

На правах рукописи



Осипов Константин Юрьевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОСНОВАННЫХ НА ЯВЛЕНИИ МЕХАНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Томск - 2007

Работа выполнена в проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Томского политехнического университета.

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук,
профессор,
Суржиков Анатолий Петрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кулешов Валерий Константинович

кандидат технических наук
Гордеев Василий Федорович

Ведущая организация: Московский государственный институт радиотехники электроники и автоматики (технический университет)

Защита диссертации состоится «23» октября 2007 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при Томском политехническом университете по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан «22» сентября 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Винокуров Б. Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Эксплуатация и применение композиционных строительных материалов, исследованию которых и посвящена данная работа, связаны с высокими механическими нагрузками, поэтому задача контроля их качества и диагностики разрушения имеет очень важное практическое значение. Существующие методы контроля не обладают достаточной надежностью и точностью. Для решения этой задачи может быть использовано явление механоэлектрических преобразований в диэлектрических материалах, которое основано на возникновении электромагнитного сигнала под действием механического возбуждения.

Исследованиями механоэлектрических преобразований в различных диэлектрических материалах показано, что они возникают не только на стадии пластической деформации и разрушения диэлектрических твердых тел, но и сопровождают упругую деформацию, вызванную импульсным механическим возбуждением. Появилась перспектива разработки неразрушающих методов контроля качества материалов, основанных на использовании этого явления. В рамках этих исследований в проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников (ПНИЛ ЭДиП) Томского политехнического университета была разработана аппаратура для регистрации электромагнитного отклика при механоэлектрических преобразованиях, обладающая достаточно высокой чувствительностью и помехозащищенностью, с помощью которой были изучены некоторые механизмы, получены эмпирические закономерности и связи механических характеристик композиционных диэлектрических материалов с параметрами электромагнитных откликов на импульсное ударное возбуждение и начата разработка неразрушающих методов контроля композиционных диэлектрических материалов.

Данная работа является продолжением исследований в этом актуальном направлении и посвящена проблеме расширения функциональных возможностей разрабатываемых электромагнитных методов контроля композиционных строительных материалов.

Целью работы является установление закономерностей механоэлектрических преобразований при упругом ударном механическом возбуждении композиционных строительных материалов и разработка на этой основе методик неразрушающего электромагнитного контроля их структурных и механических характеристик.

Для достижения цели в работе были поставлены следующие **задачи**:

1. Исследовать основные факторы, влияющие на параметры механоэлектрических преобразований при ударном возбуждении диэлектрических материалов.
2. Изучить источники генерирования переменных электромагнитных полей в условиях импульсного механического возбуждения композиционных строительных материалов.
3. Исследовать закономерности взаимосвязи параметров механоэлектрических преобразований со структурными характеристиками композиционных материалов.
4. Изучить взаимосвязь параметров электромагнитного отклика из композиционных материалов с изменением качества адгезионного контакта на границах

раздела разнородных материалов в условиях напряженно-деформированного состояния.

5. Разработать критерии неразрушающих механоэлектрических методов определения прочности, структурных характеристик, изменения напряженно-деформированного состояния и качества адгезионного контакта компонентов в строительных материалах.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Основными источниками генерирования переменных электрических полей в композиционных строительных материалах при их упругом ударном возбуждении являются заряженные поры, двойные электрические слои на границах адгезионного контакта компонентов и пьезоэлементы, входящие в состав многих горных пород и песка, используемых в качестве заполнителей в строительных композитах.

2. Параметры электромагнитного отклика на ударное возбуждение диэлектрических материалов зависят от упругих и электрических характеристик материалов, характеристик удара, температуры и влажности окружающей среды.

3. Амплитуда электромагнитного отклика на упругое ударное возбуждение случайно-неоднородной композиционной системы (A), состоящей из матрицы и включений, зависит от концентрации включений и описывается уравнением:

$$A = A_0 \cdot n \cdot e^{-nk \frac{r}{\lambda}},$$

где A_0 – амплитуда основной гармоники спектра электромагнитного отклика из образца с единичным включением; n – концентрация включений; r – размер включений, λ – длина акустической волны, k – коэффициент, определяющий затухание акустической волны.

4. Установлено, что характеристики механоэлектрических преобразований в процессе изменения качества адгезионного контакта на границе металл-диэлектрик связаны с изменением характеристик акустических волн, формирующихся в материале при его ударном возбуждении и состояния адгезионного контакта, а динамика этих изменений определяется соотношением коэффициентов линейного температурного расширения компонентов.

5. Предложены электромагнитные неразрушающие методики контроля прочности, структурных характеристик, динамики изменения качества адгезионного контакта компонентов в композиционных материалах при температурном возбуждении и изменения напряженно-деформированного состояния, а также степени структурных фазовых изменений в кристаллогидратах в условиях температурного отжига.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Характеристики электромагнитного отклика при механоэлектрических преобразованиях в композиционных строительных материалах определяются размером и концентрацией заряженных неоднородностей, наличием пьезосодержащих включений и процессами рассеяния акустических волн.

2. Амплитудно-частотные характеристики электромагнитного отклика на упругое ударное возбуждение отражают динамику изменения качества адгезионного контакта под действием температурных полей в системе металл-диэлектрик.

3. Разработаны основы неразрушающих электромагнитных методов контроля прочности, пористости и изменения напряженно-деформированного состояния в композиционных строительных материалах, по данным амплитудно-частотного и корреляционного анализа электромагнитного отклика.

Достоверность научных результатов подтверждается корректностью постановки решаемых задач и их физической обоснованностью, достаточным объемом экспериментальных данных, комплексным характером подхода к решению поставленных задач, не противоречат современным представлениям о рассматриваемых явлениях, теоретическим и экспериментальным данным других авторов и получены с использованием современного измерительного оборудования.

Научно-практическая значимость работ. Разработанные в результате проведенных исследований методики для контроля качества композиционных диэлектрических материалов могут быть использованы для определения структурных, прочностных характеристик композиционных строительных материалов, изменения напряженно-деформированного состояния, для отслеживания динамики изменения состояния адгезионного контакта в армированных композитах в процессе их эксплуатации. Получен патент на способ контроля прочности изделий из твердых материалов, основанный на использовании явления механоэлектрических преобразований. Результаты работы апробированы в условиях производства и внедрены в учебный процесс.

Личный вклад автора. Автор лично определил задачи исследований, усовершенствовал методику измерения параметров механоэлектрических преобразований для проведения исследований в условиях температурного возбуждения, проводил эксперименты, анализировал результаты и делал выводы.

