ΡΕΦΕΡΑΤ

Выпускная квалификационная работа 116 с., 25 рис., 17 табл., 69 источников, 1 прил.

Ключевые слова: мультисенсорная система контроля, механоэлектрические преобразования, электромагнитный отклик, напряжённодеформированное состояние, одноосное сжатие, дефектность.

Объектом исследования является мультисенсорная система контроля, основанная на явлении механоэлектрических преобразований.

Целью работы является разработка мультисенсорной системы контроля дефектности и напряженно-деформированного состояния на основе явления механоэлектрических преобразований и проведения исследований для оценки ее возможностей.

Научная новизна работы заключается в следующем: на основе явления механоэлектрических преобразований реализован новый подход к созданию высокочувствительной аппаратуры контроля дефектности и напряженнодеформированного состояния, заключающейся в накоплении полезного сигнала при многократных импульсных возбуждениях и возможности получения пространственно-временных характеристик откликов.

В процессе исследования проводились: анализ отечественной и зарубежной литературы, изучение методик статического, динамического и акустического воздействий, экспериментальные исследования образцов из эпоксидной смолы с песчаным наполнением и цементно-песчаных образов при механоэлектрическом воздействии.

В результате исследования были проанализированы электромагнитные сигналы, полученные при механоэлектрическом воздействии на образцы, а также был разработан действующий макет мультисенсорной системы.

Основные конструктивные, технологические и техникоэксплуатационные характеристики: образцы имели форму параллелепипеда с размерами: длина 305 мм, ширина 200 мм, высота 115 мм.

Степень внедрения: внедрен, создан действующий макет.

Область применения: диагностика материалов по степени дефектности, напряженно-деформированного состояния и возможность локализации неоднородностей в виде включений в диэлектрических объектах контроля.

Экономическая эффективность/значимость работы: экономический эффект выражается в экономии при разработке мультисенсорной системы контроля, основанный на явлении механоэлектрических преобразований.

В будущем планируется продолжить исследование по поиску информативных параметров отклика на импульсное возбуждение при использовании мультисенсорной системы контроля дефектности и напряжённодеформированного состояния диэлектрических материалов.

оглавление

Введение
1 Неразрушающие методы контроля структурных нарушений7
1.1. Методы, основанные на явлении акустической эмиссии
1.2. Ультразвуковые методы контроля
1.3. Метод контроля на основе электромагнитной эмиссии10
1.4. Метод контроля на основе механоэлектрических преобразований13
1.5. Состояние вопроса и задачи исследования
2 Разработка лабораторного макета мультисенсорной системы контроля
2.1 Предпосылки к созданию аппаратуры19
2.2 Описание макета
3 Исследование возможности использования мультисенсорной системы для контроля напряженно-деформированного состояния
3.1 Оценка спектральной чувствительности метода механоэлектрического преобразования при контроле напряженно-деформированного состояния по математической модели
3.2 Исследование возможности использования фазовых характеристик аналитического сигнала отклика при механоэлектрических преобразованиях для контроля напряженно-деформированного состояния
3.3 Исследование чувствительности мультисенсорной системы контроля к степени напряженно-деформированного состояния диэлектрических материалов
4 Исследование возможности использования мультисенсорной системы контроля для локализации макродефектов (режим томографа)40
4.1 Описание экспериментальной установки40
4.2 Экспериментальные исследования42
4.3 Анализ экспериментальных данных46
Заключение51
Приложение А

Введение

(МЭП) Впервые метод механоэлектрических преобразований ЛЛЯ контроля структурных нарушений в композитных диэлектрических материалов начал разрабатываться в Томском политехническом университете в начале 70ых годов [1]. Суть метода заключается в производстве импульсного возбуждения диэлектрического образца механического И приема электромагнитного сигнала. Параметры электромагнитного поля регистрируют в виде сигнала отклика с помощью емкостных датчиков, расположенных вблизи поверхности образца.

Метод МЭП похож по типу на УЗ методы. Разница заключается в том, в УЗ методе сигнал регистрируется контактными что акустическими преобразователями, а в методе МЭП сначала происходит преобразование акустической энергии в электромагнитное поле на источниках МЭП (двойные электрические слои на границах раздела разнородных материалов. пьезоэлектрические включения), а затем в электрический сигнал с помощью емкостных датчиков. Одним ИЗ преимуществ метода МЭП является бесконтактный прием сигналов, что снижает проблему надежности контакта.

Настоящая работа посвящена повышению чувствительности метода механоэлектрических преобразований путем разработки мультисенсорной системы контроля, которая позволит исследовать малые изменения дефектности и напряженно-деформированного состояния композиционных диэлектрических материалов под действием нагрузки одноосного сжатия.

Под руководством доктора физико-математических наук Анатолия Петровича Суржикова коллективами Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Института неразрушающего контроля (ПНИЛ ЭДиП ИНК) Томского политехнического университета, и Специального конструкторского бюро "Смена" (СКБ "Смена") Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники выполняются исследования, разработка и создание методов диагностики дефектности и прочности материалов, изделий и природных сред,

основанных на анализе параметров электромагнитных ОТКЛИКОВ при акустическом возбуждении контролируемых объектов. Исследования проводятся с использованием метода, основанного на явлении механоэлектрического преобразования.

Целью работы является разработка мультисенсорной системы контроля дефектности и напряженно-деформированного состояния на основе явления механоэлектрических преобразований и проведения исследований для оценки ее возможностей.

Личный вклад автора. Совместно с руководителем автор принимал участие в формулировании целей и задач исследований, принимал активное участие в разработке и изготовлении макета мультисенсорной системы, проводил эксперименты и обработку данных измерений, обобщал полученные результаты. Принимал участие в написании статей, и представлял результаты исследований на всероссийских и международных конференциях.

Научно-практическая значимость состоит в возможности использования мультисенсорной системы для исследования композиционных диэлектрических материалов в условиях внешних помех.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (Томск, 2014), на XI Межвузовской школе-семинаре студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов отраслевых предприятий «Неразрушающий контроль И техническая диагностика» (Томск, 2014), на II Международной научной конференции "Иностранный язык в контексте проблем профессиональной коммуникации" (Томск, 2015), на V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность» (Томск, 2015), на IV Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле:

взгляд в будущее» (Томск, 2015), на VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность» (Томск, 2016).

1 Неразрушающие методы контроля структурных нарушений

1.1. Методы, основанные на явлении акустической эмиссии

Акустической эмиссией принято называть излучение акустических волн, сопровождающее некоторые виды необратимых превращений в твердом теле. Различают три основных типа механизмов этой эмиссии: 1) механизмы, связанные с пластической деформацией (движение дислокаций, скольжение границ доменов в ферромагнетиках и сегнетоэлектриках и т. п.); 2) фазовые переходы, в частности мартенситные превращения в стали; 3) образование и развитие трещин [3].

