо согласуются с данными акустического резонансного метода [8], дающего аналогичные экспериментальные результаты, но имеющего меньшую

точность за счет присоединенных импедансов излучателя и приемника и соответственно большее количество основных резонансных частот.

Список литературы

1. А.С. 1427292 СССР, МКИ³G01N 29/04. Способ контроля клеевых соединений / В.П. Кузнецов (СССР). – 3 с.: ил.
2. А.С. 1439489 СССР, МКИ³G01N 29/04. Способ контроля клеевых соединений композиционных изделий / В.П. Кузнецов (СССР). – 3 с.: ил.
3. Боровиков А.К., Воркунова Л.Н., Риттер Ю.А., Шилин П.У. Эмиссия электромагнитного излучения клеевого шва с пьезоактивной средой // X Юбилейный Всесоюзный симпозиум по механоэмиссии и механохимии твердого тела от 24-26 сентября 1986 г.: Тез. докл. – Ростов-на-Дону, 1986.
4. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973. – 502 с.
5. Кузнецов В.П., Фадеев Ю.А., Кулешов В.К. Акустоэлектромагнитный метод неразрушающего контроля прочности клеевых соединений. ЭЖ «Современные проблемы науки и образования» СПНиО, № 6, 2011, 8 декабря 2011. Ссылка: <http://www.science-education.ru/100-5011>.
6. Кузнецов В. П. Антиэлектрострикционный способ контроля адгезионной прочности // XI Всесоюз. научно-техническая конф. "Неразрушающие физические методы и средства контроля": Тез. докл. ч. 3. – М., 1987. С. 41.
7. Ланге Ю.В. О физических основах ультразвукового резонансного метода неразрушающей оценки прочности клеевых соединений // Дефектоскопия. – 1974. – № 1. – С. 96-107.
8. Ланге Ю.В. О физических основах ультразвукового резонансного метода неразрушающей оценки прочности клеевых соединений // Дефектоскопия. – 1974. – № 1. – С. 96-107.
9. Лепендин Л.Ф. Акустика: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.
10. Мышкис А.Д. Элементы теории математических моделей. – М.: КомКнига, 2007. – 192 с.

Рецензенты:

Сидуленко О.А., д.т.н., с.н.с., директор «АНО «Научно-исследовательский институт интроскопии», г. Томск.

Каленский А.В., д.ф.-м..н., доцент, профессор кафедры химии твердого тела ФГБОУ ВПО «Кемеровский государственный университет» «КемГУ», г. Кемерово.