Апробация работы и публикации. Результаты работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (Екатеринбург 2003 г.); Международной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (Москва, 2003, 2004 г.); Всероссийской школе-семинаре «Новые материалы. Создание, структура, свойства» (Томск, 2004 г.); Десятой Юбилейной Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных: (Томск, 2004 г.); научно-практическом семинаре в период научной стажировки в Ульсанском университете, г. Ульсан, Южная Корея, 2005 г. Международной конференции «Современные техника и технологии СТТ'2005» (Томск, 2005 г.); 8-м Российско-Китайском симпозиуме «Новые материалы и технологии» (Китай, Гуан-Чжоу, 2005г.).

Публикации: Основные результаты исследований опубликованы в 21 научной работе, из которых 11 в центральных журналах, и получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы: Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка используемой литературы и Приложения. Работа содержит 167

страниц машинописного текста, включая 75 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 113 источников. Приложения – 3 страницы.

Автор выражает благодарность научному руководителю профессору Суржикову А.П., научному консультанту, д.т.н Фурса Т.В. и коллективу научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников за помощь и ценные замечания.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи проводимых исследований, перечислены основные положения, выносимые на защиту, их практическая значимость, достоверность, представлены структура и объем работы.

В первой главе сделан аналитический обзор литературных данных по электрическим эффектам, возникающим при механическом возбуждении различных диэлектрических материалов, возможным механизмам появления электромагнитной эмиссии, перспективам ее использования для контроля механических характеристик материалов, взаимосвязи параметров упругих колебаний в материалах с их физико-механическими характеристиками и степенью напряженно-деформированного состояния, содержатся сведения по известным неразрушающим методам контроля качества материалов, обоснованы цели и задачи исследования.

Начало исследований явления механоэлектрических преобразований в диэлектрических материалах было положено А.В. Степановым, в дальнейшем Урусовской А.А., Корнфельдом, М.И. Финкелем, В.М. Дистлером Г.И. и др. были изучены процессы формирования зарядов в диэлектриках, а в работах Мартышева Ю.Н., Беляева Л.М., Воробьева А.А., Головина Ю.И., Минеева, В.Н., Алексеева Д.В., Молоцкого М.И., Хатиашвили Н.Г., Перельмана М.Е. и др. установлены основные закономерности и предложены механизмы электромагнитной эмиссии в различных диэлектрических материалах в условиях пластической деформации и разрушения материалов. Первые попытки связать параметры электромагнитного сигнала с прочностными характеристиками материалов предприняты Воробьевым А.А., Беляевым Л.М. и Мартышевым Ю.Н. Последующие работы Хатиашвили Н.Г., Малышкова Ю.П., Гордеева В.Ф., Фурса Т.В. и др. показали, что механоэлектрические преобразования возникают не только в процессе микро- и макроскопического разрушения диэлектрических твердых тел, но и сопровождают упругую деформацию, вызванную импульсным механическим возбуждением. Появилась перспектива разработки неразрушающих методов контроля качества материалов, основанных на использовании явления механоэлектрических преобразований при упругом ударном возбуждении композиционных диэлектрических материалов.

С конца 70-х годов в ПНИЛ ЭДиП под руководством Воробьева А.А. были начаты работы по разработке нового метода контроля механических характеристик сложных диэлектрических материалов, основанного на использовании явления механоэлектрических преобразований. На начальном этапе были получены эмпирические зависимости, связывающие интенсивность электромагнитной эмис-

сии, зарегистрированной при нагружении материала до испытательной нагрузки с механической прочностью. Дальнейшие исследования, выполненные в рамках этого направления, позволили предложить и использовать для контроля параметры электромагнитного сигнала, возникающего при вибрационном и ударном возбуждении и разработать измерительную аппаратуру, обладающую достаточно высокой чувствительностью и помехозащищенностью, изучить основные закономерности, установить источники и механизмы генерирования электромагнитных сигналов, что позволило повысить точность контроля и предложить дополнительные возможности практического использования явления механоэлектрических преобразований. Данная работа является логическим продолжением этих исследований и посвящена разработке электромагнитных критериев и алгоритмов контроля структурных характеристик, механической прочности, динамики изменения качества адгезионного контакта и напряженно-деформированного состояния композиционных диэлектрических материалов.

Во второй главе изложены средства методического и аппаратного обеспечения исследований. Дана характеристика объектов исследования. Приведены результаты исследования основных факторов, влияющих на параметры электромагнитного отклика на импульсное механическое возбуждение композиционных диэлектрических материалов.

В качестве объектов для исследования были использованы широко используемые на практике строительные материалы, для которых наиболее остро стоит проблема определения их механических характеристик. Кроме того, использование данных объектов является очень удобным с точки зрения простоты изготовления различных физических моделей, а различие в упругих и электрических характеристиках выбранных материалов предоставляет широкие возможности для исследований.

Основные исследования были выполнены с помощью разработанного в проблемной лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Томского политехнического университета измерительного комплекса, позволяющего производить импульсное механическое возбуждение объектов исследования, регистрацию и оцифровку временной реализации электромагнитного и акустического отклика, производить измерение параметров механического возбуждения, осуществлять исследования при комплексном термомеханическом возбуждении и т.п. Используемая измерительная аппаратура обладает высокой чувствительностью, помехозащищенностью и широкими возможностями по исследованию механоэлектрических преобразований на внутренних неоднородностях. Для регистрации электрической составляющей переменного электромагнитного поля, возникающего при импульсном механическом возбуждении образцов применялся дифференциальный емкостной датчик, позволяющий значительно уменьшить величину внешних электрических помех. Приемник имеет малую входную емкость (3 пФ) и высокое выходное сопротивление (50 МОм). Датчик состоит из двух металлических пластин, пространственно и акустически развязанных, одна из которых является измерительной, а другая – компенсационной, за счет чего на выходе дифференциального приемника выделяется полезная составляющая сигнала. Дифференциальность повышает чувствительность измерения и позволяет существ-

венно подавить уровень синфазных помех от внешних электромагнитных полей. Применявшийся для проведения исследований механоэлектрических преобразований прибор имеет частотный диапазон сигналов, принимаемых электромагнитным каналом, в пределах от 1 кГц до 500 кГц; каналом акустической эмиссии - от 500 Гц до 230 кГц при чувствительности не менее 60 мкВ (по каждому каналу), также позволяет оцифровывать форму регистрируемых аналоговых сигналов в диапазоне частот 1 кГц – 1 МГц. Для ускорения процесса обработки экспериментальных данных использовался ряд разработанных сервисных программ в среде программирования Delphi 5.

