

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В КОМПОЗИТНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ В УСЛОВИЯХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОМ МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

**Суржиков В.П.<sup>1</sup>, Хорсов Н.Н.<sup>1</sup>**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия (634050, г. Томск, проспект Ленина, 30), iva1954@mail.ru*

**В работе исследованы возможности использования метода механоэлектрических преобразований для неразрушающего контроля структурных неоднородностей композитных диэлектрических материалов в условиях ступенчатого одноосного сжатия. Для проведения исследований использовалась аппаратура, позволяющая накапливать полезный сигнал путем многократного механического возбуждения объекта контроля короткими импульсами заданной формы на каждой ступени нагружения. В качестве объекта контроля был использован образец из эпоксидной смолы с песчаным наполнителем. На каждом фиксированном уровне нагрузки при помощи платы сбора информации усиливались и оцифровывались временные зависимости откликов, зарегистрированные емкостным приемником. С использованием ЭВМ производилось усреднение временных реализаций откликов. По временным усредненным реализациям откликов и их спектрам при разных нагрузках проведен сравнительный анализ. Результаты исследования показали, что метод механоэлектрических преобразований чувствителен к структурным неоднородностям композитных диэлектрических материалов в условиях их напряженно-деформированного состояния.**

**Ключевые слова:** механоэлектрические преобразования, структурные неоднородности, напряженно-деформированное состояние, композитные диэлектрические материалы.

## **STUDY OF STRUCTURE HETEROGENEITIES IN COMPOSITE DIELECTRIC MATERIALS UNDER DEFLECTED MODE BY THE MECHANOELECTRICAL TRANSFORMATIONS METHOD**

**Surzhikov V.P.<sup>1</sup>, Khorsov N.N.<sup>1</sup>**

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30), iva1954@mail.ru*

**We investigated the possibility of using the mechanoelectrical transformations method for non-destructive testing of structure heterogeneities in composite dielectric materials under uniaxial compression step. It was used equipment, allowing accumulating the useful signal by repeated mechanical excitation of the object control with the short pulses of predetermined form at each stage of loading. As the object of the control sample was used of an epoxy resin with a sand-filled. At each fixed load level by means of gathering information boards it were amplified and digitized time dependences of responses registered capacitive receiver. With the use of computer series realizations were averaged. By averaging responses series realizations and their spectra at different loads it was conducted the comparative analysis. The results showed that the mechanoelectrical transformations method is sensitive to changes structure heterogeneities in composite dielectric materials under deflected mode.**

**Keywords:** mechanoelectrical transformations, structure heterogeneities, deflected mode, composite dielectric materials.

В настоящее время весьма актуальной является проблема неразрушающего контроля конструкционных материалов, подвергающихся механическим нагрузкам, поскольку дефекты и изменения структуры материала, возникающие в процессе эксплуатации изделий, могут существенно уменьшить их прочность. Поэтому особое значение имеет разработка оперативных неразрушающих методов диагностики, позволяющих контролировать локальные изменения структуры материала при эксплуатации изделий.

Одним из наиболее распространенных методов неразрушающей диагностики структуры непрозрачных конструкционных материалов является ультразвуковой метод. Он основан на

анализе характеристик ультразвуковых волн, распространяющихся в объекте контроля (ОК). В частности, для исследования неоднородностей и дефектов структуры материалов применяются методы ультразвуковой спектроскопии и дефектоскопии, основанные на анализе частотных зависимостей коэффициента затухания и фазовой скорости акустических волн в исследуемом материале [1,2]. По измерениям фазовых скоростей акустических волн в широком частотном диапазоне производится расчет упругих модулей твердых тел, в частности, анизотропных композиционных материалов [3,4] и по их изменениям судят о степени структурных нарушений.

В последнее время для неразрушающего контроля композитных диэлектрических материалов все большее применение получает метод механоэлектрических преобразований (МЭП) [6,7,9]. Суть метода заключается в следующем.

Объект исследования возбуждается короткими механическими импульсами, в результате чего в нем возникает бегущая акустическая волна, которая, распространяясь по материалу, отражаясь от границ и претерпевая искажения, связанные с его внутренней дефектностью и неоднородностью, воздействует на источники МЭП. При этом возникает переменное электромагнитное поле, которое можно регистрировать приемниками его электрической или магнитной составляющей. Источниками МЭП в диэлектрических материалах могут быть двойные электрические слои на границе раздела неоднородных материалов, либо включения, обладающие пьезоэлектрическими свойствами. По принципу действия метод МЭП близок к ультразвуковому методу реверберации, в котором полезный сигнал формируется при многократном отражении от границ ОК.