Схема эксперимента по наблюдению эмиссии следующая.

Волны, возбуждаемые развивающимся дефектом (источником эмиссии), претерпевая различные изменения на границах образца и на других статических (чаше неоднородностях, достигают приемника звука всего ЭТО пьезоэлектрический преобразователь), электрический сигнал с которого обычно поступает на схему обработки. Снимаемый с пьезопреобразователя сигнал имеет вид случайной последовательности радиоимпульсов, соответствующих отдельным событиям — вспышкам акустической эмиссии. Центральная частота определяется резонансными свойствами радиоимпульсов В основном преобразователя. Простейший принцип обработки сигнала эмиссии, применяемый в большинстве существующих методик, состоит в следующем: радиоимпульс после усиления попадает на пороговое устройство, выделяющее его на фоне посторонних шумов.

Это же пороговое устройство формирует из радиоимпульса последовательность видеоимпульсов счета, которые затем поступают на счетные устройства. Несмотря на то, что такая схема обработки использует лишь небольшую часть информации, удается сделать ряд важных физических наблюдений.

Практические применения акустической эмиссии чрезвычайно разнообразны. Однако главной областью применения акустической эмиссии в настоящее время является неразрушающий И оперативный контроль инженерных конструкций и сооружений. Основным достоинством методов неразрушающего контроля с использованием акустической эмиссии, делающих их особенно ценными, является тот факт, что эта эмиссия сопровождает только развивающиеся, т. е. наиболее опасные дефекты. Другая привлекательная сторона применения акустической эмиссии связана с тем, что источником звука, и притом довольно мощного, в этом случае являются сами дефекты, благодаря чему задача обнаружения и локализации дефекта (источника значительно облегчается. Большая практическая акустической эмиссии) исследований ценность акустической эмиссии вызвала рост В ЭТОМ направлении, главным образом экспериментальных [4], в результате чего за относительно короткий период времени методы контроля, основанные на акустической эмиссии, получили широкое распространение в тех областях, где выход изделия из строя влечет за собой катастрофическое разрушение.

К наиболее важным областям использования акустической эмиссии относятся ядерная энергетика [6].

1.2. Ультразвуковые методы контроля

Ультразвуковые методы контроля (УЗ) получили широкое распространение для обнаружения дефектов и их визуализации [7].

Методы УЗ контроля относится к активным акустическим методам и делятся на подгруппы: методы, использующие прохождение, отражение волн, и комбинированные методы, в которых применяют как отражение, так и прохождение. Методы прохождения предполагают наличие двух преобразователей — излучающего и приемного, — расположенных по разные стороны объекта контроля или контролируемого его участка. К этой подгруппе относят следующие методы дефектоскопии. Теневой (или амплитудно-теневой) метод, основанный на регистрации уменьшения амплитуды прошедшей волны (так называемого сквозного сигнала) под влиянием дефекта. Применяют как импульсное, так и (реже) непрерывное излучение.

Временной теневой метод, основанный на измерении запаздывания импульсов, вызванного огибанием дефекта.

В методах отражения используют как один, так и два преобразователя; применяют, как правило, импульсное излучение. К этой подгруппе относят следующие методы дефектоскопии.

Эхометод основан на регистрации эхосигналов от дефектов. По времени прихода импульсов судят о глубине залегания дефекта и толщине объекта контроля.

Эхозеркальный метод, в котором анализируют сигналы, испытавшие зеркальное отражение от донной поверхности объекта контроля и дефекта.

Реверберационный метод основан на анализе времени объемной реверберации — процесса постепенного затухания звука в некотором объеме контролируемом объекте. Например, при контроле двухслойной конструкции время реверберации в слое, с которым контактирует преобразователь, будет меньше в случае доброкачественного соединения слоев, так как часть энергии будет переходить в другой слой.

В комбинированных методах используют принцип регистрации эхосигналов от дефектов. На экране индикатора обычно наблюдают посланный (зондирующий) импульс, импульс, отраженный от противоположной поверхности (дна) объекта контроля (донный сигнал), и эхосигнал от дефекта.

Перечисленные УЗ методы контроля предназначены для обнаружения и определения местоположения дефектов в ОК.

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 [8 - 11].

По измерениям фазовых скоростей акустических волн в широком частотном диапазоне производится расчет упругих модулей твердых тел, в частности, анизотропных композиционных материалов [12, 13].

Характерные размеры неоднородностей структуры конструкционных материалов лежат в диапазоне от единиц до сотен микрометров [15].

Поэтому для измерения затухания и фазовой скорости ультразвуковых волн в таких материалах необходимо применять широкополосные акустические импульсы, имеющие спектральный диапазон от долей до десятков мегагерц. В диапазоне величина коэффициента затухания ЭТОМ ультразвука может [14], обратных сантиметров поэтому достигать десятков амплитуда зондирующих импульсов должна быть достаточно большой для обеспечения диагностики изделий толщиной до нескольких сантиметров.

Обеспечение приемлемых параметров возбуждающего импульса возможно при использовании лазерного термооптического возбуждение звука.

Был разработан [15] лазерный ультразвуковой метод на основе импульсного оптико-акустического эффекта, который позволяет осуществлять неразрушающую локальную диагностику механических и акустических свойств композиционных материалов по фактическому состоянию. Такая диагностика является необходимой на этапе отработки и совершенствования технологии изготовления материала, а также для выявления «слабых» мест с меньшей прочностью в материале перед изготовлением деталей и изделий.

1.3. Метод контроля на основе электромагнитной эмиссии

Было установлено, что при хрупком разрушении диэлектриков возникает электромагнитное излучение [16 - 19].

Разработкой методов контроля с использованием явления электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) было начато в Томском политехническом институте группой сотрудников под руководством А.А. Воробьева [20 - 22].

Была высказана гипотеза, согласно которой возникновение и рост трещин должны сопровождаться излучением импульсов электромагнитной природы. Эти работы дали толчок к исследованиям физики процесса ЭМЭ. В настоящее время существует около тринадцати гипотез возникновения ЭМЭ. Согласно основным из них, импульсы ЭМЭ могут возникать вследствие эмиссии электронов с берегов растущей трещины [17 - 19], благодаря неравномерному (ускоренному) движению зарядовой мозаики по берегам растущей трещины [19, 23], при нарушении связей двойных электрических слоев вблизи поверхности разрыва [24, 25]. При этом наиболее существенный ЭМЭ вносит излучение вклад зарядов, движущихся с вершиной В прорастающей трещины [26, 27]. Известно, что существенный вклад в ЭМЭ оказывают движущиеся дислокации при деформировании, например, щелочногалоидных кристаллов [28 - 30].

