

На правах рукописи

ФУРСА Татьяна Викторовна

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЭМИССИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

01.04.10 – физика полупроводников и диэлектриков

05.23.05 – строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 1998

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

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор

Суржиков Анатолий Петрович;

кандидат технических наук,

Мальшков Юрий Петрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,

Боев Сергей Григорьевич;

кандидат технических наук,

Сафронов Владимир Николаевич

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

Защита состоится 29 декабря 1998г. в 15 часов на заседании специализированного совета Д 063.80.07 в Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, ауд. 346

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке политехнического университета.

Автореферат разослан 27 ноября 1998 г.

Секретарь специализированного
совета Д 063.80.07, доктор физико-
математических наук, профессор

Суржиков А.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Гетерогенные диэлектрические материалы и конструкции из них чаще всего эксплуатируются в условиях, при которых они подвергаются воздействию значительных механических нагрузок. В таких условиях происходит ускоренное изменение их физико-механических свойств, сокращение срока службы, высока вероятность непредвиденного разрушения в процессе эксплуатации. Задача диагностики разрушения приобретает очень важное практическое значение. Актуальна проблема оценки напряженно-деформированного состояния эксплуатируемых конструкций, определения их механической прочности, дефектности и конечного ресурса работы.

Недостатки существующих методов оценки технического состояния изготовленных или уже эксплуатирующихся конструкций заставляют искать принципиально новые способы неразрушающих контроля качества строительных материалов. Как показано в наших предыдущих исследованиях, явление электромагнитной эмиссии может быть использовано для решения задач контроля за процессами разрушения твердых тел.

Анализ литературных данных показывает, что метод электромагнитной эмиссии может обладать рядом преимуществ:

- высокой чувствительностью к дефектам структуры материалов;
- возможностью обнаружения дефектов как на стадиях их зарождения, так и на всех этапах их развития в процессе эксплуатации материалов.

Для научно-обоснованного выбора технических решений, повышения точности и расширения функциональных возможностей разрабатываемых электромагнитных методов диагностики разрушения и дефектоскопии гетерогенных материалов и конструкций прежде всего необходимы четкие представления об источниках и механизмах электромагнитной эмиссии, возникающей при их механическом возбуждении.

Цель работы. Провести исследования основных источников и механизмов генерирования электромагнитных полей при статическом и динамическом возбуждении многокомпонентных гетерогенных материалов; определить информативные характеристики электромагнитной эмиссии и возможности их использования для контроля физико-механических характеристик строительных материалов.

Методы исследования. При исследовании источников и механизмов явления электромагнитной эмиссии и методик контроля использовались методы теоретического описания, физического моделирования, статистические методы выделения полезной информации и анализа полученных результатов. Для обработки результатов измерений обычно использовались стандартные пакеты программ математического анализа в среде WINDOWS на ЭВМ.

Научная новизна. Выявлены основные источники и механизмы механо-электрических преобразований при статическом и динамическом возбуждении многокомпонентных гетерогенных материалов. Определены и предложены новые критерии и методики электромагнитной диагностики механической прочности, дефектоскопии и оценки напряженно-деформированного состояния строительных материалов. Технические возможности методов проверены на крупногабаритных строительных конструкциях, дан сравнительный анализ их эффективности и преимуществ.

В результате исследований установлено и выносятся на защиту:

1. Характеристики электромагнитной эмиссии при деформации и разрушении многокомпонентных материалов определяются, наряду с движением дислокаций и разрядными явлениями, процессами возбуждения границ раздела матрицы и включения акустическими волнами от развивающихся трещин.

2. Механизм возникновения электромагнитной эмиссии при ударном воздействии, связанный с возбуждением акустической волной двойного электрического слоя на границе раздела включения и матрицы в многокомпонентных строительных материалах.

3. Способы и методики определения механической прочности, оценки напряженно-деформированного состояния, выявления в изделиях участков с пониженной прочностью и дефектоскопии гетерогенных диэлектрических материалов, основанные на принципах пространственного сканирования, спектрального и амплитудного анализа сигналов электромагнитной эмиссии при ударном возбуждении объектов контроля.

Практическая ценность работы и реализация в промышленности:

Проведенные исследования явления электромагнитной эмиссии позволяют:

1. Определять эксплуатационную прочность строительных материалов.
2. Оценивать стадию развития опасных дефектов структуры, проводить оперативный контроль за процессами разрушения.
3. Оценивать напряженно-деформированное состояние эксплуатирующихся конструкций, определять остаточный ресурс их работы.
4. Обнаруживать в гетерогенных материалах дефекты типа трещин, инородных включений, определять наиболее вероятную область зарождения разрушения и трассу прорастания трещин.

Электромагнитный метод определения механической прочности изделий защищен авторскими свидетельствами.

Методики электромагнитной диагностики использовались для определения прочности крупногабаритных строительных конструкций, таких как мосты и путепроводы в Томской и Кемеровской областях. Методика определения трещиноватости дорожного покрытия прошла испытания на дорогах Томской области.