Разработана модификация метода МЭП в виде мультисенсорной системы контроля [8], которая позволяет повысить отношение сигнал/шум за счет многократного возбуждения ОК при неизменной геометрии системы: источник возбуждения – ОК – приемник сигнала при условиях неизменности внутренней структуры, а также осуществлять синхронную регистрацию емкостными приемниками откликов в разных точках ОК.

В качестве источника механического возбуждения используется пьезоэлектрический преобразователь, на который с помощью высокостабильного генератора подается серия электрических импульсов заданной формы.

Электрические отклики формируются на емкостных приемниках, выполненных в виде металлических пластин, расположенных вблизи одной из сторон ОК. Сигналы с пластин усиливаются, оцифровываются и поступают в базу данных ЭВМ для дальнейшей обработки. Путем синфазного сложения временных реализаций серии откликов рассчитываются их средние значения.

В методе МЭП для реализации ревербераций верхний частотный диапазон импульсного возбуждения ограничивается уровнем, выше которого частотное затухание акустической волны становится соизмеримым с толщиной ОК.

Характерные размеры неоднородностей структуры конструкционных материалов лежат в диапазоне от единиц до сотен микрометров [5]. Минимальная же длина волны акустического возбуждения в методе МЭП при толщине ОК 100 мм и скорости звука в материале порядка 2000 м/с лежит в пределах 10 мм. Поэтому эффективность взаимодействия акустической волны импульсного возбуждения плохо со структурными неоднородностями невысока. Однако за счет того, что акустическая волна многократного проходит через неоднородности ОК деформации акустического поля накапливаются, что может заметным образом сказаться на форме отклика.

Целью настоящей работы является оценка возможности использования метода МЭП для контроля структурных изменений в композитных диэлектрических материалах в условиях их напряженно-деформированного состояния.

### **Проведение эксперимента**

Образец для эксперимента с размерами  $60 \times 78 \times 92 \text{ mm}^3$  был изготовлен из эпоксидной смолы с наполнением в виде песка, содержащего кварц. Его помещали в пресс и подвергали ступенчатому одноосному вертикальному сжатию на испытательной машине МИС – 500К. Величина ступеньки составляла примерно 4 МПа. Пьезоэлектрический преобразователь крепился к боковой грани образца. Вблизи противоположной грани на расстоянии 10 мм параллельно ей размещалась пластина емкостного приемника сигнала. На каждой ступеньке давления образец возбуждали серией из 140 импульсов заданной формы с интервалом следования 7 мс. Временная реализация откликов регистрировалась с помощью платы сбора информации NI PCI – 6133. Отклики временной реализации каждой серии усреднялись. Для оценки надежности различий в откликах при разных нагрузках на образец рассчитывались также среднеквадратичные отклонения в каждой точке временной выборки. Частотный диапазон импульса возбуждения составлял (50 – 125) кГц. Разрушение образца наступило при нагрузке 85 МПа.

### **Анализ полученных результатов**

Для анализа полученных результатов все рассчитанные средние значения реализаций откликов (далее откликов) были приведены к моменту возбуждения. Затем были получены разности откликов при разных нагрузках относительно отклика при нагрузке 4.2 МПа.

На рис. 1 отображены сигналы при различных нагрузках и разностные сигналы. Как видно из рисунка 1а формы сигналов откликов по мере увеличения нагрузки изменяются. Это свидетельствует о влиянии на отклики неоднородностей, обусловленных напряженно-

деформированным состоянием. На рис. 2б приведены отклик (1) при начальной нагрузке в качестве опорного для оценки масштабов разностных сигналов откликов. Из графиков (2, 3, 4) на рис. 1б видно, что разностные сигналы откликов до временного значения 50 мкс близки к нулю. Это свидетельствует о малом влиянии структурных неоднородностей, возникающих под действием нагрузки, на акустическую волну возбуждения при однократном ее прохождении через образец. При последующих прохождениях акустической волны возбуждения через зоны структурных неоднородностей их влияние возрастает, что сказывается на разностных сигналах.