На основании модельных представлений [31 - 34] было сделано предположение, что возникающее при зарождении и прорастании трещин электромагнитное излучение генерируется источниками, которые могут быть образованы областями с повышенной и пониженной плотностью заряженных дислокаций [19], а также движением зарядовой мозаики по берегам растущей трещины [23]. Колебательное перемещение электрических зарядов в этих областях, как показано в [24], приводит к возникновению электрического тока, сопровождающего прорастающую трещину, изменение геометрических размеров которой связывают с излучаемой в широком диапазоне частот электромагнитной энергией. В общем случае при изменяющихся во времени на берегах прорастающей трещины зарядах и токах в окружающем их пространстве наблюдается переменное электромагнитное поле, а источники электромагнитной природы могут быть промоделированы элементарным электрическим (зарядовый источник) и магнитным (токовый источник) диполями [35].

Теоретические обоснования возникновения явления электромагнитного излучения были рассмотрены в работах [36 - 38].

Было установлено, что при возникновении трещины время ее развития равно длительности сигнала электромагнитного излучения [36]. Было также сделано предположение, что имеется зависимость между размерами образующихся под нагрузкой трещин и возникающими при этом сигналами определенной длительности [37].

В связи с этим принято считать, что возникновение единичной трещины сопровождается появлением либо одиночного импульса, либо пакета импульсов ЭМЭ.

ЭМЭ из горных пород легло в основу ряда методов прогноза геодинамических явлений (землетрясений, горных ударов, оползней), динамических проявлений горного давления в массиве. [31, 33, 39, 40, 41].

Проводились лабораторные работы по исследованию дефектности и напряженно-деформированного состояния на образцах из диэлектрических материалов с использованием метода ЭМЭ [29, 42 - 46]

Методическим недостатком указанных исследований является то, что в качестве параметра ЭМЭ используется интенсивность импульсного потока (число импульсов ЭМЭ, превышающих заданный порог, в единицу времени).

Большой цикл работ по исследованию связей между НДС и амплитудновременными параметрами сигналов ЭМЭ был выполнен в Институте горного дела СО РАН [47]. Для этого была разработана методика и стенд для синхронного измерения ЭМЭ и нагрузки при одноосном сжатии образцов горных пород. На стенде исследовалась структура сигналов ЭМЭ при нагружении образцов с заданной скоростью. В процессе экспериментов синхронно по двум каналам регистрировались сигналы ЭМЭ и нагрузка, параметры которых на экране монитора ЭВМ отображались в виде отдельных кадров. Каждый кадр содержал 2¹⁴ отсчетов значений ЭМЭ и нагрузки, оцифрованных 12-разрядным АЦП, взятых с интервалом 2 мкс.

Из кадров формировалась временная реализация, по которой производился анализ.

Было показано, что имеет место корреляция между возникновением ЭМЭ при нагружении и локальным падением нагрузки за счет микроразрушений.

По результатам исследований были сделаны, в частности, выводы:

• Установлено, что переход от стационарной стадии накопления трещин к нестационарной стадии разрушения при нагружении образцов горных пород связан с изменением структуры в сигналах ЭМЭ — возникновением в них периодических низкочастотных колебаний с переменными амплитудой и длительностью — автоколебательным квазирезонансным процессом.

• Экспериментально доказано, что при одноосном нагружении образцов горных пород проявляется трехстадийность процесса их разрушения, находящая свое отражение в S-образном характере изменения структуры спектрально-временных параметров сигналов ЭМЭ: первая стадия отображается как высокочастотный процесс с последовательным смещением спектра ЭМЭ по мере нагружения образцов в более низкочастотную область; вторая — наоборот, как процесс со смещением спектра в высокочастотную часть диапазона; третья стадия — нарушения сплошности характеризуется тем, что спектральные параметры вновь регистрируются в низкочастотной области частотного диапазона.

1.4. Метод контроля на основе механоэлектрических преобразований

Впервые метод механоэлектрических преобразований (МЭП) для контроля структурных нарушений в композитных диэлектрических материалов начал разрабатываться в Томском политехническом университете в начале 70-х годов. Суть метода МЭП заключается в следующем [48]. Производится импульсное механическое возбуждение диэлектрического образца, в результате чего в нем возникает акустическая волна, которая распространяется по образцу, отражаясь от его границ. В процессе движения фронт волны пересекает источники механоэлектрических преобразований, которые преобразуют часть энергии волны в переменное электромагнитное поле. Параметры электромагнитного поля регистрируют в виде сигнала отклика с помощью емкостных или индуктивных приемников, расположенных вблизи поверхности образца.

По своей сути метод МЭП по типу УЗ методов контроля похож на метод реверберации [49]. Разница заключается в том, что в УЗ методе сигнал регистрируется контактными акустоэлектрическими преобразователями (чаще всего на основе пьезоэффекта), а в методе МЭП сначала происходит преобразование акустической энергии в электромагнитное поле, а затем в электрический сигнал с помощью емкостных или индуктивных датчиков (обычно емкостных). Одним преимуществ МЭП ИЗ метода является возможность бесконтактного приема проблему сигналов, что снимает надежности контакта, а также обеспечивает отсутствие влияние приемника на параметры сигнала отклика.

При распространении акустической образцу при волны ПО многократных границ происходит отражениях OT ИХ рассеяние на поэтому на приемник неоднородностях структуры, сигнала приходит суперпозиция рассеянных волн, которая в УЗ методе контроля зашумляет полезный сигнал, связанный с дефектами. Суперпозицию рассеянных волн называют структурным шумом. Особенностями структурного шума является то, что обусловленный им отклик стабилен при неоднократном возбуждении образца одной и той же системой возбуждения в случае неизменности структуры образца и геометрии системы источник возбуждения – образец – приемник сигнала [49].

Были проведены экспериментальные исследования по оценке возможности использования явления МЭП для дефектоскопии, контролю напряженно-деформированного состояния и прочности композитных материалов. Так в работе [48] проведен анализ чувствительности метода МЭП к размеру зерна в бетонах. Ряд работ посвящен рассмотрению механизмов МЭП [50 - 52]. В работе [53] установлена зависимость амплитудно-частотных характеристик на ударное возбуждение бетонов от размеров и геометрии расположения в них включений. Предложена физическая модель источника сигнала и получены расчетные значения частотной характеристики отклика по электрической цепи замещения. Показано хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов, что подтверждает правильность предложенного механизма механоэлектрических преобразований.

В работе [54] показано, что при ударном возбуждении высокоомных композиционных материалов может иметь паразитные составляющие, связанные с перемещением металлического бойка ударного устройства и с электризацией материала в точке удара.

