

**ИНФОРМАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ АКУСТОЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕТОДА  
И ПУТИ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ**

*В. П. Кузнецов, Б. П. Невзоров, Ю. А. Фадеев*

**CAPABILITY OF THE ACOUSTIC ELECTRO-MAGNETIC METHOD  
AND WAYS OF ITS IMPROVEMENT**

*V. P. Kuznetsov, B. P. Nevzorov, Y. A. Fadeev*

В настоящей работе представлены процессы, вносящие существенный вклад в увеличение систематической ошибки (шума) при разработке акустоэлектромагнитного метода. Показано сочетание экспериментальных и теоретических приемов, уничтожающих эти шумы и повышающих коэффициент корреляции между физическими величинами метода. В частности между адгезионной прочностью и электромагнитным излучением, которое возбуждается действием широкополосного линейного акустического излучения на клеевое соединение, активированное ориентированными кристаллитами сегнетокерамики.

This paper presents the processes that make a significant contribution to the increase of systematic errors (noise) in developing the acoustic electro-magnetic method. The authors have shown a combination of experimental and theoretical methods destroying these noises and increasing the coefficient of correlation between physical quantities of the method, particularly between adhesion strength and electromagnetic radiation, which is excited by the action of a linear broadband acoustic radiation by adhesive bonding, activated by oriented crystallites of ferroelectric ceramics.

**Ключевые слова:** акустоэлектромагнитный метод, систематические шумы, передаточная функция, нормировка, частотный диапазон, корреляция, адгезионная прочность, электромагнитное излучение.

**Keywords:** acoustic electro-magnetic method, systematic noise, transfer function, normalization, frequency range, correlation, adhesive strength, electromagnetic radiation.

Электромагнитное изучение (ЭМИ) клеевого соединения, активированного ориентированными кристаллитами сегнетокерамики, регистрируется магнитной антенной и поступает на анализатор спектра СК4-56 и отображается в виде зависимости амплитуды от частоты (рис. 1) [1; 4] или таблиц. Спектрограммы, кроме полезного сигнала, имеют шум, обусловленный множеством статистических причин. К числу этих причин мы относим: 1) нестабильность генерирования электрических импульсов по частоте их следования; 2) нестабильность генерирования электрических импульсов по амплитуде; 3) нестабильность генерирования электрических импульсов по их длительности; 4) нестабильности преобразования электрических сигналов в механические колебания; 5) нестабильности прохождения механических колебаний от излучателя к контролируемому клеевому слою; 6) нестабильности работы анализатора, т. к. невозможна жесткая его синхронизация и т. д.; 7) нестабильности трансформации механических колебаний в электрические активированными кристаллитами сегнетокерамики связующим полимером.

Если первые шесть причин достаточно хорошо освещены в литературе, то седьмая причина как спе-

цифическая обусловлена остаточной ориентацией кристаллитов сегнетокерамики, активирующих клеящий полимер. Остаточная ориентация кристаллитов сегнетокерамики зависит от множества причин: толщины гетерогенного слоя, концентрации активирующих кристаллитов, условий ориентации кристаллитов и т. д. Седьмая причина также обусловлена отражением прохождением акустической волны на границах раздела сред композиционного материала. Эта зависимость играет роль систематических ошибок, граница которой со случайными ошибками имеет условный характер [1].

Все перечисленные факторы в акустоэлектромагнитном методе являются помехой, избавление от которых можно осуществлять двумя способами. **Первый способ** заключается в строгом выполнении регламента всех работ при реализации метода, применении высококачественного оборудования и материалов. Этот метод повышает корреляцию с 30 % до 65 %, но не более. **Второй способ** заключается в применении статистических приемов обработки регистрируемой информации в сочетании с дополнительно регистрируемой информацией.