Для импульсного механического возбуждения применялись механические и электромеханические ударные устройства. Основная часть исследований была выполнена с использованием ударного устройства, с длительностью импульса возбуждения – $(40-90) \cdot 10^{-6}$ с и энергией удара порядка $(0.1-1.4) \cdot 10^{-2}$ Дж. Такие параметры ударного возбуждения дают возможность достаточно надежно возбуждать и регистрировать составляющие электромагнитных откликов, связанные с внутренними структурными неоднородностями строительных материалов при варьировании толщины объекта исследования от 7-10 до 30-40 см. Для визуального наблюдения за динамикой изменения качества адгезионного контакта при температурном воздействии использовался микроскоп МБИ-15 с разрешением 0.5 мкм. При проведении экспериментов по статическому нагружению образцов использовался пресс ИП-500 в соответствии с действующими ГОСТами с одновременной регистрацией электромагнитного отклика на импульсное ударное возбуждение. В процессе проведения исследований были также использованы методика измерения электрических характеристик материалов с помощью автоматического мостового измерителя Е7-14, методика измерения скорости продольных акустических колебаний, методики измерения параметров импульсного ударного возбуждения (длительности и силовой характеристики импульса возбуждения) и методика рентгеноструктурного анализа с использованием автоматизированного дифрактометрического комплекса на базе серийного прибора ДРОН - 4М.

Ударное возбуждение, используемое в исследованиях, создает в материале напряжения более чем на три порядка меньше разрушающих и относится к области упругой деформации. Это показано путем сравнения механических напряжений в зоне контакта, полученных с использованием пьезопленки, нанесенной на поверхность материала, по которой производился удар с разрушающими механическими напряжениями, определенными по стандартной методике. Экспериментальными исследованиями показано, что изменение энергии и длительности ударного возбуждения приводит к трансформации спектральных характеристик электромагнитного отклика из материала. Поэтому во всех сравнительных исследованиях производилось приведение геометрии эксперимента к одним условиям, измерялись и учитывались характеристики ударного возбуждения и испытания образцов производились при одной и той же температуре и влажности окружающей среды.

Третья глава посвящена исследованию влияния структурных характеристик композиционных диэлектрических материалов на параметры механоэлектрических преобразований при упругом ударном возбуждении.

Параметры генерируемого в результате механоэлектрических преобразований электромагнитного сигнала, согласно используемой нами методики проведения исследований зависят от электрофизических характеристик исследуемых материалов. Исследованиями на цементном и гипсовом камне, существенно отличающимися упругими (скорость звука, модуль Юнга) и диэлектрическими (диэлектрическая проницаемость и $\text{tg}\delta$) характеристиками показана значительное различие в параметрах электромагнитного отклика из этих материалов.

Кроме того, величина тока смещения, источником которого является смещение зарядов двойных электрических слоев акустическими волнами, зависит от концентрации источников механоэлектрических преобразований и их размеров.

В рамках данной работы приводятся результаты исследования влияния структурных характеристик материалов одного состава, различия в упругих и диэлектрических характеристиках в которых не существенны, на параметры электромагнитного отклика с целью разработки неразрушающих методов контроля структурных различий, возникающих в процессе изготовления композиционных материалов.

Рассмотрим, существуют ли общие закономерности взаимосвязи таких структурных характеристик материалов, как размеры и концентрация внутренних неоднородностей, различающихся составом, размером и типом на параметры механоэлектрических преобразований в материалах. Из теории акустики следует, что доля рассеиваемой энергии тем больше, чем больше размер включения по сравнению с длиной волны; таким образом, затухание акустической волны тем больше, чем больше количество включений и их размеры. С другой стороны нами установлено, что в композиционных материалах, содержащих в своем составе заряженные поры или двойные электрические слои на границе матрицы и включения возникает электромагнитный отклик, связанный со смещением зарядов акустическими волнами, формирующимися в материале при его ударном возбуждении. При увеличении концентрации заряженных неоднородностей должен возрастать суммарный электромагнитный отклик от этих источников механоэлектрических преобразований.

Из рассмотрения механоэлектрических преобразований как совокупного процесса, учитывающего условия распространения упругих волн в неоднородных средах и зарядового состояния неоднородностей, удалось получить эмпирическое выражение, связывающее амплитуду электромагнитного отклика с концентрацией внутренних структурных неоднородностей:

$$A(n) = A_0 \cdot n \cdot e^{-kn \cdot \frac{r}{\lambda}} \quad (1),$$

где A_0 – амплитуда основной гармоники спектра электромагнитного отклика из образца, содержащего единичное заряженное включение; n – концентрация неоднородностей; k – коэффициент, определяющий затухание акустической волны за счет рассеяния на неоднородностях, r – размер неоднородности, λ – длина волны возбуждения.

Для экспериментальной проверки данной зависимости были использованы два разных типа физических моделей: композиционные керамические материалы, состоящие из глины и стеклянных микросфер, размером порядка 3-5 мм и пористые цементные образцы с размерами пор меньше 0,05 мм. Используемые материалы отличаются размерами структурных неоднородностей \approx на 2 порядка и имеют существенно разные соотношения волновых акустических сопротивлений матрицы и включений.

Характер изменения спектральной амплитуды основного максимума акустического и электромагнитного отклика из керамических образцов с включениями, для которых $r/\lambda \cong 5 \cdot 10^{-2}$, приведены на рис. 1.

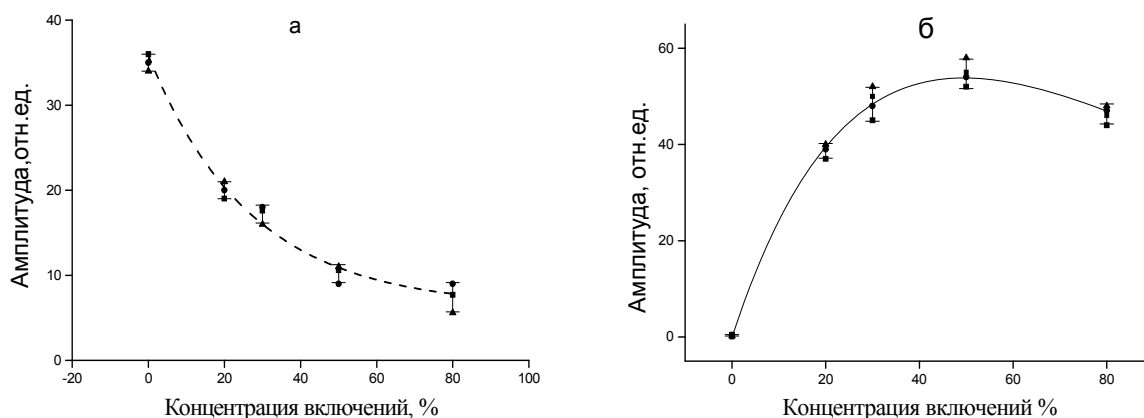


Рис.1 Зависимость амплитуды акустического (а) электромагнитного (б) сигналов от концентрации включений в строительной керамике.