В работе [55] проводились исследования изменений спектральных характеристик отклика при одноосном сжатии контактирующих образцов горных пород разного состава. Показано существенное влияние на отклики контакты горных пород, различных по минералогическому составу.

Предложен и физически обоснован метод определения динамики изменения качества контакта и адгезионной прочности диэлектрической матрицы и металла в армированных композиционных материалах на основе явления МЭП [56].

В работе [57] установлена СВЯЗЬ частотных характеристик характеристиками воздействующего электромагнитных сигналов с акустического сигнала на образцы из искусственного кристаллического кварца и реальных горных пород, представленных кварцитами, а также исследовано спектральных характеристик отклика от расстояния изменение между емкостным датчиком и поверхностью образца.

В работе [58] показано, что с использованием метода механоэлектрических преобразований можно оценивать степень напряженнодеформированного состояния, создаваемого температурными полями. Показана эффективность метода МЭП [59 - 61] при оценке дефектности бетона при циклическом замораживании-оттаивании.

Проведены исследования влияния влажности на параметры электромагнитного отклика при импульсном механическом возбуждении образцов из бетона [62]. Разработана схема замещения электрических процессов, влияющих на параметры отклика при различной степени влажности.

В работе [63] была дана оценка влияния структурных фазовых переходов при термической обработке гипса на параметры электромагнитного отклика на его ударное возбуждение.

Были проведены исследования влияние слоистости композитных материалов на параметры электромагнитного отклика при использовании метода МЭП. Так, в работе [64] показано, что увеличение числа слоев существенно влияет на спектр отклика.

Ряд работ посвящен математическим моделям метода МЭП [65 - 67]. При этом реализовано два подхода. В основе одного из них используется лучевое приближение для расчетов движения фронтов акустических волн в образце [65,66].

В основе другого лежит численный метод расчета волновых полей в соответствии с уравнениями, входящими в математическую постановку плоской задачи теории упругости. Она включает в себя уравнения движения, геометрические соотношения (соотношения Коши), физические соотношения, начальные и граничные условия [67].

Лучевая математическая модель [66] дает возможность задавать размеры образца в виде параллелепипеда, координаты источника механического возбуждения и приемника сигнала, привязанные к образцу. В основе указанной модели лежит метод механоэлектрических преобразований. Был использован метод расчета, основанный на геометрической акустике. Для сокращения трудоемкости расчета, обусловленной необходимостью учитывать углы отражений лучей от границ образца, пространство образца было заменено эквивалентным ему полубесконечным пространством, в котором лучи от точки

возбуждения распространяются прямолинейно. Это пространство имеет вид периодической структуры и состоит из ячеек, каждая из которых содержит двойной электрический слой (источник механоэлектрических преобразований) и приемник, расположенные в ней зеркально относительно смежных ячеек. Каждая пара ячеек имеет трансляционную симметрию.

Особенностью является TO, что регистрируется индукционная составляющая электромагнитного поля от различных источников МЭП (нет электромагнитного запаздывания). В то же время фазы временных зависимостей составляющих сигнала определяются фазами акустической волны в пространственно разнесенных источниках МЭП.

На основании полученных данных был составлен алгоритм программы расчета, который включает в себя:

• Задание размеров и координат двойного электрического слоя и поверхности приемника относительно образца прямоугольной формы (размеры которого также могут задаваться).

• Задание формы удара во времени и вычисления выборок его производной по времени через заданный интервал времени.

• Вычисление значения вертикальной составляющей скорости деформации в каждой точке сигнального пространства соответствующей ячейки с учетом индексов вектора трансляции и зеркальной симметрии смежных ячеек.

• Вычисление временной зависимости скорости этой деформации, затем формирование полной временной реализация для ячейки.

Полученные временные реализации соответствующим образом складываются по временным индексам для определения значений вертикальных составляющих векторов индукции и расчета по ним тока смещения.

Таким образом, применение указанной модели может быть полезным для выбора оптимальных параметров разрабатываемого метода контроля.

Расчеты по указанной модели показали, что геометрия системы источник акустического сигнала – образец – емкостный приемник электромагнитного отклика оказывает существенное влияние на его форму и спектральные характеристики.

Кроме того, расчеты показали, что при однородном распределении источников МЭП по образцу основной вклад в сигнал отклика оказывают источники, находящиеся в непосредственной близости от приемника сигнала.

1.5. Состояние вопроса и задачи исследования

Как показывает анализ литературы, современные представления о механике разрушения связаны с концентрацией дефектов и с характером их накоплений (хаотичным коррелированным). По или данным метода акустической эмиссии и другим методами показано, что распределение дефектов по размерам носит степенной характер, что является признаком наступающего разрушения. По этой причине в метод контроля дефектности и напряженно-деформированного быть состояния должна предусмотрена возможность как определения пространственного распределения дефектов в объекте исследования, так и оценке распределения дефектов по размерам. Кроме того, метод должен давать интегральную оценку дефектности и степени напряженно-деформированного состояния.

Из рассмотренных методов неразрушающего контроля предпочтительным является метод механоэлектрических преобразований, который имеет существенное преимущество перед акустическими методами, как бесконтактный при регистрации сигнала отклика. Кроме того, емкостный приемник метода механоэлектрических преобразований может воспринимать сигналы электромагнитной эмиссии, что расширяет возможности метода.

2 Разработка лабораторного макета мультисенсорной системы контроля

2.1 Предпосылки к созданию аппаратуры

Можно предполагать, что метрологический эффект метода МЭП по контролю структурных изменений (дефектности и неоднородностей структуры) объекта исследования под действием механических нагрузок состоят в том, что происходит накопление деформаций прямой и отраженных акустических волн возбуждения, что отражается в отклике.

обычной При использовании методики механоэлектрических преобразований было замечено, что при одинаковой геометрии эксперимента и при стабильном ударном возбуждении шариком или электромеханическим преобразователем с точностью до помех воспроизводимость отклика была достаточно высокой. Таким образом, можно прийти к заключению, что распространение акустической волны возбуждения по образцу, a, процесс механоэлектрических преобразований следовательно, является детерминированным с малым уровнем стохастической составляющей.

Накопление полезной составляющей сигнала на фоне помех широко используется (например, в локации, астрономии).

Суть его состоит в том, что если объект исследования, обладающий детерминированной импульсной характеристикой, возбуждать серией из N импульсов заданной формы, то на выходе будет получена последовательность откликов, представляющих смесь полезных составляющих и шумов. При когерентном сложении полезных составляющих их уровень возрастет в N раз. Стохастические (случайные) составляющие шума будут складываться некоррелированно, и их уровень возрастет в \sqrt{N} раз. В результате сложения откликов отношение сигнал/шум по уровню сигналов возрастет в \sqrt{N} раз.