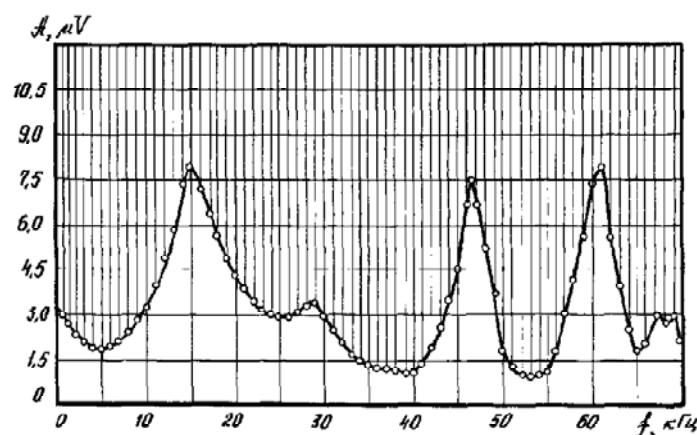


Рис. 1. Сглаженный Фурье-образ электромагнитного излучения (ЭМИ) образца, пуансоны которого склеены эпоксидным клеем на основе полимера марки ЭД-5, активированного кристаллитами сегнетокерамики (средний размер которых –  $5 \cdot 10^{-6}$  м, концентрация – 5 % весовых) марки ЦТС-23. ЭМИ стимулировано акустическим широкополосным линейным спектром

Все шумы можно разбить на две группы. К первой группе относятся шумы, снижающие зависимость от частоты, независимо от образца или точки сканирования. Эту группу называют эргодическим случайным дискретным ЭСД процессом [3; 6]. Нестационарность процесса заключается в изменении амплитуды электрического сигнала во времени при разложении в ряд Фурье. Эргодичность процесса заключается в том, что данные, получаемые для одного образца от одного измерения будут отличаться для другой реализации измерения того же образца. Случайность процесса заключается в том, что сигнал подвергается действию других неизвестных процессов. И с этими процессами невозможно бороться, только если применять методы аппроксимации и сглаживания эргодического случайного процесса, устремляя его к математическому ожиданию – Movingu процесса.

Ко второй группе отнесены систематические причины, снижающие зависимость трансформации от частоты в разных точках контроля или на разных образцах. Эту группу причин не только можно выявить (экспериментально), но также можно охарактеризовать их действие на полученный сигнал.

В этом разделе предлагаются алгоритмы «очистки» полезного сигнала от причин, относящихся ко второй группе. Для того чтобы уменьшить влияние систематических отклонений на результаты, необходимо освободить их от наложений, обусловленных изменчивостью интенсивности акустических волн на контролируемом участке (клеевом слое), освободить от изменений, обусловленных концентрацией сегнетодобавок в связующем полимере и других аналогичных явлений. Для этого представим амплитуду гармонической составляющей электрического сигнала, полученного при регистрации электромагнитного излучения, в виде:

$$A_i(\omega) = k_i(\omega) \cdot J_i(\omega), \quad (1)$$

где  $i$  – номер контролируемого образца или номер контролируемой точки изделия,  $\omega$  – частота гармоники,  $k_i(\omega)$  – коэффициент электромеханической связи кристаллитов сегнетокерамики, введенных в связующий полимер на частоте  $\omega$ ,  $J_i(\omega)$  – интенсивность аку-

стической волны, дошедшей до контролируемой границы между связующим полимером, активированным кристаллитами сегнетокерамики и склеиваемым субстратом. В свою очередь, интенсивность акустической волны [2], дошедшей до активированного связующего полимера, можно представить как

$$J_i(\omega) = \left\{ \prod_{j=1}^n \alpha_j(\omega) \right\} \exp \left\{ - \sum_{j=1}^n \beta_j(\omega) \cdot d_j \right\} J_0(\omega), \quad (2)$$

где  $j$  – номер слоя, лежащего на пути акустической волны, обусловленный тем, что акустическая волна в композиционных изделиях, как правило от излучателя до объекта проходит много слоев,  $\alpha_j(\omega)$  – коэффициент пропускания акустической волны при переходе от  $(j - 1)$  слоя к  $j$  слою, который описывается выражением:

$$\alpha_j = \frac{\rho_{j-1}}{\rho_j} = \frac{2\rho_j \lambda \cos \theta}{\rho_j \lambda \cos \theta + \rho_{j-1} \lambda \cos \theta_1}, \quad (3)$$

имеет периодический характер и хорошо проанализирован в [1],  $d_j$  – толщина слоя,  $\lambda$  – длина акустической волны,  $\beta_j(\omega)$  – коэффициент поглощения акустической энергии  $j$  –м слоем,  $J_0(\omega)$  – интенсивность акустической энергии на поверхности излучателя,  $\theta, \theta_1$  – углы падения и отражения акустической волны.