Разработанные в Томском политехническом университете электромагнитные дефектоскопы и методики контроля качества в настоящее время используются в США и Германии. Интерес к разработкам проявили представители фирм Франции, Израиля, Кореи, Сирии. В 1997-98 г.г. по

решению Федеральной дорожной службы России электромагнитные эмиссионные методы контроля качества строительных материалов реализованы в виде автоматизированной экспресс-лаборатории технической диагностики дорог, мостов и путепроводов «Магистраль-1». Лаборатория «Магистраль-1» представлялась на Ганноверской ярмарке'98 (Германия, апрель 1998 г.).

Апробация работы и публикации. По результатам исследований опубликовано 30 научных работ, получено 2 авторских свидетельства на изобретение. Результаты работы докладывались и обсуждались на Всесоюзных конференциях по физике диэлектриков (Караганда 1978 г., Томск 1988 г.); X Всесоюзном симпозиуме по механоэмиссии и механохимии твердых тел (Ростов на Дону 1986г.); Всесоюзном совещании "Электроимпульсная технология и электромагнитные процессы в нагруженных твердых телах" (Томск 1982 г.); Российском научно-техническом семинаре с участием международных специалистов "Перспективы применения физических методов и средств контроля на предприятиях химического и машиностроительного комплексов - 94" (Томск 1994 г.); научно-технической конференции «Проблемы железнодорожного транспорта и транспортного строительства Сибири» (Новосибирск 1997 г.); II Международной научно-технической конференции «Автомобильные дороги Сибири» (Омск 1998 г.) и многих других совещаниях и конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка используемой литературы и приложения. Работа содержит 155 страниц машинописного текста, 65 рисунков, список литературы из 116 наименований. Приложение - 12 страниц.

Автор выражает благодарность к.т.н. В.Ф.Гордееву и Хорсову Н.Н. за методическую помощь в проведении исследований, ценные замечания и консультации при подготовке работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе приводится аналитический обзор электрических эффектов, возникающих при механическом возбуждении различных диэлектрических материалов, рассматриваются возможные механизмы появления электромагнитной эмиссии, обсуждаются перспективы ее использования для контроля механических характеристик строительных материалов, обоснованы задачи исследования.

Как показывает анализ литературы, электромагнитная эмиссия возникает при различных физико-химических процессах, сопровождающихся динамической перестройкой структуры, в т.ч. и при процессах механического разрушения твердых тел. Результаты наших исследований указывают на то, что явление электромагнитной эмиссии открывает уникальные возможности для решения проблем контроля за процессами разрушения твердых тел, дефектоскопии, диагностики прочности, напряженно-деформированного состояния и т.п.

Для повышения эффективности использования любого метода необходимы знания механизмов формирования сигналов и основных закономерностей явления. Результаты ранее выполненных работ не дают достаточно полной информации о процессах, сопровождающих механоэлектрические преобразования энергии. Имеющиеся исследования предполагаемых механизмов и источников электромагнитной эмиссии являются неполными, нет их убедительного экспериментального подтверждения. До проведения настоящих исследований практически не было работ по изучению источников и механизмов механоэлектрических преобразований в сложных многокомпонентных

системах, к которым относится большинство строительных материалов. Отсутствуют результаты по исследованию электромагнитной эмиссии, инициированной ударным возбуждением. В то же время как показано нами, использование именно ударного возбуждения наиболее удобно на практике, дает высокую эффективность и точность контроля. Поэтому в работе было уделено особое внимание изучению источников и механизмов возникновения электромагнитного отклика на ударное возбуждение материалов.

Практическая направленность работы требовала проведение исследований по поиску и разработке электромагнитных критериев контроля механической прочности строительных материалов, их дефектоскопии, напряженно-деформированного состояния, диагностики их качества и работоспособности.

Во второй главе описаны методики и аппаратура для проведения исследований: методика регистрации сигналов электромагнитной и акустической эмиссии, методика определения величины избыточных зарядов, методика оптической регистрации; дана характеристика объектов исследования и обоснован их выбор; приведены результаты исследования возможных механизмов электромагнитной эмиссии при деформации и разрушении диэлектриков.

В качестве объектов исследования, пригодных для решения конкретных технических задач, были использованы строительные материалы, для которых наиболее остро стоит проблема определения их механических эксплуатационных характеристик. Среди выбранных материалов большое внимание уделено цементобетонам и асфальтобетонам, в связи с их большой практической значимостью. Это типичные представители многокомпонентных гетерогенных материалов, в которых источники и механизмы эмиссии должны были иметь свои особенности. Бетоны также удобны и с точки зрения простоты изготовления различных модельных образцов. Там где это было необ-

ходимо, часть исследований выполнена на более простых, модельных объектах, в частности, на монокристаллах.