На воспроизводимость отклика прямое влияние оказывает стабильность возбуждения. При обычно используемом возбуждении имеет место разброс

параметров взаимодействия ударного устройства с объектом исследования изза неоднородности его поверхности. При этом меняется от удара к удару длительность соприкосновения ударного устройства с поверхностью объекта исследования, что влияет на форму генерируемых акустических волн. Принимались меры для уменьшения влияния на удар неоднородности поверхности объекта возбуждения путем использования металлических пластинок, которые эффективно усредняли неоднородность поверхность [68].

Из математической модели [66] следует, что форма отклика изменяется в зависимости от местоположения приемника сигнала. При точечном возбуждении образца в нем начинает распространяться фронт акустической волны, отражаясь от границ. При этом отклик формируется как суперпозиция сигналов за счет механоэлектрических преобразований на источниках МЭП, через которые проходят лучи акустической волны. Величина электрического сигнала приемника убывает с расстоянием от источника МЭП, поэтому при прочих равных условиях при равномерном распределении источников МЭП по материалу образца основной вклад в отклик будет от источников МЭП, расположенных вблизи его поверхности со стороны емкостных приемников.

С Кроме того, играет определенную роль размер приемника. увеличением его размера для высокочастотных составляющих сигнала отклика дифракционной приемник может играть роль решетки. Длины волн спектральных составляющих, кратно укладывающиеся на линейных размерах пластинки емкостного приемника будут когерентно складываться, тогда как для других условий сложения будут менее благоприятны, в том числе они могут полностью компенсировать друг друга.

Для более широкополосного приема сигналов откликов желательно иметь приемники меньшего размера. С другой стороны, малый размер приемника уменьшает отношение сигнал/шум усилительного тракта.

Проблема снимается при использовании мультисенсорной системы с небольшими линейными размерами пластин емкостного приемника при условии многократного импульсного возбуждения объекта исследования. При использовании многократного возбуждения объекта исследования высокостабильными импульсами и выделение среднего значения временной реализации открывает возможность производить сравнительный анализ тех или иных параметров откликов за счет изменения дефектности и напряженнодеформированного состояния.

При этом возникает возможность использования статистических методов для оценки надежности полученных различий параметров откликов при структурных изменениях исследуемого объекта. Для нормальных распределений текущих значений откликов в каждой точке выборки обычно используется критерий Стьюдента (критерий *t*).

2.2 Описание макета

На основе вышеизложенного был разработан лабораторный макет мультисенсорной системы контроля дефектности и напряженнодеформированного состояния на основе явления механоэлектрических преобразований.

Блок-схема мультисенсорной системы контроля показана на рис. 2.1.

Образец возбуждается заданным числом коротких акустических импульсов (ударов) определенной формы и амплитуды с помощью пьезоэлектрического преобразователя на основе ЦТС–19, возбуждаемого электрическим высокоточным генератором с регулируемой формой сигнала.



Рисунок 2.1. Блок-схема измерений.

Отклик воспринимается системой емкостных дифференциальных датчиков. Каждый дифференциальный емкостный датчик состоит из 2-х приемных пластин, измерительного тракта, состоящего ИЗ эмиттерных повторителей с высокоомным входом и малошумящего усилителя, сигнал с BNC 2120 поступает которого через блок коммутации _ на многофункциональную плату сбора данных PCI – 6251 компьютера, в котором формируется база данных для дальнейшей обработки. При этом система предусматривает производить оцифровку сигнала С заданным шагом дискретизации, оптимальным для решения различных задач при сравнительном анализе. Измерительная система предполагает использование сменной системы приемников, выполненных на пластине из фольгированного текстолита методом травления. Форма и количество приемников определяется задачами эксперимента.

Зарегистрированные в цифровом виде отклики с каждого приемника проходят предварительную обработку: находится среднее значение в каждой точке выборки временных реализаций откликов при повторных возбуждениях образца, приведенных к начальному моменту возбуждающих импульсов, а также среднеквадратичное отклонение для каждой точки временной выборки

отклика. Последнее необходимо для статистической оценки различий средних значений временных выборок откликов при изменении характеристиках образца с использованием сравнительного анализа.

Следует отметить, что рассмотренная математическая модель пригодна лишь для случая узкополосного импульсного возбуждения, так как в модели не предусмотрена существующая в реальности частотная зависимость затухания.

Расчеты по математической модели качественно согласуются с результатами эксперимента и приводят к оправданной необходимости применения мультисенсорного метода исследования откликов при механоэлектрических преобразованиях. **3** Исследование возможности использования мультисенсорной системы для контроля напряженно-деформированного состояния

3.1 Оценка спектральной чувствительности метода механоэлектрического преобразования при контроле напряженнодеформированного состояния по математической модели

Важным в решении вопроса точности и надежности контроля напряженно-деформированного состояния является поиск оптимального спектра импульса возбуждения.

Проблему контроля НДС можно разделить на 2 этапа. На первом этапе необходимо выбрать такой спектр возбуждения, при котором решается вопрос регистрации факта изменения НДС. На втором этапе необходимо решить более сложную задачу: по параметрам отклика выявить частотные зоны, где обеспечивается возможность получения однозначных выводов о степени изменения НДС или даже о возможности определения абсолютных значений НДС при использовании априорных данных при калибровочных измерениях.

Актуальными являются выявление степени дефектности и НДС на как можно более ранней стадии разрушения материала. Для повышения достигнутой чувствительности упомянутого метода с использованием мультисенсорной системы контроля необходимо дать оценку информативности отклика в зависимости от спектра импульсного возбуждения.

Для решения поставленной задачи были проведены необходимые экспериментальные исследования.

Измерения проводились на образцах эпоксидной смолы прямоугольной формы размером 100х80х60 мм³ с песчаным наполнителем. Образец располагался на неподвижном нижнем пуансоне пресса. Верхним подвижным пуансоном создавалось необходимое статическое одноосное сжатие.

Электромагнитный отклик инициировался со стороны узкой грани образца импульсом акустического излучения пьезоэлектрического

преобразователя. Частота следования и длительность импульсов задавались высокоточным генератором. Параметры генератора и пьезоэлектрического преобразователя подбирались такими, чтобы обеспечить спектральную полосу импульса, охватывающую диапазон от 30 кГц до 115 кГц. Генератор вырабатывал 80 импульсов возбуждения с высокой точностью по амплитуде и форме через интервал в 2 мс, за который происходило полное затухание сигнала текущего отклика [70].