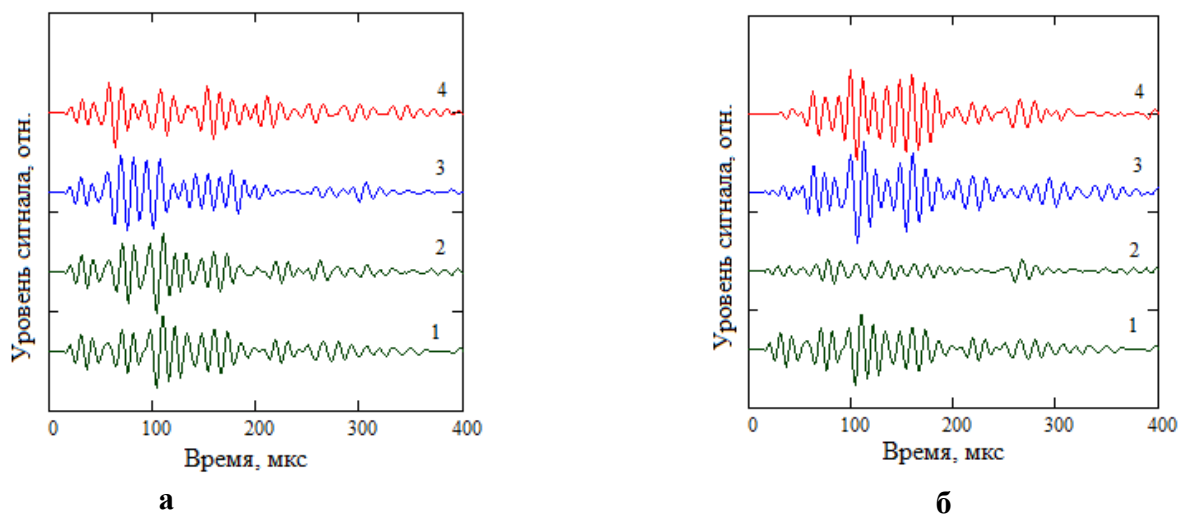


Рис.1. Отклики при нагрузках 4.2 МПа (1), 8.4 МПа (2), 42 МПа (3), 65 МПа (4) (а). Отклик при нагрузке 4.2 МПа (1), разностные сигналы при нагрузках 8.4 МПа (2), 42 МПа (3), 65 МПа (4) относительно сигнала при нагрузке 4.2 МПа (б).

Из разностной зависимости (2) на рисунке 1б видно, что при изменении нагрузки на величину 4.2 МПа относительно начальной разностный отклик формируется за счет локальных фазовых сдвигов временных реализаций, так как формы сигналов откликов при нагрузках 4.2 МПа и 8.4 МПа практически совпадают (рис. 1а (1) и (2) соответственно). При росте нагрузки разностные сигналы обусловлены как фазовыми сдвигами, так и изменением формы сигналов откликов. При этом фазовые сдвиги достигают таких значений, при которых разностный сигнал становится больше исходных.

Для оценки частотного затухания сигналов откликов за счет структурных неоднородностей были рассчитаны спектральные характеристики откликов при различных нагрузках.

На рис. 2 показаны амплитудно-частотные характеристики сигналов откликов при выборочных нагрузках.

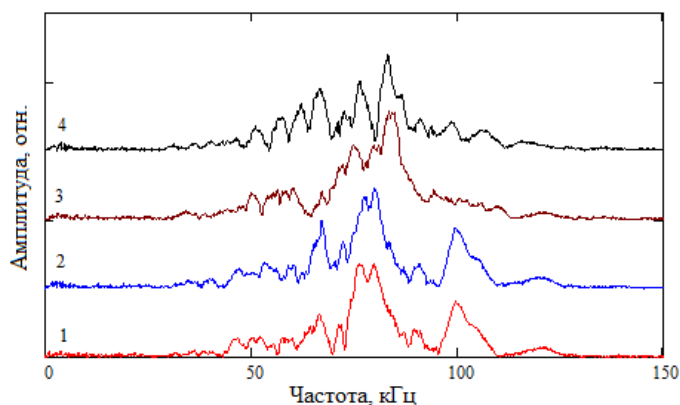


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики откликов при нагрузках 4.2 МПа (1), 8.4 МПа (2), 42 МПа (3) и 65 МПа (4).

Как следует из рис. 2 (1, 2), при малых нагрузках на образец 4.2 и 8.4 МПа в спектрах присутствует высокочастотная составляющая с максимумом 100 кГц. При более высоких нагрузках эта высокочастотная составляющая практически исчезает (кривые 3, 4). Это может свидетельствовать о процессах рассеяния высокочастотных составляющих на структурных неоднородностях. Кроме того, заметна «изрезанность» АЧХ при нагрузке 65 МПа. Такая изрезанность наблюдается на АЧХ отклика и при более высоких нагрузках. Это может свидетельствовать о дифракционных процессах на структурных неоднородностях при многократном прохождении акустических волн по образцу.

Структурные неоднородности, возникающие в материале под действием механических нагрузок, обусловлены обратимыми процессами за счет упругих составляющих напряженно-деформированного состояния, а также необратимыми, в число которых входят пластическая деформация, а также дефекты в виде микротрещин.