Применявшаяся аппаратура имела частотный диапазон сигналов, принимаемых каналом электромагнитной эмиссии, в пределах от 1,3 кГц до 500 кГц; каналом акустической эмиссии от 500 Гц до 230 кГц при чувствительности не менее 60 мкВ (по каждому каналу) и позволяла измерять число импульсов электромагнитной и акустической эмиссии, превысивших порог срабатывания, интенсивность эмиссии, следить за протеканием во времени процессов, оцифровывать форму аналоговых сигналов при различных частотах оцифровки, рассчитывать спектральные характеристики сигналов методом быстрого Фурье-преобразования. Используемые оптические приборы позволяли получать разрешение по размерам исследуемого объекта до 0.5 мкм. Чувствительность использованной методики определения величины избыточных зарядов не хуже 10^{-10} Кл/м². Для возбуждения эмиссии использовались механические и электромеханические ударные устройства с нормированным ударом различной силы. Квазистатическое нагружение и разрушение материалов осуществлялось по стандартным методикам, в соответствии с действующими ГОСТами.

В строительных материалах, представляющих из себя структуру, состоящую из основной матрицы (вяжущего) и включения (заполнителя в виде зерен гравия или щебня), в зависимости от того, каким образом происходит разрушение (по включению, по матрице или по зоне контакта включения с матрицей), будут реализовываться механизмы генерирования электромагнитной эмиссии, присущие определенному элементу их структуры.

Исследования источников и механизмов электромагнитной эмиссии при деформации и разрушении таких структур начаты с изучения амплитудных распределений электромагнитных сигналов на различных стадиях деформации кристаллов LiF, являющихся простейшей моделью поликристаллических материалов. Показано, что на всех стадиях деформации кристаллов

LiF от стадии макроупругой деформации до стадии макроскопического разрушения присутствуют два максимума в амплитудном распределении. Это указывает на существование двух типов источников электромагнитной эмиссии. Наличие этих максимумов на всех стадиях деформации, в том числе и на ранних, свидетельствует о том, что они не связаны с трещинами. На стадии легкого скольжения установлено возрастание первого максимума, а при переходе в стадию упрочнения и последующей деформации его уменьшение. Кинетика изменения этого максимума хорошо коррелирует с поведением дислокаций и полос скольжения в кристаллах на различных стадиях деформации. Увеличение второго максимума в амплитудном распределении электромагнитных сигналов с ростом степени деформации согласуется с литературными данными по изменению механолюминесценции, появление которой авторы связывают с разрядными явлениями. На основании выполненного анализа сделан вывод о взаимосвязи первого максимума с движением заряженных дислокаций в кристаллах, а второго с разрядными явлениями на дефектах структуры и поверхности образца.

В кристаллах LiF установлено появление электромагнитной эмиссии в момент роста трещин скола. Для выяснения механизмов генерации эмиссии проведено исследование временных характеристик электромагнитных полей, появляющихся в момент прорастания трещин, и их сравнение с кинетикой заряжения плоскостей скола. На основании высокой корреляционной связи сделан вывод о генерации электромагнитной эмиссии заряженными поверхностями растущей трещины.

Предложенные механизмы механоэмиссии проверены и на более сложных строительных материалах. При квазистатическом нагружении бетонов, на различных стадиях их деформации и разрушения выявлено три наиболее характерных вида сигналов электромагнитной эмиссии: малоамплитудные импульсы с частотой порядка (30-50) кГц, низкочастотные колебательные с частотой (10-20) кГц и одиночные импульсы с крутым передним фронтом

Сигналы первого вида наблюдаются, в основном, на начальных этапах нагружения бетонов. Как правило, они не сопровождаются импульсами акустической эмиссии, следовательно, не могут быть связаны с процессами развития трещин. Так же как и в кристаллах их появление может быть связано с движением дислокаций в кристаллических компонентах бетона, развитием начальных стадий зарождения разрушения на микроскопическом уровне.

Низкочастотные колебательные сигналы регистрируются на стадии трещинообразования и разрушения. Как правило, они возникают синхронно с появлением акустического сигнала. Сопоставление и анализ амплитудных и частотных характеристик, моментов появления акустической и электромагнитной эмиссии позволили сделать вывод о генерировании электромагнитных импульсов заряженными поверхностями трещины в актах их прорастания. На стадиях трещинообразования регистрируются также импульсы, форма и спектральные характеристики которых аналогичны импульсам, возникающим при ударном возбуждении строительных материалов. Как показано в третьей главе диссертации эти импульсы связаны с возбуждением границы раздела матрицы и включения упругой волной, возникающей при ударе. В случае статического и квазистатического нагружения акустические волны создаются непосредственно процессами прорастания трещин.

Одиночные импульсы с резким передним фронтом наблюдаются преимущественно на заключительных стадиях трещинообразования и связаны с разрядными явлениями. Этот вывод обосновывается установленными в работе аналогиями в форме сигналов и их спектрах с сигналами, зарегистрированными в экспериментах по моделированию разрядов.

Третья глава посвящена исследованию источников и механизмов межаэлектрических преобразований в бетонах и его компонентах при ударном возбуждении.