Сплошной линией на рис. 1б изображена теоретическая, рассчитанная по формуле (1), зависимость амплитуды электромагнитного отклика от концентрации включений, а пунктирной (на рис. 1а) - экспоненциальная аппроксимация с помощью стандартных программ Microcal Origin зависимость амплитуды акустических сигналов от концентрации включений.

На рисунке видно, что поведение как акустического, так и электромагнитного откликов хорошо согласуется с формулой (1).

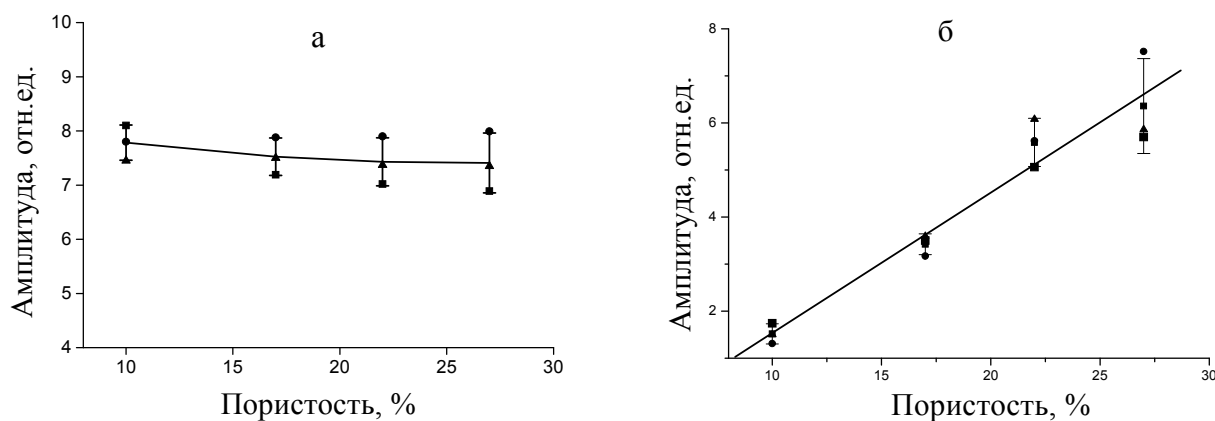


Рис.2. Зависимость спектральной амплитуды основного максимума акустического (а) и электромагнитного (б) сигналов от пористости цементных образцов

Для цементных образцов с естественной пористостью ($r/\lambda \cong 2 \cdot 10^{-4}$) характер изменения акустического и электромагнитного отклика приведены на рис.2.

При соотношении $r/\lambda \cong 2 \cdot 10^{-4}$ и концентрации пор в диапазоне от 13 до 27% основной спектральный максимум акустического отклика изменяется незначительно, и даже наличие значительной концентрации пор не усиливает результирующий рассеивающий эффект. В отличие от акустики с увеличением пористости происходит возрастание в несколько раз величины основного максимума спектральной амплитуды электромагнитного отклика по зависимости, близкой к линейной, в соответствии с увеличением концентрации источников акустоэлектрических преобразований – пор. В этом случае в формуле (1) экспоненциальный множитель приблизительно равен 1, а зависимость амплитуды электромагнитного отклика от концентрации принимает вид $A(n) = A_0 \cdot n$, т.е. является линейной и также хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Из проведенных исследований на материалах, обладающих различными структурными особенностями, следует, что механоэлектрические преобразования в композиционных строительных материалах одного состава являются результатом двух конкурирующих процессов: рассеяния акустических волн структурными неоднородностями и возрастания электромагнитного поля благодаря увеличению количества и размеров заряженных неоднородностей.

В используемых на практике строительных материалах, например бетонах и железобетонах, присутствует песок, который в подавляющем большинстве случаев имеет значительное содержание α -кварца. Наличие кварца, обладающего пьезоэлектрическими свойствами, приводит к появлению электрического сигнала при механическом возбуждении таких диэлектриков за счет пьезоэффекта, о чем свидетельствуют данные сравнения откликов из цементных образцов с одинаковым процентным содержанием (порядка 25%) стекло- и пьезопеска (рис.3).

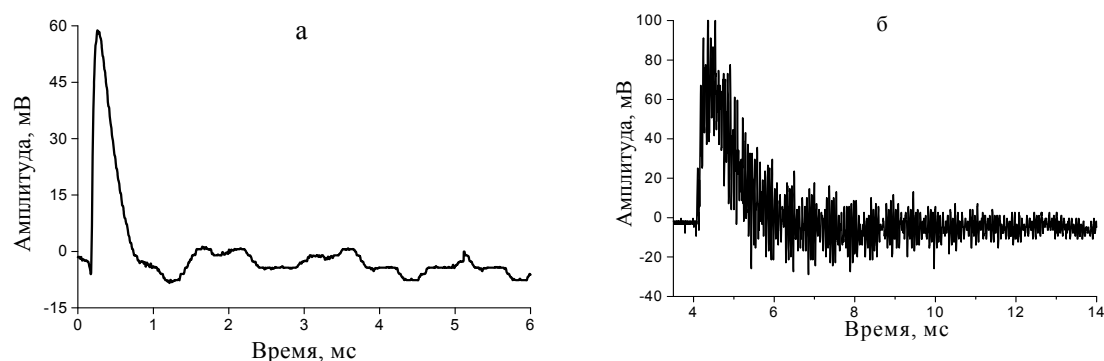


Рис.3. Электромагнитные отклики на ударное возбуждение: а – цементного камня со стеклопеском, б – цементного камня с пьезосодержащим песком.

Возникновение переменных электромагнитных полей связано с формированием индуцированных зарядов за счет пьезоэффекта при изменении механического напряжения, вызванного акустическими волнами.

Присутствие в композиционном материале пьезосодержащих включений приводит к расширению спектральной характеристики электромагнитного отклика в сторону более высоких частот в силу случайной ориентации пьезоэлектриче-

ских осей кварцевых включений относительно приемного датчика и их расположения в различных деформационных зонах образца (рис. 4). Доказательством этому служат эксперименты по исследованию акустоэлектрических преобразований в слоистых материалах, состоящих из чередующихся слоев гипса и цемента, изменения в которых связаны с суперпозицией электромагнитных откликов механоэлектрических преобразований на разнесенных в пространстве двойных электрических слоях с противоположным расположением полей диполей при прохождении акустической волны через образец (рис.5).