С учетом выражений (2) и (3) выражение (1) примет вид:

$$A_i(\omega) = k_i(\omega) \cdot \left\{ \prod_{j=1}^n \alpha_j(\omega) \right\} \exp \left\{ - \sum_{j=1}^n \beta_j(\omega) \cdot d_j \right\} J_0(\omega). \quad (4)$$

Введя подстановки:

$$a(\omega) = \left\{ \prod_{j=1}^n \alpha_j(\omega) \right\}, \quad b(\omega) = \exp \left\{ - \sum_{j=1}^n \beta_j(\omega) \cdot d_j \right\},$$

выражение (4) можно записать в виде:

$$A_i(\omega) = k_j(\omega) \cdot a_j(\omega) \cdot b_j(\omega) \cdot J_0(\omega). \quad (5)$$

Так как трансформация акустической энергии кристаллитами сегнетокерамики в электрический сигнал осуществляется в небольшом частотном интерва-

ле  $10 \div 200000$  Гц, то полагают [2; 4; 5], что  $b_j(\omega) = const$ . Это же допущение можно сделать для множителя  $a(\omega) = const$ , потому что при указанных частотах нелинейные процессы отражения нереальны [2; 4; 5].

Поделив выражение (5) на интенсивность ультразвука, падающую на связующий полимер  $J_0(\omega)$ , получим независимую функцию от условий прохождения акустических волн  $J_0(\omega)$  до связующего полимера активированного кристаллитами сегнетокерамики в виде:

$$A_j^{(H)}(\omega) = k_j(\omega) \cdot a_j \cdot b_j \quad (6)$$

Нормируя выражение (6), предварительно сделав его условно-дискретным, получим выражение, харак-

теризующее нормированный коэффициент трансформации связующим полимером в виде:

$$\frac{A_{ji}^{(H)} \cdot \Delta\omega}{\sum_{i=1}^n A_{ji}^{(H)} \cdot \Delta\omega} = \frac{k_{ji} \cdot \Delta\omega}{\sum_{i=1}^n k_{ji} \cdot \Delta\omega} = k_{ji}^{(H)} \quad (7)$$

Нормированный коэффициент трансформации является среднестатистической характеристикой диполя кристаллита сегнетодобавок, введенного в связующий полимер, величина которого зависит только от остаточных механических напряжений, действующих на него, и старения кристаллита (рис. 2). Так как старение кристаллита соизмеримо по времени с  $1,5 \cdot 10^8$  сек., то вклад старения в коэффициент корреляции весьма мал, о чем свидетельствуют экспериментальные результаты, приведенные на рис. 3.

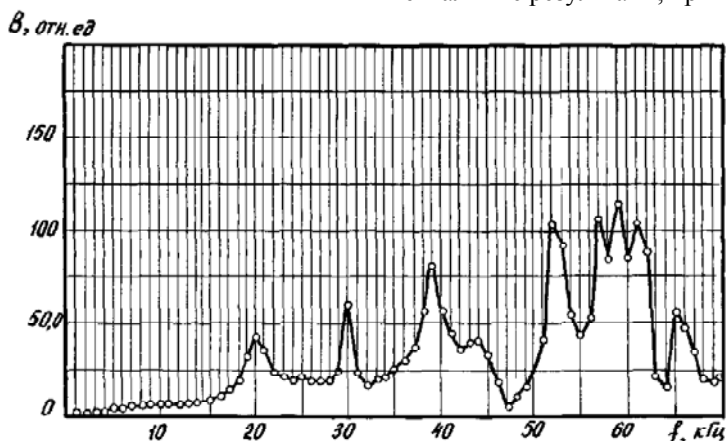


Рис. 2. Фурье образ коэффициента трансформации акустических волн в электромагнитные, полученные путем выделения передаточной функции и ее нормировки из ЭМИ изображенного на рис. 1

Сравнивая коэффициенты корреляции ЭМИ образцов и полученный нормированный коэффициент трансформации (7) в рассматриваемом частотном диапазоне, увидим, что данный математический прием позволил существенно повысить коэффициент корреляции между обработанным сигналом и адгезионной прочностью (рис. 3).