Как известно из практики, разрушение многокомпонентных гетерогенных структур, состоящих из вяжущей основы и заполнителя, чаще всего про-

исходит по контакту матрицы и заполнителя. Поэтому положительные результаты при разработке методов контроля прочности многокомпонентных структур возможны были только при условии выявления взаимосвязи процессов генерации электромагнитной эмиссии с границами разделов отдельных компонентов. До постановки этих работ не проводилось исследований источников и механизмов электромагнитной эмиссии при ударном возбуждении. Сложность физических процессов, происходящих при ударном возбуждении многокомпонентных структур потребовала проведения большого количества модельных экспериментов с использованием различных типов искусственных и естественных включений с различным характером адгезионных связей.

В модельных экспериментах на цементном камне путем замены включения из гравия на пьезоэлемент удалось показать определяющую роль внутреннего источника в генерировании электромагнитного сигнала при ударном возбуждении бетонов. Синхронно регистрировался сигнал непосредственно с обкладок пьезоэлемента, находящегося внутри образца, и сигналы электромагнитной и акустической эмиссии приемниками, расположенными на внешней поверхности образца в непосредственной близости друг от друга. Анализировались временные задержки этих сигналов. Показано, что сигнал с обкладок пьезоэлемента и сигнал электромагнитной эмиссии появляются одновременно, а сигнал с акустического датчика, регистрирующего колебания на поверхности, появляется позже на несколько десятков микросекунд (разрешение аппаратуры по времени - 1мксек). Сравнение спектральных характеристики сигналов показывает, что спектральные плотности сигналов от пьезоэлемента и электромагнитного сигналов практически совпадают, что говорит об едином источнике этих сигналов. Спектральные плотности акустического и электромагнитного сигналов различаются. Это свидетельствует о более сложных процессах механоэлектрических преобразований на внутреннем источнике по сравнению с колебательными процессами поверхности

образца. Проведенные теоретические расчеты электрической схемы замещения цепи сигнала акустоэлектрических преобразований, используемой нами схемы эксперимента, подтвердили, что вклад поверхностных колебаний в регистрируемый электромагнитный сигнал практически отсутствует. Аналогичная картина задержки во времени сигналов электромагнитной и акустической эмиссии, различий их амплитудно-частотных характеристик наблюдается и при испытании модельных образцов с включением в виде единичного зерна гравия и на стандартных образцах бетона, содержащих большое количество включений в виде зерен заполнителя.

На последующих этапах работы, с целью более детальной проработки механизмов электромагнитной эмиссии, проведены исследования влияния акустоэлектрических свойств включения, их размеров, количества, качества адгезионного контакта включения и цементной матрицы на параметры электромагнитного отклика при ударном возбуждении бетонов.

Эксперимент по исследованию влияния размеров включения на эффективность механоэлектрических преобразований (МЭП) выполнен на специально изготовленных образцах цементного камня, в каждый из которых были помещено по одному включению разного геометрического размера. Показано, что амплитуда (A) электромагнитного отклика в бетонах увеличивается с увеличением площади поверхности плоскопараллельного включения (S) по закону $A = -14,4 + 9,3 \cdot S^{0.5}$. Важно подчеркнуть, что полученная зависимость справедлива не только для диэлектрических, но и металлических включений. Следовательно, определяющую роль в генерировании электромагнитной эмиссии в бетонах имеют не столько свойства самого заполнителя, сколько размер включения.

Влияние адгезионной связи на параметры эмиссии оценена в серии экспериментов. Наиболее простой эксперимент заключался в искусственном ухудшении контакта гравий - цементная матрица путем предварительной смазки гравия маслом на стадии изготовления образцов. Показано, что

ухудшение качества контакта, при прочих равных условиях, приводит к повышению амплитуды электромагнитного отклика в несколько раз. В более сложных экспериментах на основе оптических измерений показано, что размеры контактной зоны матрицы и включения различаются для включений с различной эффективностью МЭП. Зерна гравия, дающие большую амплитуду сигналов эмиссии до их вложения в образец, образуют в бетоне более отчетливую границу раздела с цементным камнем по сравнению с границей для гравия с малой амплитудой исходного сигнала. Ширина контактной зоны, наблюдаемая в микроскоп, для таких включений различается в 1,5-2 раза. Следовательно, механоэлектрические свойства заполнителя влияют на качество адгезионного контакта матрицы и включения. Этот вывод проверен на образцах бетона специально приготовленных путем предварительной сортировки гравия на две группы с высокой и низкой излучательной способностью. Бетоны изготовленные из гравия с низкой эффективностью МЭП имеют в 1,5-2 раза большую прочность, по сравнению с бетонами, в которые помещены зерна заполнителя с высокой эффективностью МЭП. Следовательно, механоэлектрические свойства заполнителя влияют на образующиеся в процессе изготовления бетонов адгезионные связи и, как следствие, эффективность механоэлектрических преобразований при ударном возбуждении.