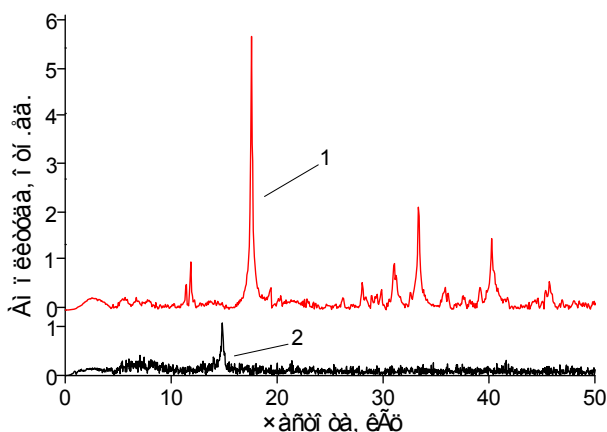


Рис 4. АЧХ электромагнитных откликов из: 1-цементно-песчаного образца; 2-цементного образца

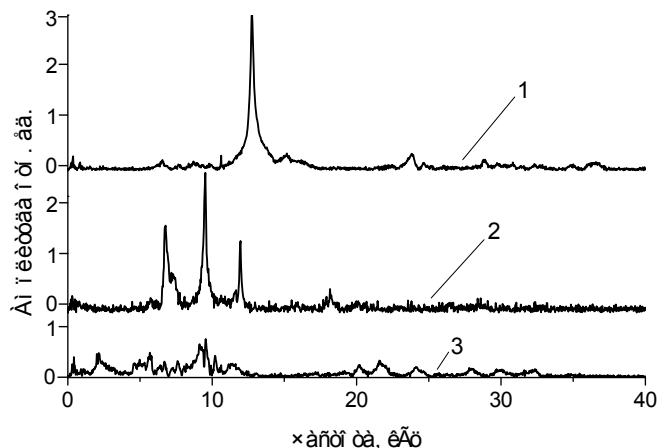


Рис. 5 АЧХ электромагнитных откликов из слоистых композитов: 1) – двухслойный; 2) – трехслойный; 3) – пятислойный.

Сравнение величин электромагнитных откликов из физических моделей на основе цементного вяжущего, содержащих различные типы источников механоэлектрических преобразований, показано на рис. 6. Из приведенных данных следует, что пористость имеет самую низкую эффективность механоэлектрических преобразований, значительную роль играют пьезосодержащие включения и наличие в композиционном материале крупного заполнителя на границе которого с цементной матрицей имеется двойной электрический слой, который и определяет достаточно высокую эффективность механоэлектрических преобразований в строительных материалах.

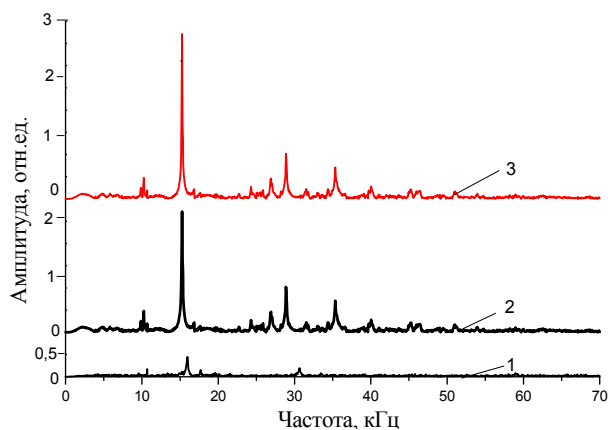


Рис.6. Спектральные характеристики электромагнитных откликов из образцов: 1 – цементного камня, 2 – цементно-песчаного образца, 3 – цементно-песчаного образца с крупным заполнителем.

В таких практически важных строительных материалах, как тяжелые бетоны, соотношение волновых акустических сопротивлений цементной матрицы и крупного заполнителя различаются обычно мало. Существующие, например, акустические методы не позволяют надежно определять структурные характеристики композиционных систем, состоящих из материалов с близкими значениями

волновых акустических сопротивлений. Поэтому, в рамках данных исследований предпринята попытка оценки структурных особенностей в слоистых композитах с близкими значениями волновых сопротивлений компонентов, используя явление механоэлектрических преобразований. Для решения этой задачи была изготовлена партия физических моделей образцов слоистых материалов, состоящих из цементного и гипсового камня с различным соотношением толщин и количества слоев цемента и гипса. Волновые акустические сопротивления цементного и гипсового камня различаются приблизительно в 1,3-1,4 раза. Проведенные экспериментальные исследования показали, что с изменением толщины слоев меняется амплитуда спектрального максимума и происходит его смещение в соответствии с изменением скорости звука в этих моделях, что может быть использовано для определения толщины слоев в композитах с близкими волновыми акустическими сопротивлениями компонентов.

Проведенные исследования показывают, что электромагнитный отклик, возникающий при упругом ударном возбуждении композиционных строительных материалов, является параметром, чувствительным к электрофизическим и структурным (пористость, концентрация крупного и мелкого заполнителя, толщина и количество слоев в слоистых композитах) характеристикам композиционных материалов и наличию в них пьезосодержащих включений.

Четвертая глава посвящена рассмотрению основных закономерностей механоэлектрических преобразований на границе адгезионного контакта металл-диэлектрик в напряженно-деформированных композиционных материалах.

Широкое использование на практике армированных композиционных материалов и эксплуатация их в условиях напряженно-деформированного состояния приводит к тому, что со временем конструкции из этих материалов теряют свою несущую способность. Поэтому существует необходимость контролировать качество адгезионного контакта (например, бетона с арматурой в железобетоне) в процессе эксплуатации строительных конструкций. Для разработки методов, которые бы позволяли осуществлять такой текущий контроль, потребовалось провести специальные исследования динамики изменения характеристик электромагнитного отклика при нарушении адгезионного контакта на границе металл-диэлектрик при изменении напряженно-деформированного состояния.

Исследования проводились на физических моделях двухкомпонентных систем металл-диэлектрик, состоящих из материалов, значительно различающихся коэффициентами температурного расширения. Локальное температурное возбуждение зоны контакта позволяло, за счет разности коэффициентов температурного расширения компонентов композиционной системы, создавать на их границе такие механические напряжения, которые приводили к нарушению адгезионного контакта, вплоть до его разрушения.

Визуально, с помощью оптических методов, отслеживалась кинетика изменения контактной зоны при нагревании композитов (рис.7).

В процессе температурного нагрева в исследуемой системе возникают термические напряжения, которые при возрастании температуры от комнатной до 100 °С последовательно изменяют состояние адгезионного контакта и приводят к его полному разрушению.