Для выделения необратимых изменений в образце при заданной нагрузке был произведен следующий эксперимент. Образец был подвергнут начальному одноосному сжатию давлением 1.3 МПа. Затем нагрузку на образец довели до уровня 12.8 МПа и снова его разгрузили до начального давления (возвратная нагрузка). На всех этапах нагружения - разгрузки были получены отклики по описанной выше процедуре.

На рис. 3 показаны разностные сигналы между откликами при нагрузках 12.8 МПа и начальной нагрузке (1), а также между откликами при начальной и возвратной нагрузках 1.3 МПа (2).

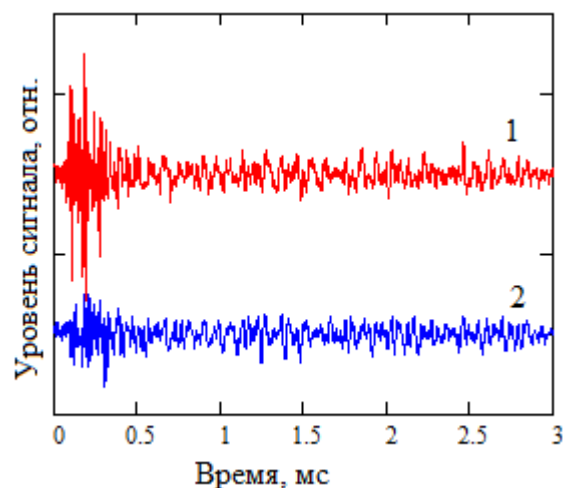


Рис. 3. Разностные сигналы откликов при нагрузках 12.8 МПа и начальной 1.3 МПа (1).

Разностные сигналы откликов при начальной и возвратной нагрузках 1.3 МПа (2).

Как видно из кривых на рис.1 уровень сигнала 2 существенно ниже уровня сигнала 1 на интервале времени от 0 до 0.5 мс. Расчет показал, что энергетические соотношения сигналов 2 и 1 на указанном интервале равно 0.22. Это свидетельствует о том, что основной вклад в изменение отклика при нагрузке 12.8 МПа вносят упругие деформации.

### **Заключение**

Проведенные исследования показали, что метод механоэлектрических преобразований может быть использован для контроля структурных неоднородностей в композитных диэлектрических материалах в условиях напряженно-деформированного состояния.

*Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука».*

### **Список литературы**

1. Алымов В.Т., Буров А.Е., Кокшаров И.И., Москвичев В.В. Применение методов неразрушающего контроля для обнаружения макроскопических дефектов в волокнистом композиционном материале. // Заводская лаборатория. – 2001.- № 10.- С. 26-29,.
2. Велев Г.С., Латковски В.В. Метод исследования материалов ультразвуком. Электронный журнал «Техническая акустика», URL: <http://ejta.org>, 2003, 11 (дата обращения: 19.09.14).
3. Карабутов А.А., Керштейн И.М., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б. Распространение продольных и сдвиговых акустических видеоимпульсов в графито-эпоксидных композитах. // Акустич. журн.- 1999. - Т. 45, №. 1.- С. 86-91.

4. Карабутов А.А. Кобелева Л.И., Подымова Н.Б., Чернышова Т.А. Лазерный оптико-акустический метод локального измерения упругих модулей композиционных материалов, упрочненных частицами. Электронный журнал «Техническая акустика» URL: <http://www.ejta.org>. 2008, 19 (дата обращения: 19.09.14).
5. Меркулов Л. Г. Исследование рассеяния ультразвука в металлах. // ЖТФ. – 1956. - Т. 26, № 1.- С. 64-75.
6. Суржиков А.П., Фурса Т.В., Хорсов Н.Н. К вопросу о механизме механоэлектрических преобразований в бетонах. // ЖТФ. - 2001.- Т. 71, № 1. - С. 57-61.
7. Суржиков В.П., Хорсов Н.Н., Хорсов П.Н. Влияние объемной дефектности на пространственно-временные характеристики электромагнитного отклика при акустоэлектрических преобразованиях в диэлектрических образцах // Дефектоскопия. – 2012. - №. 2. - С. 15-20
8. Суржиков В.П., Хорсов Н.Н., Хорсов П.Н. Мультисенсорная система для исследования дефектности диэлектрических материалов // Контроль. Диагностика. – 2011. - №. 11. - С. 17-20
9. Фурса Т.В., Хорсов Н.Н., Батулин Е.А. Источники акустоэлектрических преобразований в бетонах ЖТФ. - 1999. - Т. 69, №. 10. - С. 51-55.

**Рецензенты:**

Гынгазов С.А., д.т.н., в.н.с., Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск;

Фурса Т.В., д.т.н., в.н.с., Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск.