

МЕСТО АКУСТОЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ АДГЕЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДЕФЕКТОСКОПИИ

Баумгартэн М.И.¹, Кузнецов В.П.², Кулешов В.К.³, Фадеев Ю.А.¹

¹КузГТУ, Кемерово;

²«НТК «Экология», Кемерово;

³НИ ТПУ, Томск

Рассмотрены неразрушающие методы контроля относительно входных и выходных видов воздействия на изделие (образец). Показано, что разнообразие методов приводит к некорректному пониманию сущности методов неразрушающего контроля, в особенности это касается методов комплексных или интегрированных. Рассмотрены некоторые комплексные методы, в основе которых лежат акустический, электрический и магнитный методы. Показано, что различные сочетания этих методов образуют комплексные методы для широкого поля исследований материалов методами неразрушающего контроля. Определен метод, наиболее подходящий для контроля прочностных свойств слоистых пластиков. В этом методе зондирующая энергия акустическая, содержащая как звуковые, так и ультразвуковые частоты. Сигнал отклика имеет электромагнитную энергию. Электромагнитная энергия возникает за счет трансформации акустической энергии частицами кристаллитов сегнетокерамики с помощью прямого пьезоэлектрического эффекта, которым они обладают и предварительно созданной из частиц когерентной кооперативной системы.

Ключевые слова: адгезионное соединение, композиционные материалы, методы неразрушающего контроля, акустические волны, упругие волны, электромагнитное излучение, эмиссия, прямой пьезоэлектрический эффект, когерентное кооперативное явление.

PLACE AKUSTOELEKTROMAGNITNOGO NONDESTRUCTIVE CONTROL ADHESIVE BONDING OF COMPOSITE MATERIALS IN TESTING

Baumgartèn M.I.¹, Kuznetsov V.P.², Kuleshov V.K.³, Fadeev Y.A.¹

¹ FGBOU VPO "Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev", Kemerovo, Russia (Kemerovo, 650000, Vesennajaj, 28);

² NTK «Ecology», Kemerovo, e-mail: vpk-51@mail.ru;

³ National Research «Tomsk Polytechnic University», Tomsk, Russia, (Tomsk, 634050, Lenin A., 30)

Considered non-destructive inspection methods for input and output types of actions on the product (sample). The diversity of methods leads to an incorrect understanding of the essence of NDT methods, especially with respect to complex methods or integrated. Discusses some complex methods, which are based on acoustic, electric and magnetic methods. It is shown that various combinations of these techniques form a complex methods for a wide field of materials research NDT methods. Determined the most suitable method for monitoring the strength properties of the laminates. In this method, the energy of the acoustic probe containing both audio and Ultrasonic frequency. The response signal is electromagnetic energy. Electromagnetic energy is due to the transformation of acoustic energy particles ferroelectric crystallites using direct piezoelectric effect, which they have previously created and particle coherent cooperative system.

Keywords: adhesive joint, composite materials, methods of nondestructive testing, acoustic waves, elastic waves, electromagnetic radiation emission, the direct piezoelectric effect, coherent cooperative phenomenon.

Появлению данной статьи способствовал ряд факторов, которые объясняются сложностью объективной действительности, многоаспектностью толкования научных терминов, философского осмысления полученных в ходе экспериментов результатов.

Прежде всего, поясним, что целью работы является определение места рассматриваемого метода среди инструментария науки. В то же время развитие научных знаний заставляет нас уточнять определения известных понятий и при необходимости создавать новые.

Новое понятие – это «мысль, отражающая в обобщенной форме предметы и явления действительности и существенные связи между ними посредством фиксации общих и специфических признаков, в качестве которых выступают свойства предметов и явлений и отношения между ними» [8, с. 494].

Учитывая разнообразие философских подходов к понятию «метод», примем следующее определение: «метод – способ построения и обоснования системы философского и научного знания; совокупность приемов и операций практического и теоретического освоения действительности» [8, с. 358]. Рассмотрим систему «субъект – объект – прибор». В соответствии с принятым в научном сообществе конвенциональным подходом, субъектом науки является ученый-исследователь, коллектив лаборатории, само научное сообщество.