Другими экспериментами были получены данные о трансформации электромагнитного отклика на импульсное ударное возбуждение такого же композита на различных стадиях нагрева. Такой подход позволил исследовать влияние нарастающих под действием температуры напряжений в области адгезионного контакта на характер изменения качества этого контакта и на процесс механоэлектрических преобразований в композиционных материалах (рис. 8).

Нагревание самого гипсового камня в области температурного диапазона, в котором производились исследования (25-130 °С), находится в области термоупругих напряжений и не приводит к его структурным изменениям по крайней мере до температуры 150 °С, о чем свидетельствуют данные рентгеноструктурного анализа.

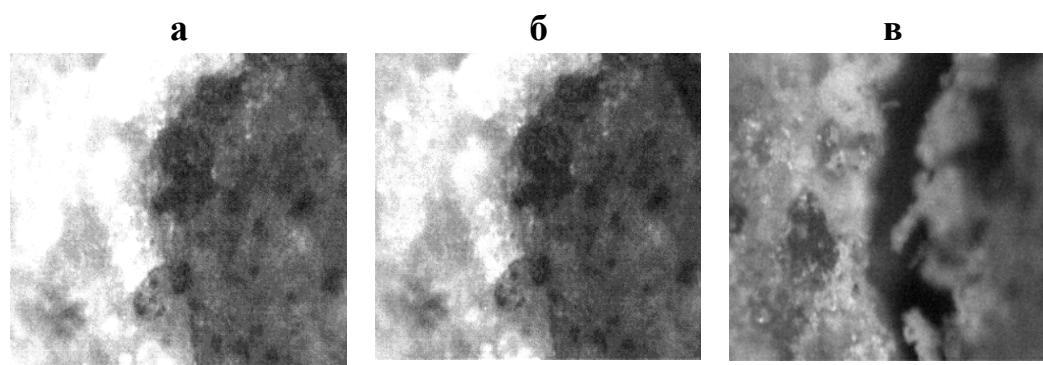


Рис. 7. Граница адгезионного контакта композиционной системы гипс-латунь, нагретых до температуры: а -35, б-80 и в-100 °С.

Проведенными исследованиями установлено, что на начальной стадии нагревания композиционной системы металл-диэлектрик происходит незначительное уменьшение величины электромагнитного отклика, связанное с расширением диэлектрика, увеличением размера пор, испарением из них влаги и изменением

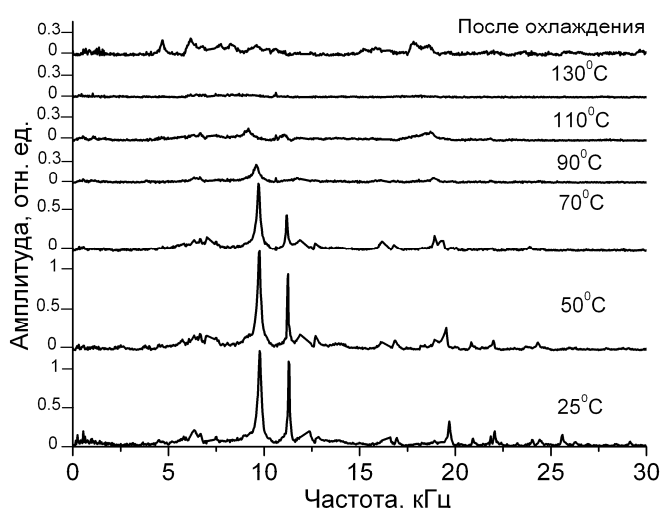


Рис.8. Изменение спектральных характеристик электромагнитного отклика в модели гипсовый камень-латунь в процессе ее нагревания до разрушения контакта и последующего охлаждения до комнатной температуры

его проводимости. На последующих этапах нагревания, когда начинается нарушение адгезионного контакта, происходит изменение состояния двойного электрического слоя, расположенного на границе этого контакта, что приводит к значительному уменьшению величины электромагнитного отклика. После охлаждения композиционной системы, в которой произошло нарушение адгезионного контакта, не происходит восстановление исходного электромагнитного сигнала.

Исходя из этого, одним из показателей начала процесса

разрушения адгезионного контакта может служить значительное уменьшение амплитуды основных спектральных максимумов электромагнитного отклика. Еще одним критерием для оценки температуры, при которой происходит разрушение адгезионного контакта, является значение температуры, при которой наблюдается стабилизация максимального коэффициента взаимной корреляции электромагнитного отклика. Было проведено сравнение расчетных значений напряжений на границе адгезионного контакта данной композиционной системы, исходя из значений температуры разрушения контакта, полученной с использованием приведенных выше критериев с адгезионной прочностью такой же модели, измеренной обычным разрушающим методом, и получено их хорошее совпадение. Аналогичные испытания были проведены еще на целом ряде моделей и показано, что динамика изменения спектральных характеристик электромагнитного отклика определяется соотношением коэффициентов линейного температурного расширения компонентов композиционной системы.

Проведенными исследованиями показано, что по результатам амплитудно-частотного и корреляционного анализа электромагнитного отклика можно достаточно надежно определять начало процесса нарушения адгезионного контакта в условиях напряженно-деформированного состояния армированных композитов.

В пятой главе приведены результаты исследований по разработке электромагнитных критериев определения прочности, напряженно-деформированного состояния строительных материалов, а также рассмотрены возможности использования метода регистрации электромагнитного отклика для оценки произошедших в кристаллогидратном материале структурных фазовых превращений.

Проведенные исследования основных закономерностей механоэлектрических преобразований в композиционных диэлектрических материалах позволили разработать обобщенный параметр оценки прочности композиционных диэлектрических материалов, включающий в себя амплитудные и частотные характеристики электромагнитного отклика на ударное возбуждение, несущие информацию о прочности адгезионного контакта матрицы и заполнителя; длительность переднего фронта электромагнитного сигнала, определяющую прочность матрицы и коэффициентов, учитывающих роль температуры и влажности окружающей среды, что позволяет осуществлять контроль в различных климатических условиях. На образцах бетона показана возможность неразрушающего электромагнитного контроля прочности (рис.9). Коэффициент корреляции между обобщенным параметром электромагнитного отклика и прочностью образцов бетонов составил 0.87. Градуировочную зависимость устанавливают заново при изменении вида цемента, песка и крупного заполнителя, геометрических размеров объектов испытания, а также при изменении технологии производства бетона.

Проведенный сравнительный анализ предложенного способа контроля с используемыми в промышленности методами склерометрии показал более высокую точность метода электромагнитной диагностики.