Эти эксперименты позволяют также сделать важный практический вывод о том, что путем сортировки заполнителя по его механоэлектрическим свойствам можно изменять прочность бетонов.

В реальных материалах должно существовать большое число потенциальных источников сигналов электромагнитной эмиссии. Проведены исследования по влиянию формы включения и их количества на параметры электромагнитного отклика. Показано, что в спектральной плотности электромагнитного отклика с увеличением количества включений увеличивается число полос. Следовательно, по спектральным характеристикам отклика можно судить о количестве источников электромагнитной эмиссии в

конструкционных диэлектриках, а следовательно и о дефектности объекта контроля.

На основе выполненных комплексных исследований предложен следующий механизм механоэлектрических преобразований в бетонах: на границе матрицы и включения образуется двойной электрический слой. При динамическом возбуждении, под действием упругих волн, происходит изменение дипольного момента двойного электрического слоя и, как следствие, появление сигналов электромагнитной эмиссии. Изменение величины дипольного момента определяется, в основном, условиями прохождения акустической волны, размерами контактных зон и качеством адгезионных связей, что и определяет высокую чувствительность метода к прочностным свойствам бетона.

В четвертой главе приведены результаты исследований по разработке электромагнитных критериев определения прочности и дефектоскопии строительных материалов.

Проведенные исследования источников и механизмов электромагнитной эмиссии многокомпонентных гетерогенных материалов позволили

разработать критерий оценки прочности бетонов, включающий в себя амплитудные и частотные характеристики электромагнитного отклика на ударное возбуждение. На образцах бетона показана возможность неразрушающего электромагнитного контроля прочности (рис.1). Коэффициент корреляции между амплитудно-



Рис.1. Градуировочная зависимость для определения прочности образцов бетона по амплитудно-частотным параметрам электромагнитного отклика.

частотным параметром электромагнитного отклика и прочностью образцов бетонов составил 0.86. Проведенный сравнительный анализ точности предложенного способа контроля с ультразвуковым методом и широко используемым в настоящее время методами склерометрии показал более высокую точность метода электромагнитной диагностики.

В отличие от цементобетонов, прочность асфальтобетонов существенным образом зависит от их вязкости. Установлено, что вязкость асфальтобетонов влияет не только на амплитуду электромагнитного отклика, но и на его затухание. На основании выполненных исследований впервые предложен электромагнитный критерий определения прочности асфальтобетонов. Показано, что наибольшая точность контроля прочности асфальтобетонов достигается при использовании критерия, включающего в себя как амплитуду, так и затухание электромагнитного отклика. Результаты, полученные на трех партиях образцов асфальтобетонов, отличающихся составом, ложатся на одну и ту же зависимость. Эта особенность достаточно привлекательна при использовании электромагнитного эмиссионного метода для контроля прочности покрытий на уже действующих автодорогах, когда состав покрытия не всегда известен.

Предложенные способы контроля реализованы в виде отдельных технических решений и программного обеспечения в автоматизированной экспресс-лаборатории «Магистраль-1» и апробированы в натурных условиях при обследовании мостов, путепроводов и железобетонных дорожных покрытий Томской, Тюменской и Кемеровской области. Способы контроля механической прочности изделий защищены авторскими свидетельствами, разработан сертификат на электромагнитный эмиссионный метод определения прочности бетона.

Разрушение большинства конструкционных материалов определяется процессами развития трещин хрупкого разрушения. При этом ответственным за разрушение не всегда являются трещины с максимальными размерами

Значение имеют форма трещины, ориентация по отношению к действующим напряжениям, форма вершины и другие факторы. Существующие методы дефектоскопии не обеспечивают получение необходимой информации о наличии дефектов и их опасности при работе конкретного изделия или конструкции. В связи с этим значительная часть диссертационной работы была направлена на изучение технических возможностей электромагнитных эмиссионных методов дефектоскопии.

При сканировании электромагнитной эмиссии по поверхности образцов бетона с видимыми трещинами хрупкого излома, установлено, что повышенные значения амплитуды отклика на ударное возбуждение наблюдаются на всех участках выхода трещин на поверхность бетона. Уже этот факт указывает на возможность дефектоскопии бетонов электромагнитной эмиссии. Во многих случаях аномальные значения амплитуды электромагнитного отклика наблюдаются и на участках поверхности, где нет видимых трещин, раковин и выхода на поверхность элементов включения. Это может быть связано с наличием внутренних, скрытых дефектов структуры, и не только трещин, но и включений, пор и других нарушений структуры материала.

Оценка этих возможностей проверена на модельных образцах, состоящих из цементной матрицы и одного зерна заполнителя, помещенного в эту матрицу. Методом электромагнитного сканирования изучена топография распределения амплитуды электромагнитного отклика по поверхностям таких модельных объектов. Типичная картина распределения амплитуды электромагнитного отклика по одной из поверхностей такого образца приведена на рис.2.