Объектом науки является та область деятельности, в которой работает субъект науки. В рассматриваемом случае областью деятельности является дефектоскопия, а именно: **неразрушающий контроль (НК)**. Широко известно, что дефектоскопия это: совокупность неразрушающих методов контроля материалов, использующихся для обнаружения нарушений однородности макроструктуры, отклонений химического состава и т.п. Кроме того, различают ультразвуковую, инфракрасную, люминесцентную капиллярную дефектоскопии, а также рентгено-, гамма-, термо- дефектоскопии.

Сопоставление методов неразрушающего контроля между собой нужно проводить с учетом следующих обстоятельств. **Во-первых**, многие из описанные выше методов НК применимы для контроля только определенных типов материалов: радиоволновой – для неметаллических, плохо проводящих ток материалов; вихретоковый – для хороших проводников электрического тока; магнитный – для ферромагнетиков; акустический – для материалов, обладающих небольшим затуханием звуковых волн соответствующей частоты; оптический – хорош для объемного контроля прозрачных в световом диапазоне объектов контроля. **Во-вторых**, следует иметь в виду различия в модификации методов в зависимости от их предназначения: измерение геометрических размеров, исследование химического состава и структуры, поиск объемных или поверхностных дефектов и т.д. Ограничим область деятельности тем, что предметом исследования выберем неметаллы (предметом исследования дефектоскопии могут быть как металлы, так и неметаллы). Сузим еще эту область, рассматривая лишь прочностные свойства слоистых пластиков. Таким образом, сравнивая акустоэлектромагнитный метод [2] с остальными, из дальнейшего рассмотрения исключим такие методы НК, как: магнитный, вихретоковый, оптический, оставив акустический, радиоволновой и электрический как методы имеющие мало общего с рассматриваемым.

Здесь, однако, надо расставить точки над *i*. Прежде всего, необходимо понять суть указанных видов НК. Кроме того, терминология многих методов включает в себя слово

«электромагнитный». Это может относиться как к методу, так и к тому, что в методе применяется электромагнитная волна. Такие же соображения отнесем к слову «электромагнитный», понимая его как комплексный метод, использующий два метода: электрический и магнитный. В литературе встречаются оба варианта. Следует также уточнить разницу между «электромагнитный» и «радиоволновой». Более широкое понятие – это «электромагнитный», т.к. в соответствии со шкалой электромагнитных волн радиоволны входят в нее. Диапазон электромагнитных волн составляет от 0 до $3 \cdot 10^{22}$ Гц, а радиоволн от $3 \cdot 10^3$ Гц до $3 \cdot 10^{12}$ Гц. Таким образом, говоря «электромагнитный», мы подразумеваем весь диапазон, а «радиоволновой» – лишь его часть.

Особый интерес представляет соотношение между понятиями «электромагнитная волна» и «упругая волна». Вот некоторые определения (взяты из общеизвестных учебников и нормативной литературы):

упругая волна; акустическая волна (elastic wave, acoustic wave)

1) распространяющиеся в среде упругие колебания; 2) передача энергии через упругую среду с помощью колебаний ее частиц;

ультразвуковая волна (ultrasonic wave) – упругая волна, частота которой превышает порог слышимости человеческого уха (обычно выше 20 кГц);

звуковая волна (audio-frequency wave, sonic wave) – упругая волна, частота которой лежит в звуковом диапазоне (условно от 16 Гц до 20 кГц).

Упругие волны – упругие возмущения, распространяющиеся в твердой, жидкой и газообразных средах, (например, волны, возникающие в земной коре при землетрясениях, звуковые и ультразвуковые волны в жидкостях, газах и твердых телах). При распространении упругой волны возникают механические деформации сжатия и сдвига, которые переносятся волной из одной точки среды в другую. В справочниках по физике: **упругими**, или механическими, волнами называются механические возмущения (деформации), распространяющиеся в упругой среде. **Звуковыми**, или **акустическими**, волнами называются упругие волны малой интенсивности, т.е. слабые механические возмущения, распространяющиеся в упругой среде.