Композиционные материалы часто используются в силовых конструкциях, подвергающихся действию высоких механических напряжений, поэтому высока вероятность их непредвиденного разрушения. В связи с этим особую актуальность приобретает проблема оценки динамики изменения их напряженно-

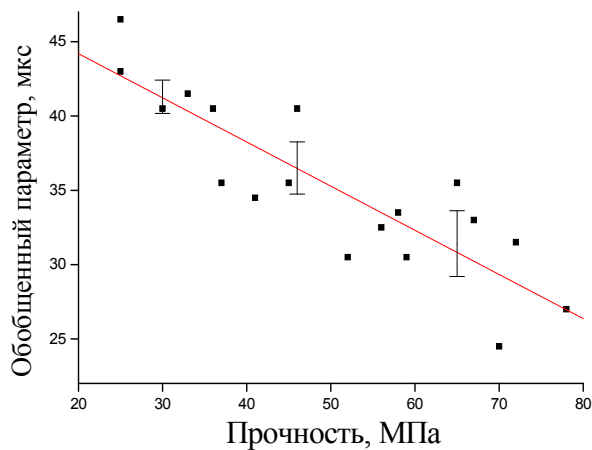


Рис.9. Градуировочная зависимость обобщенного электромагнитного параметра от прочности образцов бетона.

новлено, что в результате как механических, так и температурных воздействий на материалы, происходит смещение спектральных максимумов электромагнитного отклика и изменение их величины, что обусловлено деформационными процессами, изменением упругих свойств материала и состояния двойных электрических слоев – источников механоэлектрических преобразований.

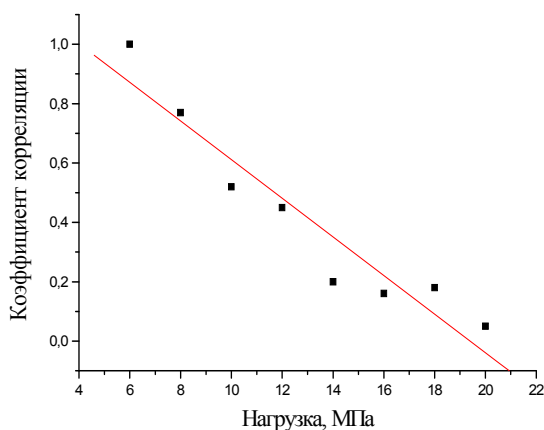


Рис.10. Зависимость максимумов функции взаимной корреляции электромагнитных откликов из бетона от прикладываемой внешней нагрузки.

нениях. В качестве критериев для разработки экспрессного метода структурно-фазовых изменений предложено использовать коэффициент взаимной корреляции электромагнитных сигналов и их амплитудно-частотные характеристики.

Основные выводы по работе.

1. Источниками генерирования переменных электрических полей в композиционных строительных материалах при их упругом ударном возбуждении являются заряженные поры, двойные электрические слои на границах адгезионного контакта компонентов и пьезоэлементы, входящие в состав многих горных пород и песка, используемых в качестве заполнителей в строительных композитах.

деформированного состояния.

Проведенные исследования позволяют предложить следующую модель механоэлектрических преобразований в композиционных диэлектрических материалах в условиях напряженно-деформированного состояния. При формировании напряженно-деформированного состояния возникают области неоднородных механических полей, взаимодействие с которыми приводит к трансформации акустических волн, что отражается на параметрах электромагнитного отклика. Уста-

Наилучшим образом характер изменения напряженно-деформированного состояния композиционных материалов при их нагружении отражает коэффициент функции взаимной корреляции электромагнитных откликов (рис.10). Найденная закономерность может использоваться для оценки изменения напряженно-деформированного состояния строительных материалов.

По параметрам электромагнитного отклика на ударное возбуждение гипсового камня, подвергнутого различной термической обработке, можно судить о произошедших в нем структурных фазовых изме-

2. Параметры электромагнитного отклика на ударное возбуждение композиционных строительных материалов в значительной степени определяются упругими и электрическими характеристиками материалов и зависят от энергии и длительности удара, температуры и влажности окружающей среды.

3. Амплитуда электромагнитного отклика из композиционной системы, состоящей из матрицы и включений, отличающихся от матрицы по упругим характеристикам, описывается уравнением:

$$A(n) = A_0 \cdot n \cdot e^{-nk \frac{r}{\lambda}},$$

где A_0 – амплитуда основной гармоники спектра электромагнитного отклика из образца содержащего единичное включение; n – концентрация включений; r – размер включений, λ – длина акустической волны, k – коэффициент, учитывающий затухание акустической волны за счет рассеяния на включениях.

4. Предложен обобщенный параметр электромагнитного неразрушающего метода контроля механической прочности композиционных диэлектрических материалов:

$$P = t + k_1 k_2 \frac{A}{N} \cdot \frac{1}{f},$$

где: t – длительность переднего фронта электромагнитного сигнала, мкс,

A – амплитуда электромагнитного сигнала, В,

N – размерный нормирующий множитель, который определяется опытным путем для каждой конкретной партии бетона, В,

f – частота основного максимума спектральной характеристики электромагнитного сигнала, МГц,

k_1 – коэффициент влажности,

k_2 – температурный коэффициент.

Получена градуировочная зависимость разработанного электромагнитного обобщенного параметра с прочностью бетонов, которую можно использовать для неразрушающего контроля механической прочности. Предложенный способ превосходит по точности применяющийся на практике метод склерометрии.

5. Установлены закономерности трансформации параметров электромагнитного отклика в процессе изменения качества адгезии на границе металл-диэлектрик под действием температурных полей, что может быть использовано для оценки динамики изменения качества адгезионного контакта в армированных строительных материалах в условиях напряженно-деформированного состояния.

6. С увеличением напряженно-деформированного состояния, создаваемого внешними механическими и температурными полями, в композиционных строительных материалах происходит перераспределение энергии спектральных составляющих электромагнитного отклика, что является следствием деформационных процессов, изменения упругих свойств материала, а также характеристик и количества источников акустоэлектрических преобразований. Разработан критерий оценки изменения напряженно-деформированного состояния строительных мате-

риалов, основанный на использовании корреляционного анализа электромагнитных откликов.

7. В качестве критериев для разработки экспрессного метода структурно-фазовых изменений, происходящих в кристаллогидратах при их температурном нагреве, предложено использовать коэффициент взаимной корреляции электромагнитных сигналов и их амплитудно-частотные характеристики.