Повышенные значения амплитуды электромагнитного отклика при ударном возбуждении (более темная область) регистрируются над участком поверхности, под которым в глубине образца находится включение. При последующем нагружении этого образца развитие разрушения, как правило, происходило по контакту цементной основы и включения.

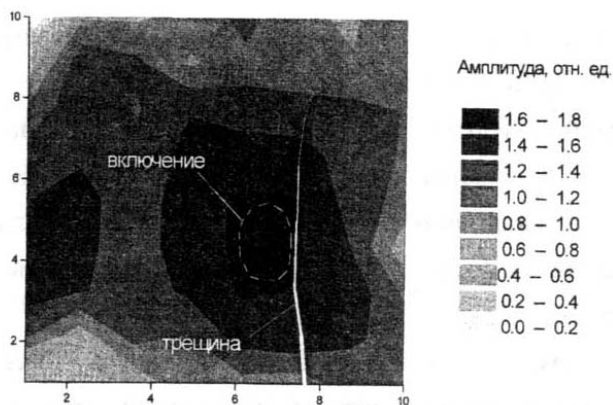


Рис.2. Результаты сканирования амплитуды сигнала по поверхности образца бетона с единичным включением и трасса прорастания трещины при последующем механическом нагружении (пунктирной линией показано расположение включения, находящегося на глубине 4 см от поверхности образца).

В стандартных образцах бетона, имеющих в своем составе большое количество зерен заполнителя, наблюдается более сложная картина распределения амплитуды при электромагнитном сканировании, однако, и в этом случае разрушение происходит преимущественно вблизи участков, обладающих высокой эффективностью механоэлектрических преобразований. На основе сканирования удавалось по

изменению амплитуды электромагнитной эмиссии с высокой достоверностью предсказывать области наиболее вероятного развития разрушения и в бетоне и в железобетоне.

Таким образом, показаны возможности метода электромагнитного сканирования не только для решения задачи выявления видимых и скрытых нарушений структуры (трещин, инородных включений), но и других особенностей внутреннего строения и, что особенно важно, выявлять начальные стадии зарождения разрушения, обнаруживать участки с пониженными значениями механической прочности. Такими возможностями обнаружения наиболее опасных участков строительной конструкции, по-видимому, не обладает ни один из существующих методов неразрушающего контроля.

Выявленные механизмы и закономерности механоэмиссии в строительных материалах позволяют предложить ряд новых перспективных направлений практического использования явления электромагнитной эмиссии.

Пятая глава посвящена вопросам использования электромагнитной эмиссии для оценки напряженно-деформированного состояния строительных материалов и трещиноватости асфальтобетонных покрытий.

Показано, что изменение напряженно-деформированного состояния бетонов приводит к изменению спектральных характеристик электромагнитного отклика. Установлено снижение интегральной спектральной амплитуды в диапазоне частот от 0.6 кГц до 12 кГц, в котором находится подавляющее большинство полос спектра электромагнитного отклика, с увеличением механических напряжений в бетоне (рис.3). Найденная закономерность может использоваться для оценки напряженно-деформированного состояния конструкций.

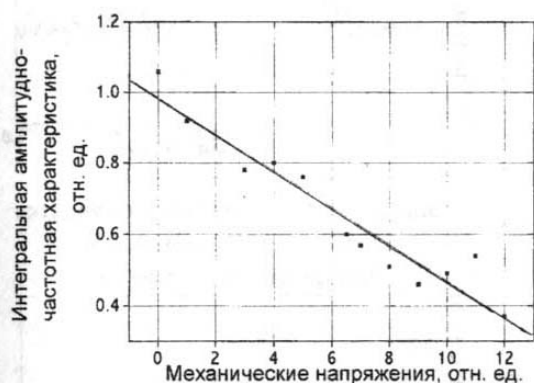


Рис.3. Зависимость интегральной спектральной амплитуды электромагнитного отклика от величины механических напряжений в бетонной балке.

Предложен способ оценки трещиноватости покрытий на основе ударного устройства и системы разнесенных в пространстве датчиков электромагнитной эмиссии. Сущность способа и результаты измерений приведены на рис. 4. Как видно из приведенного рисунка, сигналы, регистрируемые датчиками, существенно различаются в зависимости от того, имеется или не имеется трещина между приемником эмиссии и ударным устройством. Показано, что с увеличением эффективных размеров трещины (произведение глубины трещины на ширину ее раскрытия) происходит пропорциональное из-

менение разницы между амплитудами сигналов, регистрируемых датчиками 1 и 2.