Электромагнитные волны – это электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью (БСЭ). **Электромагнитные волны** – это электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью, зависящей от свойств среды. Электромагнитной волной называют распространяющееся электромагнитное поле (Большая энциклопедия Кирилла и Мефодия). **Электромагнитная волна** – волна, порожденная колебанием параметра электромагнитного поля. В зависимости от длины волны в вакууме, источника излучения и способа возбуждения различают:

низкочастотные колебания, радиоволны, инфракрасное излучение, видимое излучение, ультрафиолетовое излучение, рентгеновское излучение, гамма-лучи.

Таким образом, акцентируем наше внимание на следующем. Электромагнитная волна есть распространяющееся электромагнитное поле. Упругая волна есть упругое возмущение среды. Общими для них являются характеристики волны: частота, длина, интенсивность, амплитуда и т.п. Если мы говорим о звуковых или ультразвуковых волнах, то должны уточнить: идет ли речь об электромагнитных или упругих волнах. Следует отметить, что упругие волны также подразделяются на диапазоны частот: инфразвук (менее 16 Гц), слышимый звук (от 16 Гц до 20 кГц), ультразвук (от 20 кГц до 1 ГГц) и гиперзвук (более 1 ГГц).

Рассматривая различные методы НК, следует учитывать вышеприведенные уточнения. Приведем общеизвестные определения вышеуказанных методов НК.

А. **Под акустическим видом НК** понимают вид, основанный на регистрации параметров упругих колебаний, возбуждаемых и (или) возникающих в контролируемом объекте. В акустическом виде НК чаще всего применяют звуковые и ультразвуковые частоты, т.е. используют диапазон частот приблизительно от 0,5 кГц до 30 МГц. В случае, когда при контроле используют частоты свыше 20 кГц, допустимо применение термина «ультразвуковой» вместо термина «акустический». Главная отличительная особенность данного вида состоит в том, что в нем применяют и регистрируют не электромагнитные, а упругие волны, параметры которых тесно связаны с такими свойствами материалов, как упругость, плотность, анизотропия (неравномерность свойств по различным направлениям) и др.

Акустический вид НК имеет различные методы: по характеру взаимодействия упругих колебаний с контролируемым материалом – прошедшего излучения (теневого, зеркально-теневого), отраженного излучения (эхо-импульсный), резонансный, импедансный, свободных колебаний, акустико-эмиссионный; по характеру регистрации первичного информативного параметра – амплитудный, частотный, спектральный.

Приведем некоторые определения из [2].

4.7.1. Акустический метод (*Acoustic method*): В широком смысле: метод неразрушающего контроля, использующий упругие (акустические) колебания и волны звуковых и ультразвуковых частот (от 0 до 1 ГГц). В узком смысле (*sonic method*): метод неразрушающего контроля, использующий упругие колебания и волны звуковых (иногда и низких ультразвуковых) частот.

4.7.2. Ультразвуковой метод (*Ultrasonic method*) – акустический метод, использующий упругие колебания и волны ультразвуковых частот (более 20 кГц).

4.7.27. Импедансный метод (*Mechanical impedance analysis method, MIA method*) – метод, основанный на возбуждении в объекте контроля упругих колебаний и анализе изменений

механического импеданса участка поверхности этого объекта. Применяется для дефектоскопии соединений в многослойных конструкциях.

9.5. *Акустико-эмиссионный метод (Acoustic emission method)* – метод диагностики, неразрушающего контроля, испытаний, основанный на анализе параметров упругих волн акустической эмиссии.

9.6. *Акустико-ультразвуковой метод (Acousto-ultrasonics)* – метод неразрушающего контроля, в котором используется влияние дефектов на параметры введенных в контролируемый объект волн и анализируются их параметры после распространения волн в объекте средствами АЭ контроля.