Электрический отклик регистрировался с шестью емкостными датчиками размером 1 см² каждый, размещенных на площади размером 95х80 MM^2 , которые изготавливались травлением фольгированного ИЗ стеклотекстолита толщиной 1 мм. Во избежание помех от соседних датчиков каждый из них был окружен заземленным охранным кольцом. Вся последовательность откликов с каждого датчика усиливалась, оцифровывалась и поступала в базу данных.

При расчете были внесены упрощения, не влияющие на выводы, полученные анализа расчетных данных. В частности, источник ИЗ механического воздействия, а также источники МЭП были заданы точечными; расчет велся для бездефектного образца при расположении приемников в точках, соответствующих положению приемников в реальном эксперименте. Математическое моделирование показало, что средний уровень сигнала отклика без учета потерь энергии не меняется, несмотря на то, что интенсивность сферической акустической убывает обратно волны пропорционально пройденному расстоянию и имеет место рассеяние волн на неоднородностях и дефектах. Это обусловлено тем, что отраженная от границ образца волна вновь участвует в формировании отклика. В действительности, как известно, в материале происходит поглощение энергии акустических волн за счет внутреннего трения, а также рассеивания энергии на дефектах, причем более высокочастотная составляющая энергии волны поглощается более эффективно. Кроме того, часть энергии волны уносится через границы образца [70].

В реальных условиях эксперимента сигнал отклика затухает для разных спектральных составляющих по разному, но в среднем для спектральной полосы (50...100) кГц постоянная времени экспоненциального затухания составляет примерно 400 мкс. На этом основании для приближения расчетных данных к реальным условиям в модели предусмотрено экспоненциальное затухание сигнала [70].

Рассмотрим импульсную характеристику отклика в заданной точке расположения источника МЭП. Для получения импульсной характеристики необходимо подать на вход исследуемой системы импульс бесконечно малой длительности. В условиях математической модели при расчете отклика с заданным интервалом квантования сигнала длительность входного импульса была выбрана равной интервалу выборки. При расчете и в реальном интервал квантования времени эксперименте BO составлял 0,8 мкс. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) единичного импульса шириной в интервал времени оцифровки является равномерной во всей области частот отклика. Были рассчитаны две импульсные характеристики. Одна получена при некотором начальном положении приемника сигнала, а вторая - при смещении приемника на 1 мм [70].

На рис. 3.1 показана расчетная импульсная характеристика отклика (а) одного из 2-х приемников сигнала. На этом же рисунке показан разностный сигнал между указанными импульсными характеристиками (б). На импульсной характеристике видны временные суперпозиции пересечения с данным источником МЭП фронтов прямой и отраженных от границ волн возбуждения единичной длительности [70].



Рисунок 3.1. Расчетные: а) импульсная характеристика отклика и б) разностный сигнал.

Для оценки вклада в разностный сигнал спектральных составляющих импульса воздействия необходимо рассмотреть отдельные гармонические составляющие воздействия. Выражение для гармонической составляющей спектра отклика имеет вид

$$g(t) = \sum_{i} a_{i} \cdot \sin(\omega \cdot (t - \frac{r_{i}}{v}))$$

где g(t) - временная функция суммы гармоники круговой частоты ω , амплитуды a_i с фазами, определяемыми расстояниями r_i , которые акустические волны (прямая и отраженная от границ образца), проходят от точки удара до источника МЭП; ν - продольная скорость звука образца.

Рассмотрим гармонику g(t), у которой на небольшую величину меняются амплитуда a и расстояние r. Для оценки небольших отклонений аргументов в разностном анализе можно воспользоваться уравнением полных дифференциалов

$$\Delta g(t) = \Delta a \frac{\partial g(t)}{\partial t} + \Delta r \frac{\partial g(t)}{\partial r},$$

где $g(t) = a \cdot \sin(\omega \cdot (t - r/\nu), \Delta g(t), \Delta a, \Delta r$ - приращение g(t), a, r, соответственно.

Результатом дифференцирования будет

$$\Delta g(t) = \Delta a \cdot \sin(\omega \cdot (t - \frac{r}{v}) + \Delta r \cdot \frac{\omega}{r} \cdot \cos(\omega \cdot (t - \frac{r}{v}))$$

Как видно из этого выражения, изменение амплитуды сигнала от приращения расстояния пропорционально частоте спектральной составляющей.

Отсюда можно сделать вывод, что при прочих равных условиях эффективнее использовать импульсное воздействия со спектром, лежащим в области возможно более высоких частот [70].

Как видно из рис 3.2, импульс с равномерным спектром преобразуется в образце в спектр, имеющий минимумы и максимумы, т. е. образец для волны является частотным фильтром.

Следует отметить, что разностная АЧХ для любой из гармоник находится как амплитуда разности радиус-векторов соответствующих гармоник на фазовой плоскости. Поэтому в разностной АЧХ учитываются как амплитуды соответствующих гармоник, так и их фазы [70].



Рисунок 3.2. Амплитудно-частотные характеристики а) импульсной характеристики отклика и б) разностного сигнала

Кроме того, имеет место тенденция смещения величины разностной АЧХ расчетных откликов в область более высоких частот. Так, АЧХ импульсной характеристики достигает уровня 0,5 от максимальной амплитуды на частоте 75 кГц, тогда как АЧХ разности - на частоте 135 кГц.

Получение отклика s(t) при заданной временной функции воздействия f(t) рассчитывается путем свертки импульсной характеристикой отклика h(t) с указанной функцией, либо в дискретном случае (с точностью до множителя) [70] по формуле

$$s_i = \sum_{j=0}^i h_j \cdot f_{i-j}$$

где *і* - номер выборки.

Для численной оценки относительного уровня отклика при различных полосах спектра воздействия были проведены расчеты при воздействии на вход математической модели прямоугольных радиоимпульсов длительностью 100 мкс с заполнением гармоническими колебаниями разных частот от 5 до 100 кГц. При таких условиях ширина спектрального скользящего окна составляет примерно 9 кГц [70].

На рис. 3.3 показаны максимальные значения разности откликов от частот заполнения при смещении источника МЭП на 1 мм. Видно, что, в среднем, наблюдается линейный рост уровня разностного сигнала отклика от частоты заполнения радиоимпульса с некоторыми отклонениями, обусловленными спектральными свойствами импульсной характеристики.



Рисунок 3.3. Максимальные значения разности расчетных откликов при воздействии на вход радиоимпульсов с гармоническим заполнением

На основании проведенных расчетов была подобрана форма импульса возбуждения и получены отклики при одноосном сжатии образца давлением 0.5 и 5 Мпа [70].

На рис. 3.4 показаны приведенные к максимуму отклики с приемника при одноосном сжатии давлением в 5 атм. (*a*), и разностный сигнал откликов при изменении давления (б).