Метод выявления систематических ошибок, выделения передаточной функции и нормировки нашел широкое применение даже в далеких от неразрушающего контроля композиционных материалов отраслях науки, а именно в [5].

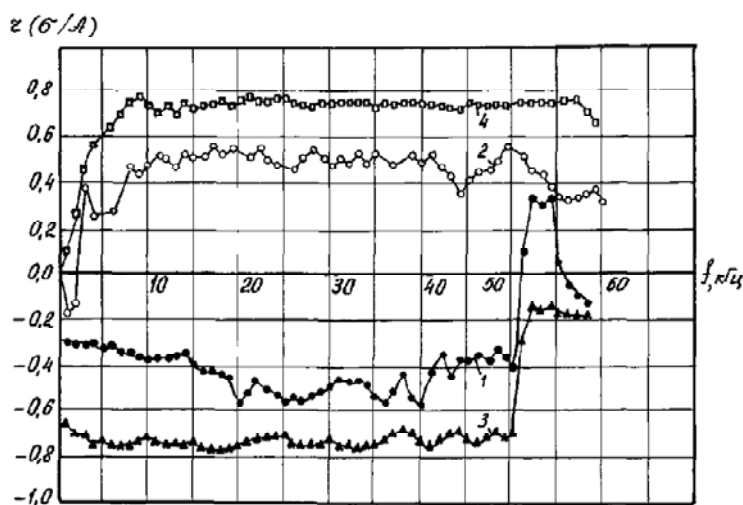


Рис. 3. Зависимость коэффициента корреляции между адгезионной прочностью и амплитудой ЭМИ в частотном диапазоне зондирующего сигнала (0 – 60 кГц) (1 – для клеевого соединения на основе эпоксидного полимера марки ЭД-5; 2 – для клеевого соединения на основе эластомера марки 88НЗ). Зависимость коэффициента корреляции между адгезионной прочностью и передаточной функцией (7) в частотном диапазоне зондирующего сигнала (0 – 60 кГц) (3 – для клеевого соединения на основе эпоксидного полимера марки ЭД-5; 4 – для клеевого соединения на основе эластомера марки 88НЗ)

**Литература**

1. Кузнецов, В. П. Способ контроля клеевых соединений композиционных изделий / В. П. Кузнецов. – А. с. 1439489 СССР, МКИ<sup>3</sup> П01Г 29/04. – 3 с.
2. Бреховских, Л. М. Волны в слоистых средах / Л. М. Бреховских. – М.: Наука, 1973. – 502 с.
3. Герасимович, А. И. Математическая статистика: уч. пос. для инж.-техн. и эконом. спец. вузов / А. И. Герасимович. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1983. – 279 с.
4. Кузнецов, В. П. Акустоэлектромагнитный метод неразрушающего контроля прочности клеевых соединений / В. П. Кузнецов, В. К. Кулешов, Ю. А. Фадеев // Современные проблемы науки и образования. – Режим доступа: [www.science-education.ru/100-5011](http://www.science-education.ru/100-5011) (дата обращения: 23.02.2013).
5. Кузнецов, В. П. Способ прогнозирования урожайности яровой пшеницы / В. П. Кузнецов, Е. П. Кондратенко, Л. Г. Пинчук. – Патент 2439873 РФ, МПК А01G 7/00. – 10 с.
6. Пугачев, В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления / В. С. Пугачев. – М.: Физматгиз, 1962. – 985 с.

**Информация об авторах:**

**Кузнецов Владимир Петрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры математики Кузбасского государственного технического университета, +7 905 068 5757, [vpk-51@mail.ru](mailto:vpk-51@mail.ru).

**Vladimir P. Kuznetsov** – Candidate of Technical Science, Assistant Professor at the Department of Mathematics, Kuzbass State Technical University.

**Невзоров Борис Павлович** – доктор педагогических наук, профессор кафедры современного естествознания КемГУ, 8 (384-2) 58-13-01.

**Boris P. Nevzorov** – Doctor of Pedagogics, Professor, Head of the Department of Modern Natural Science, Kemerovo State University.

**Фадеев Юрий Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики Кузбасского государственного технического университета, 8 (384-2) 39-63-18.

**Yuriy A. Fadeev** – Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Department of Mathematics, Kuzbass State Technical University.