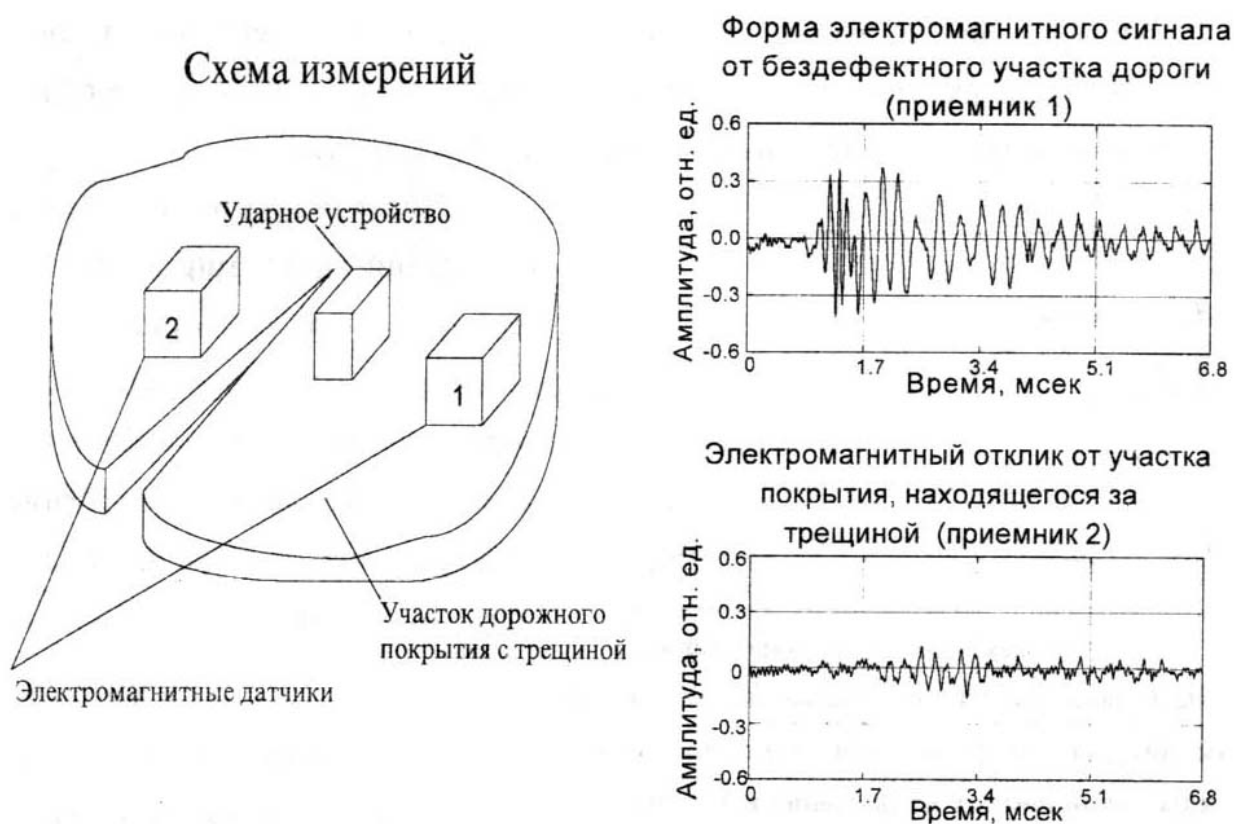


Рис. 4. Пример обнаружения трещин в асфальтобетонном покрытии дороги.

Электромагнитный способ обнаружения и подсчета числа трещин в дорожном покрытии, оценки их эффективных размеров реализован в передвижной лаборатории «Магистраль-1». Контроль покрытия в продольном и поперечном направлениях дороги осуществляется системой датчиков электромагнитной эмиссии в процессе движения автомобиля. Сигналы электромагнитной эмиссии в покрытии возбуждаются специальным ударным устройством с нормированной силой удара. Метод и устройств контроля апробированы на асфальтобетонных дорожных покрытиях Томской области.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Показана связь процессов генерации электромагнитной эмиссии при деформации и разрушении гетерогенных материалов с процессами движения дислокаций, разрядными явлениями и процессами возбуждения границ раздела матрицы и включения акустическими волнами от развивающихся трещин.

2. При ударном возбуждении многокомпонентных гетерогенных диэлектриков амплитуда электромагнитного сигнала определяется преимущественно геометрическими размерами включения и качеством его связи с матрицей.

3. Предложен механизм генерации электромагнитных сигналов, связанный с возбуждением ударной волной двойного электрического слоя на контакте включения и матрицы. Величина дипольного момента такого слоя определяется условиями прохождения акустической волны, размерами контактной зоны и силой адгезионных связей, что и определяет высокую чувствительность метода к прочностным свойствам бетона.

4. Разработаны новые критерий и способы оценки прочности строительных материалов по характеристикам сигналов электромагнитной эмиссии при их ударном возбуждении. Предложенные способы превосходят по точности применяющиеся методы контроля. Методы прошли апробирование на действующих мостах, путепроводах и дорожных покрытиях Томской, Тюменской и Кемеровской областей.

5. Показана возможность использования принципов электромагнитного сканирования для выявления в объекте контроля трещин, инородных включений, участков с пониженными значениями механической прочности.

6. Показано, что спектральные характеристики электромагнитной эмиссии зависят от напряженно-деформированного состояния бетонных конструкций и могут быть использованы для оценки остаточного ресурса их работы.