Рисунок 3.4. Отклик с 1-го приемника сигнала от образца, подвергнутого давлению в 5 атм., и разностный сигнал откликов при давлении 0.5 и 5 МПа.

Как видно из рисунка, максимум разностного сигнала лежит во временной области, в которой отклик формируется отраженными волнами. Если вернуться к расчетным данным (рис. 3.1), то мы можем видеть, что и здесь имеет место временное смещение разностного сигнала.

Это может быть связано с тем, что изменения в отклике нарастают по мере многократного прохождения волны возбуждения через неоднородности при отражениях от границ образца [70].



Рисунок 3.5. АЧХ отклика при сжатии образца давлением 0.5 МПа (обозначена треугольниками) и разностного отклика (обозначена крестиками).

На рис. 3.5 показаны АЧХ отклика при одноосном сжатии давлением 5 атм. и разностного сигнала. Очевидно, что высокочастотная граница

разностного сигнала смещается в область более низких частот по сравнению со спектром самого отклика. Это можно объяснить тем, что высокочастотная составляющая отклика затухает быстрее, чем низкочастотная. А так как разностный сигнал отклика проявляется во времени позже, чем сам отклик, поэтому в разностном сигнале доля высокочастотных составляющих уменьшается [70].

Из полученных результатов следует, что чувствительность разностного метода неразрушающего контроля с использованием явления МЭП зависит от спектра акустического воздействия на образец. При этом с одной стороны, эффективность разностного метода растет с увеличением частоты, а с другой - более быстрое затухание высокочастотных составляющих волны вносит ограничение в их использовании для сравнительного анализа степени напряженно-деформированного состояния образца [70].

При возбуждении образца импульсом единичной длительности электрический отклик представляет собой импульсную характеристику образца для заданной геометрической конфигурации системы точка возбуждения – источник МЭП относительно образца.

На рис. 3.6 (верхний график) отображены временные реализации импульсной характеристики отклика всей совокупности откликов (20 отражений) от каждой грани, а на нижнем графике – отклики слева направо при выполнения условия (1) для значений *m* = 3, 5, 10, 15 соответственно.



Рисунок 3.6. Расчетные временные реализации отклика. Вверху - суммарный отклик. Внизу - отклики при m = 3, 5, 10, 15.

Как видно из рис. 3.6, по мере увеличения *m* временные границы откликов растягиваются.

На рис. 3.7 показаны АЧХ суммарной импульсной характеристики отклика (верхний график) и АЧХ при m = 3, 5, 10, 15 снизу вверх соответственно.



Рисунок 3.7. АЧХ суммарного отклика (вверху) и АЧХ откликов снизу вверх при m = 3, 5, 10, 15 соответственно

Как видно из рис. 3.7, по мере возрастания *m* увеличивается «изрезанность» спектра, а это значит, что при условии многократного отражения спектр все более приближается к линейчатому. Как известно, в линейной системе частотная характеристика отклика равна произведению частотной характеристики сигнала возбуждения на спектр импульсной характеристики образца. Поэтому изрезанность спектра будет проявляться и в частотной характеристике отклика при реальном возбуждении и это может стать информативным параметром в условиях, когда вследствие изменения дефектности объекта исследования и по другим физическим причинам происходит более быстрое затухание сигнала.

3.2 Исследование возможности использования фазовых характеристик аналитического сигнала отклика при механоэлектрических преобразованиях для контроля напряженно-деформированного состояния

Так как отклик определяется суперпозицией откликов волн, пробегающих неоднократно через зоны ОИ, в условиях НДС и с определенной концентрации дефектности в виде микротрещин, следует ожидать, что информативность отклика определяется не только частотным спектром, но также и временными характеристиками отклика.

Существует несколько методов изучения пространственно-временных характеристик сигнала. Это и исследования спектра с использованием скользящего окна, и преобразование Гильберта для формирования аналитического сигнала. Аналитический сигнал дает возможность использовать амплитудные и фазовые временные характеристики.

Целью настоящей работы является оценка возможности использования для контроля таких параметров аналитического сигнала, формируемого с помощью преобразования Гильберта, как мгновенная фаза и мгновенная частота в условиях одноосного сжатия образца.

Образец помещался в пресс и подвергался ступенчатому одноосному сжатию. На каждой ступеньке давления образец возбуждался серией из 128 импульсов заданной формы. Разрушение образца произошло при нагрузке 62 МПа.

Для каждой серии откликов при заданной нагрузке рассчитывалось среднее значение временной реализации, которое затем преобразовывалось в аналитический сигнал с использованием преобразования Гильберта.

Преобразование Гильберта h(t) представляет собой исходный временной сигнал, все фазы которого в спектральной области повернуты на угол $-\pi/2$.

Аналитический сигнал f(t) имеет вид:

 $f(t) = s(t) + i \cdot h(t)$

Где *s*(*t*) – исходный сигнал отклика, *i* – мнимая единица

В качестве параметров аналитического сигнала для анализа можно использовать мгновенную амплитуду (MA) *a*(*t*):

 $a(t) = \sqrt{s(t)^2 + h(t)^2}$, мгновенную фазу (МФ) $\phi(t)$:

 $\varphi(t) = \operatorname{arctg}(h(t)/s(t))$

а также производную от фазы во времени $\varepsilon(t)$, которая носит название мгновенной частоты (МЧ):

 $\varepsilon(t) = d\varphi(t)/dt$

Важным является вопрос выбора участков временной реализации, на которых изменение МФ с изменением дефектности и НДС образца проявляется наилучшим образом. Рассмотрим, как изменяются с нагрузкой МФ и МЧ в различных временных областях отклика.

На рис. 3.8 отображены семейства МА аналитического сигнала при разных нагрузках на образец. Нижний график соответствует начальной нагрузке; расстояние между графиками пропорционально значению соответствующей ступеньки нагрузки.



Рисунок 3.8. Амплитудно-временные характеристики аналитических сигналов от нагрузок на образец.

Из рисунка 3.8 видно, что есть временные зоны, при которых МА изменяются на удалении от нулевой оси, а есть зоны, в которых перегибы кривых МА происходят в непосредственной близости от нулевого уровня. Для

оценки информативности таких зон построим фазовые портреты аналитических сигналов в соответствующих временных интервалах.

На рис.3.9 показаны фазовые портреты аналитических сигналов откликов при начальной нагрузке 1.2 МПа и следующей нагрузке 4.3 МПа. Отклики при смежных нагрузках выбраны для того, чтобы определить временные зоны, при которых проявляются даже малые изменения МФ и МА.