8. Проведенные исследования показывают, что предложенный новый электромагнитный метод неразрушающего контроля качества композиционных строительных материалов, обладает рядом достоинств:

- бесконтактностью приема электромагнитных сигналов;
- высокой чувствительностью к внутренним структурным неоднородностям в материалах;
- возможностью контроля динамики изменения качества материалов в процессе эксплуатации;
- экспрессностью и малогабаритностью.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Осипов К.Ю. Механоэлектрические преобразования в композиционных диэлектрических материалах на основе цементного вяжущего при комплексном термомеханическом возбуждении [Текст] / Осипов К.Ю., Савельев А.В. // Сборник тезисов Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых: Тезисы докладов: В 2 т. Т.2 – Екатеринбург-Красноярск: изд. АСФ России, 2003. – с. 681-683.
2. Осипов К.Ю. Влияние характеристик ударного возбуждения на параметры электромагнитного отклика из диэлектрических материалов [Текст] / Фурса Т.В., Осипов К.Ю., Савельев А.В. // Известия ВУЗов. Серия Физика, 2003, №10. С. 70-74.
3. Осипов К.Ю. Влияние структурных особенностей композиционных материалов на параметры механоэлектрических преобразований [Текст] / Фурса Т.В., Осипов К.Ю. // Известия ВУЗов. Серия Физика, 2003, №11. С. 61-65.
4. Осипов К.Ю. Электромагнитный контроль термоупругих напряжений в композиционных материалах [Текст] / Фурса Т.В., Хорсов Н.Н., Осипов К.Ю. // Материалы Международной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения». – Москва, 9-12 июня 2003 г. –с.328-329.
5. Осипов К.Ю. Исследование взаимосвязи параметров электромагнитного отклика из диэлектрических материалов с характеристиками ударного возбуждения [Текст] / Фурса Т.В., Осипов К.Ю. Савельев А.В. // Журнал Технической Физики. – 2003. – Т. 73, вып. 11. – С. 59-63.
6. Осипов К.Ю. Механоэлектрические преобразования в композиционных диэлектрических материалах при комплексном термомеханическом возбуждении [Текст] / Фурса Т.В., Осипов К.Ю. // Дефектоскопия. – 2003. – № 10. – С. 34-37.

7. Osipov K.Y. Interrelation between Electromagnetic Response Parameters and Impact Excitation Characteristics in Insulators [Текст] / Fursa T.V., Osipov K.Y., Savelev A.V. // Technical Physics. – 2003. – Vol 48. – №11. – pp. 1419-1423 .
8. Осипов К.Ю. Электромагнитный контроль структурных неоднородностей пьезосодержащих полиматериалов [Текст] / Фурса Т.В., Хорсов Н.Н., Осипов К.Ю. // Материалы Международной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения». – Москва, (2003). – С.190-191.
9. Осипов К.Ю. Разработка неразрушающего акустоэлектрического метода оценки степени дефектности композиционных диэлектрических материалов [Текст] / Труды IV Всероссийской школы-семинара «Новые материалы. Создание, структура, свойства – 2004». – Томск: Изд-во ТПУ. – 2004. –С. 211-214.
10. Осипов К.Ю. Особенности механоэлектрических преобразований в диэлектрических материалах в области структурных фазовых превращений [Текст] / Фурса Т.В., Найден Е.П., Осипов К.Ю., Усманов Р.У. // Журнал Технической Физики. – 2004. – Т 74, вып. 12. – С. 52-56.
11. Осипов К.Ю. Неразрушающий акустоэлектрический метод оценки степени дефектности композиционных диэлектрических материалов [Текст] / Фурса Т.В., Осипов К.Ю. // Материалы Международной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения». – Москва, (2004 г.). – С.181-182.
12. Осипов К.Ю. Разработка механоэлектрического метода оценки напряженно-деформированного состояния в композиционных материалах [Текст] /Современные техника и технологии: Труды Десятой Международной научно-практической конференции студентов: в 2 т. – Томск, (2004 г.) – Т. 2. – С.56-59.
13. Осипов К.Ю. Механоэлектрические преобразования в пьезосодержащих диэлектрических материалах [Текст] / Фурса Т.В., Осипов К.Ю. // Известия ВУЗов. Физика. – 2005. –№ 3. – С. 41-45.
14. Осипов К.Ю. Исследование взаимосвязи структурных характеристик слоистых композиционных материалов с параметрами электрического отклика на импульсное механическое возбуждение [Текст] / Фурса Т.В., Суржииков А.П, Хорсов Н.Н., Осипов К.Ю., Зацепин В.А. // Известия Томского Политехнического Университета. – Томск. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 10-13.
15. Осипов К.Ю. Исследование взаимосвязи структурных характеристик композиционных материалов с параметрами электрического отклика на импульсное механическое возбуждение [Текст] / Фурса Т.В., Осипов К.Ю., Зацепин В.А. // Современные техника и технологии СТТ'2005: Тезисы докладов Международной конференции. – Томск, (28 марта-1 апреля 2005г.) – ТПУ. – С. 33-34.
16. Осипов К.Ю. Исследование взаимосвязи параметров механоэлектрических преобразований с кинетикой изменения качества адгезионного контакта в материалах [Текст] / Фурса Т.В., Осипов К.Ю., Палык И.М. // Сове-

менные техника и технологии СТТ'2005: Тезисы докладов Международной конференции. – Томск, (2005г.) – ТПУ. – С. 66-67.

17. Osipov K.Y. Adhesive contact quality diagnostics in composite materials with a usage of mechanoelectrical transformations phenomenon [Текст] / Fursa T.V., Osipov K.Y., Palyk I.M. //J. of Guangdong non-ferrous Metals. Selected Proceedings of the 8th China-Russia Simposium on New Materials and Technologies. – China, Гуан-Чжоу, (3-6 of November, 2005.) – V. 15. – № 2-3. – pp. 156-159.

18. Osipov K.Y. Interrelation between the stressed state in composites and the parameters of the electromagnetic response to a mechanical impulse [Текст] / Fursa T.V., Surzhikov A.P., Horsov N.N., Osipov K.Y. // Technical Physics. – 2006. – Vol 51. – №4. – pp. 519-521.

19. Осипов К.Ю. Исследование взаимосвязи степени напряженно-деформированного состояния композиционных материалов с параметрами электромагнитного отклика на импульсное механическое возбуждение [Текст] / Фурса Т.В. Суржиков А.П., Хорсов Н.Н., Осипов К.Ю. // Журнал Технической Физики. – 2006. – Т 76, вып. 4. – С. 129-132.

20. Осипов К.Ю. Разработка акустоэлектрического метода определения пористости диэлектрических материалов [Текст] / Фурса Т.В, Суржиков А.П., Осипов К.Ю. // Дефектоскопия. – 2007. – № 2, – С. 27-34.

21. Пат. 2250449 Российская Федерация, МПК-7 G 01 N 3/30. Способ контроля прочности изделий из твердых материалов / А.П.Суржиков, Т.В.Фурса, К.Ю.Осипов (Россия). – № 2003118179/28; заявл. 16.06.2003; опубл. 20.04.2005. Бюл. № 11.