7. Предложен новый метод обнаружения и оценки размеров трещин в дорожных покрытиях. Оценка размеров трещин осуществляется по разности амплитуд электромагнитных сигналов, зарегистрированных разнесенными в пространстве датчиками электромагнитной эмиссии.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

1. Малышков Ю.П., Гордеев В.Ф., Дмитриев В.П., Смирнов В.А., Фурса Т.В., Ульченко В.И. Закономерности генерирования электромагнитного сигнала твердыми телами при механическом воздействии //ЖТФ. - 1984,- т. 54, вып.2. -С. 336-341.
2. Воробьев А.А., Малышков Ю.П., Гордеев В.Ф., Фурса Т.В. и др. Способ неразрушающего контроля прочности изделий // Бюлл. изобр - 1982.-№ 20.- Авт. свид. № 932352.
3. Малышков Ю.П., Фурса Т.В., Гордеев В.Ф. и др. Способ неразрушающего контроля прочности изделий // Бюлл. изобр. - 1988,- № 29,- Авт. свид. № 1415116.
4. Воробьев А.А., Гордеев В.Ф., Малышков Ю.П., Фурса Т.В., Дмитриев В.П., Смирнов В.А., Рыбалкин Н.М. Импульсное электромагнитное излучение силикатных стекол при симметричном изгибе//Стекло и керамика. -1978.- №10.-С.10-11.
5. Малышков Ю.П., Гордеев В.Ф., Фурса Т.В. Электромагнитная релаксация механического возбуждения хрупких диэлектриков и ее практическое использование // Физика диэлектриков и новые области их применения :Тезисы докладов Всесоюзной конференции. -Караганда , 1978.
6. Гордеев В.Ф., Малышков Ю.П., Чахлов В.Л., Фурса Т.В., Биллер В.К., Елисеев В.П. Электромагнитная эмиссия диэлектрических материалов при статическом и динамическом нагружении // ЖТФ. - 1994. - т. 64, вып. 4. -С. 57-67.

7. Чахлов В.Л., Малышков Ю.П., Гордеев В.Ф., Фурса Т.В., Чахлов Б.В., Картопольцев В.М. Электромагнитная эмиссия бетонов при ударном нагружении // Изв. вузов, с. «Строительство». - 1995. - № 5-6. - С. 54-58.

8. Малышков Ю. П., Фурса Т. В., Гордеев В. Ф., Картопольцев В. М., Черных Г. Ф. Источники и механизмы электромагнитной эмиссии в бетонах// Изв. ВУЗов, с. "Строительство". - 1996. - № 12. - С. 31-37.

9. Фурса Т.В. Амплитудное распределение электромагнитных сигналов при деформации LiF /Томский политехн. университет-Томск,1986, - 6с./Деп. в ВИНТИ, №804-В 86.

10. Головин Ю.И., Фурса Т.В. Влияние заряда поверхности на излучение электрических импульсов// Изв. ВУЗов, с. «Физика». - 1987. - № 10.

11. Малышков Ю. П., Гордеев В. Ф., Фурса Т. В., Шталин С. Г., Картопольцев В. М. Применение электромагнитной эмиссии для контроля железобетонных сооружений и мостов // Изв. ВУЗов, с.«Строительство». - 1995. - № 5. - С. 3-7.

12. Фурса Т.В., Гордеев В.Ф., Малышков Ю.П., Шталин С.Г., Эфа А.К., Тютеньков Ю.С., Черных Г.Ф. Электромагнитная эмиссия асфальтобетонов при динамическом нагружении // Наука и техника в дорожной отрасли. - 1997.- №2.-С. 6-7.

13. Фурса Т. В., Ласуков В. В., Малышков Ю. П., Гордеев В. Ф., Картопольцев В. М. К вопросу об источниках электромагнитной эмиссии в бетонах // Изв. ВУЗов, с. «Строительство». - 1997. - № 10.

14. Фурса Т.В., Гордеев В.Ф., Ласуков В.В., Малышков Ю.П. Источники электромагнитной эмиссии в бетонах // Письма в ЖТФ.- 1994.- том 20, вып. 21.-С. 1-5.

15. Фурса Т.В., Малышков Ю.П., Стариков А.Н. Электромагнитная дефектоскопия бетонов// Автомобильные дороги Сибири; Тезисы докладов II Международной научно-технической конференции. - Омск, 1998. - С. 385-387.

16. Малышков Ю.П., Фурса Т.Н., Гордеев В.Ф., Шталин С.Г. Дефектоскопия и оценка напряженно-деформированного состояния бетона по параметрам электромагнитной эмиссии// Изв. ВУЗов, с.«Строительство».- 1997.- №12.-С. 114-117.

17. Фурса Т. В., Шталин С. Г., Малышков С.Ю. Электромагнитный метод неразрушающего контроля бетонов и конструкций из них // Проблемы железнодорожного транспорта и транспортного строительства Сибири: Тез. докл. научно-технической конференции. - Новосибирск, 1997. - С. 205.