Б. **Электрический вид НК** основан на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с контролируемым объектом (собственно электрический метод), или поля, возникающего в контролируемом объекте в результате внешнего воздействия (термоэлектрический метод). Он применяется для контроля диэлектрических и проводящих материалов. Методы электрического контроля (электростатический порошковый, термоэлектрический, электроискровой, электрического потенциала, емкостной) позволяют определять дефекты различных материалов, измерять толщины стенок, покрытий и слоев, сортировать металлы по маркам, контролировать диэлектрические или полупроводниковые материалы. Недостатками перечисленных методов электрического НК являются необходимость контакта с объектом контроля, жесткие требования к чистоте поверхности изделия, трудности автоматизации процесса измерения и зависимость результатов измерения от состояния окружающей среды.

Электрические методы основаны на создании в контролируемом объекте электрического поля либо непосредственным воздействием на него электрическим возмущением (например, электростатическим полем, полем постоянного или переменного стационарного тока), либо косвенно с помощью воздействия возмущениями неэлектрической природы (например, тепловым, механическим и др.). В качестве первичного информативного параметра используются электрические характеристики объекта контроля. К некоторым электрическим методам неразрушающего контроля относятся [11]:

Электроемкостный метод контроля (ЭМК) предусматривает введение объекта контроля или его исследуемого участка в электростатическое поле и определение искомых характеристик материала по вызванной им обратной реакции на источник этого поля. В качестве источника поля применяют электрический конденсатор, который является одновременно и первичным электроёмкостным преобразователем (ЭП), так как осуществляет преобразование физических и геометрических характеристик объекта контроля в электрический параметр. Обратная реакция ЭП проявляется как изменение его интегральных параметров, чаще

всего двух параметров, из которых один характеризует «емкостные» свойства ЭП, а другой – диэлектрические потери (например, емкость и тангенс угла потерь – составляющие комплексной проводимости). Эти параметры являются первичными информативными параметрами ЭМК.

В практике неразрушающего контроля находят применение **приборы, работа которых основана на регистрации искажения силовых линий вектора плотности тока**, обусловленного дефектом. Приборами регистрируется поперечная составляющая вектора плотности тока, которая в бездефектном участке изделия отсутствует.

Для контроля сплошности диэлектрических покрытий (эмаль, стекло, эпоксидная смола) на внутренней поверхности труб применяют **электроискровые приборы**. Работа основана на электроискровом пробое дефектных мест в диэлектрическом покрытии высоким выпрямленным напряжением. Контроль осуществляется с помощью сменных электроискровых головок, вставленных в трубу на металлической штанге.

В. Радиоволновой вид НК неразрушающего контроля основан на регистрации изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с объектом контроля. Обычно используются волны сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона с длиной от 1 мм до 100 мм. Контролируют изделия из материалов, где радиоволны не очень сильно затухают: диэлектрики (пластмассы, керамика, стекловолокно), магнитодиэлектрики (ферриты), полупроводники, тонкостенные металлические объекты. По характеру взаимодействия с объектом контроля различают методы прошедшего, отраженного, рассеянного излучения и резонансный. При использовании этого вида контроля наличие дефектов в исследуемых изделиях приводит к появлению дополнительных отражений электромагнитного поля, которые изменяют интерференционную картину и вызывают дополнительные потери энергии. Этот метод применяется в дефектоскопии диэлектриков, а также при исследовании состояния поверхности проводящих тел. Недостатком СВЧ метода является сравнительно низкая разрешающая способность устройств, реализующих этот метод, обусловленная малой глубиной проникновения радиоволн в металлы. Исходя из вышперечисленного, можно рассмотреть вариации на тему сочетания различных методов НК, встречающихся в литературе. К ним отнесем следующие:

- | | |
|--------------------------|---------------------------------|
| 1) электроакустический; | 7) акустоэлектромагнитный; |
| 2) акустоэлектрический; | 8) акустомагнитоэлектрический; |
| 3) магнитоакустический; | 9) магнитоэлектроакустический; |
| 4) акустомагнитный; | 10) магнитоакустоэлектрический; |
| 5) электромагнитный; | 11) электроакустомагнитный; |
| 6) магнитоэлектрический; | 12) электромагнитоакустический. |

Исключим из списка методы, не имеющие акустическую составляющую (№ 5 и 6), и уделим основное внимание физической стороне оставшихся методов.

Таблица 1. Характеристики близких методов неразрушающего контроля*

№	Метод	Механизм	Область
1	электроакустический	метод преобразования электрической энергии в акустическую посредством специальных преобразователей	контроль за состоянием изоляции трансформатора [7]
2	акустоэлектрический	преобразование энергии механического возбуждения в энергию электромагнитного поля	обнаружения низко летящих целей; определение пористости материалов
3	магнитоакустический	метод, сущность которого заключается в регистрации характерных гидроакустических сигналов, создаваемых объектами поиска при воздействии на них намагничивающим полем	поиск металлических объектов в водной среде
4	акустомагнитный	основан на зондировании структуры магнитного коллоида ультразвуковым импульсным методом и использовании акустомагнитного эффекта, при длительном воздействии постоянного магнитного поля с последующим вращением его; акустическая волна вызывает реакцию у магнитной метки	магнитные жидкости; антикражные системы [9]
7	акустоэлектромагнитный	активация адгезива сегнетодобавками, стимулируемыми акустическими волнами и остаточными напряжениями и преобразующие механическую энергию в электромагнитную	слоистые пластики [3,4]
8	акустомагнитоэлектрический	нет информации	–
9	магнитоэлектроакустический	объединение методов электроразведки с магнитоакустическими измерительными устройствами	пористая среда, насыщенная электролитом
10	магнитоакустоэлектрический	нет информации	–
11	электроакустомагнитный	метода нет, есть эффект	–
12	электромагнитоакустический	метод НК, основанный на регистрации акустических волн после взаимодействия с контролируемым объектом с помощью вихретокового преобразователя	Металлы [6]
13	электромагнитно-эмиссионный (вариант 2)	объект облучают лазерным лучом наносекундной длительности, создавая мощные импульсные механические напряжения, которые стимулируют в объекте электромагнитные импульсы	диэлектрики, керамика, бетон, стекло [10]
14	электромагнитно-эмиссионный (вариант 1)	механически, вплоть до разрушения, нагружают изделие (образец), приводящее к изменению его структурной целостности, и регистрируют количество электромагнитных импульсов	диэлектрики, керамика, стекла [1]

*Примечание: приведенные ссылки не охватывают все работы по указанным методам.

Читатель может найти их в соответствующей литературе, диссертационных работах или в Интернете.

Как видно из таблицы, следует различать методы: «электроакустомагнитный метод» и «электромагнитоакустический метод».

Отметим работы [1,5,10]. В [5] автор указал свою работу как «Обнаружение объектов в укрывающихся средах акусто-электромагнитным методом» (автореферат диссертации). Однако в тексте автореферата далее фигурирует «электромагнитно-акустический метод». Идея метода заключается в использовании в качестве зондирующего сигнала электромагнитного поля, а в качестве дополнительного «подсвечивающего» – акустические колебания. При помощи радиотехнического комплекса измеряется рассеянное объектом поле, сформированное поверхностным смещением при воздействии на объект возбуждающих акустических волн. Метод разработан для обнаружения металлических и диэлектрических объектов типа тонкостенных труб и кабелей.

В работе [10] («Электромагнитно-эмиссионный метод контроля качества диэлектрических и композиционных материалов при ультразвуковом нагружении изделий») предложен метод, который можно отнести к акустоэлектромагнитным методам, так как зондирующим сигналом является наносекундный импульс лазера. Этот импульс возбуждает мощные импульсы упругих волн в изделии (образце). Однако упругие импульсы генерируются такой мощности, чтобы попасть в зону нелинейных деформационных процессов, что равносильно разрушению изделия. При этом на дефектах образуются микротрещины, генерирующие электромагнитные импульсы. По количеству импульсов судят о прочности изделия. Метод условно можно отнести к неразрушающему методу, который также относится к акустоэлектромагнитному методу, но авторы решили в названии выделить электромагнитную эмиссию.

В работе [1] («Контроль разрушающих нагрузок силикатных стекол методом регистрации электромагнитного сигнала») авторы указывают основные признаки метода: электромагнитная эмиссия под действием разрушающих механических нагрузок. Поэтому метод отнести к неразрушающим нельзя.

Выводы:

1. В рассматриваемом методе первичным воздействием на изделие являются упругая волна, содержащая как звуковые, так и ультразвуковые волны. Интенсивность этих воздействий находится в линейной зоне закона Гука.
2. Отклик изделия на акустическое воздействие в виде электромагнитного излучения с неизменным частотным диапазоном, и соответствует остаточным напряжениям в изделии.
3. Превращение акустической энергии в электромагнитную происходит на основании прямого пьезоэлектрического эффекта от когерентной кооперативной системы частиц кристаллитов сегнетокерамики, модифицирующей клеящий.

4. Таким образом, наиболее полно отражает физическую сущность метода в названии сочетание акустических и электромагнитных энергий, а прямой пьезоэлектрический эффект и когерентное кооперативное явление остаются за кадром.

Список литературы

1. Воробьев А.А. Контроль разрушающих нагрузок силикатных стекол методом регистрации электромагнитного сигнала / А.А. Воробьев, В.П. Дмитриев, В.А. Смирнов и др. // Стекло и керамика. – 1982. – № 10. – С.10-11.
2. Госгортехнадзор РФ. Серия 28. Неразрушающий контроль. Вып. 4. Система неразрушающего контроля. Виды (методы) и технология неразрушающего контроля. Термины и определения// Справочное пособие. – М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2003. – 256 с.
3. Кузнецов В.П. Акустоэлектромагнитный метод контроля прочности клеевых соединений: Дис. канд. техн. наук. /25.12.89/ Томский политехнический институт. - Томск, 1989. – 155 с. Режим доступа: <http://yadi.sk/d/CqmWANyeFZnvS>. (дата обращения 19.01.2014).
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. – 2011. – № 6; URL: www.science-education.ru/100-5011 (дата обращения: 19.01.2014).
5. Кучин С. В. Обнаружение объектов в укрывающих средах акусто-электромагнитным методом: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.12.04/. Владимир: Владимирский гос. ун-т. им. Столетовых, 2011. 18 с. Режим доступа: <http://www.referun.com/n/obnaruzhenie-obektov-v-ukryvayuschih-sredah-akusto-elektromagnitnym-metodom> (дата обращения: 19.01.2014).
6. Современные возможности ЭМА дефектоскопии (1 часть -Возможности ЭМА способа в неразрушающем контроле). Режим доступа: <http://ndt.at.ua/publ/> (дата обращения: 19.01.2014).
7. Султанов Б. Электроакустический метод и устройство контроля состояния изоляции трансформаторов: Дис. канд. техн. наук: 05.11.13/ Ташкент. - 1983. 202с. Режим доступа: <http://www.lib.ua-ru.net/diss/cont/167954.html> (дата обращения: 19.01.2014).
8. Философский энциклопедический словарь/ редкол.: С.С. Аверинцев, Э. А. Араб-Оглы и др. – 2-е изд. – М.: Сов. энциклопедия, 1989. – 815 с.
9. Фурса Т.В. Разработка акустоэлектрического метода определения пористости диэлектрических материалов / Т.В. Фурса, А.П. Суржиков, К. Ю. Осипов // Дефектоскопия. – 2007. – № 2. – С.27-34.

10. Чахлов В.Л. Электромагнитно-эмиссионный метод контроля качества диэлектрических и композиционных материалов при ультразвуковом нагружении изделий / В.Л. Чахлов, В. И. Симанчук, А. В. Каргапольцев // Дефектоскопия. – 1993. – № 11. – С.3-10.
11. Электрические методы и средства контроля. Режим доступа: http://www.welding.su/library/kontrol/kontrol_114.html (дата обращения 19.01.2014).

Рецензенты:

Смирнов А.Н., д.т.н., профессор, директор ООО «Кузбасский центр сварки и контроля» г. Кемерово.

Иванов В.В., д.т.н., профессор кафедры теоретической и геотехнической механики КузГТУ, г. Кемерово.