Рисунок 3.9. Фазовые плоскости аналитических сигналов при нагрузках 1.2 МПа (помечены ×) и 4.3 МПа (помечены ◊) во временных интервалах (104 – 124) мкс (слева) и (198 - 218) мкс (справа)

На левом рисунке фазовые портреты при двух нагрузок построены для интервала времени (104 – 124) мкс и представляют собой кривые типа спирали, мало отличаясь друг от друга. Фазовые портреты правого рисунка качественно различны, что говорит в пользу использования для анализа фазовых характеристик в тех временных областях аналитического сигнала, в которых происходит перегиб функций при малых уровнях мгновенной амплитуды. Это накладывает необходимость в каждом случае проверять статистическую надежность различий соответствующих характеристик при сравнительном анализе.

Особенностью фазовых характеристик аналитического сигнала заключается в том, что во времени происходит рост фазы по закону, близкому к линейному. При таких условиях трудно анализировать малые изменения фазы в заданных областях временной реализации. Для выделения малых отклонений МФ были сформированы новые зависимости $\psi(t)$, для чего из исследуемого участка временных характеристик МФ при различных нагрузках вычитались линейные наклоны по следующей формуле:

$$\Psi_{n1,p} = \varphi_{i,p} - \frac{\varphi_{n1,p} - \varphi_{n0,p}}{n1 - n0} \cdot (i - \varphi_{n0,p}) - \varphi_{n0,p}$$

где $\varphi_{i,p}$ – текущее (*i*-тое) значение МФ при индексе *p* нагрузки на образец; *n0,n1* –соответственно начальный и конечный индексы заданного интервала выборки.

На рис. 3.10 показаны временные зависимости $\psi_{i,p}$ (слева) и МЧ (справа) от нагрузок на образец.



Рисунок 3.10. Временные зависимости мгновенной фазы (слева) и мгновенной частоты (справа) аналитических сигналов откликов от нагрузки на образец. Графики расположены с ростом нагрузки снизу вверх.

Как видно из графиков МФ с ростом нагрузки имеют место локальные закономерности по характеру нарастания либо убывания значений фазы в определенных временных интервалах. Более отчетливо это наблюдается на графиках МЧ.

Причинами изменения MΦ И MЧ, по-видимому, являются перераспределения дефектов в образце под нагрузкой, а также неоднородности Bo НДС по объему образца. всяком случае, имеет место высокая чувствительность МФ и МЧ к изменению НДС образца.

Анализ фазовых характеристик аналитических сигналов откликов, полученных с использованием преобразования Гильберта, показал их высокую чувствительность к степени НДС образца и, следовательно, возможность их использования для контроля дефектности и напряженно-деформированного состояния материала.

3.3 Исследование чувствительности мультисенсорной системы контроля к степени напряженно-деформированного состояния диэлектрических материалов

В настоящей работе приводятся некоторые результаты по исследованию НДС образцов с использованием разработанной аппаратуры контроля.

Производилась оценка изменений во временных реализациях откликах при различных нагрузках на образец относительно отклика при начальной нагрузке разностным методом.

На рис. 3.11 показаны снизу вверх разности откликов во времени одного из датчиков при давлениях 4, 13, 34, 60 МПа соответственно и начальном давлении 1,3 МПа.



Рисунок 3.11. Разности откликов при давлениях на образец 4, 13, 34, 60 МПа и начальном давлении 1,3 МПа

Как видно из рисунка 3.11, по мере нарастания нагрузки на образец разностный сигнал возрастает не только на участке большого уровня отклика (в интервале времени от 50 до 500 мкс), но также и в области малых его значений.

Изменения в откликах при различных нагрузках могут быть связаны как с неоднородностью, обусловленной НДС образца, так и с изменением концентрации дефектов, что в целом оказывает влияние на распространение акустической волны возбуждения.

Для оценки достоверности полученных результатов был использован метод статистической проверки гипотез, основанный на распределении Стьюдента[69].

Были рассчитаны эмпирические критические статистики *t* для каждой точки временной реализации по данным средних значений сравниваемых откликов, их дисперсий, числе степеней свободы (в нашем случае она равна 158).

Из таблицы значений критерия Стьюдента был выбрано значение критической статистики *T* при уровне значимости α = 0,001.

Согласно критерию Стьюдента гипотеза о равенстве средних значений отвергается, если |t| > T.

На рис. 3.12 приведен график эмпирических критических значений *t* во временной области данных. Здесь же приведен в виде прямой белой линии табличный уровень *T* критической статистики.



Рисунок 3.12. Иллюстрация статистической проверки гипотезы о достоверности различий средних значений откликов при давлениях 1,3 МПа и 4 МПа на образец

Превышение значений точек эмпирических критических значений над табличными уровнями критической статистики означает, что различия их средних значений точки выборки не случайны с вероятностью 99,9%.

Как видно из графика, даже при самом малом различии в давлении на образец 2,7 МПА имеются статистически значимые различия в сигналах во всей временной области отклика.

Результаты проведенных исследований показали высокую чувствительность аппаратуры мультисенсорного контроля к изменению степени НДС и перспективности предложенного подхода для исследования структурных изменений в конструкциях, находящихся под нагрузкой.

4 Исследование возможности использования мультисенсорной системы контроля для локализации макродефектов (режим томографа)

4.1 Описание экспериментальной установки

На основании анализа, полученных результатов было разработано техническое задание на макет мультисенсорной системы. На основании технического задания в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники был разработан действующий макет мультисенсорной системы контроля (рис. 4.1).



Рисунок 4.1. Фотография экспериментальной установки

Экспериментальная установка имеет следующие характеристики:

- рабочее поле контроля 600х900 мм;
- максимальная высота образца 200 мм;
- точность позиционирования 20 мкм;

- амплитуда напряжения на пьезоэлектрическом излучателе до 200 В;
- количество каналов регистрации 6;
- чувствительность канала регистрации 4 мкВ;
- диапазон частот анализа сигналов от 1 до 200 кГц;
- частота дискретизации АЦП и ЦАП 1 МГц;
- динамический диапазон не менее 96 дБ.

На рис. 4.2 представлена структурная схема экспериментальной установки, которая включает в себя следующие компоненты:

- координатограф;
- блок воздействия и съема (БВиС);
- высоковольтный усилитель зондирующего сигнала (ВУ);
- устройство генерации и оцифровки (УГО);
- управляющий компьютер (УК).



Рисунок 4.2. Структурная схема установки.

Управление аппаратными средствами системы и анализа данных осуществляется с помощью программного обеспечения MECAnalyzer. Координатограф позволяет производить позиционирование БВиС над обектом контроля. БВиС производит механическое возбуждение образца и съем электромагнитных сигналов, возникающих при таком возбуждении (внешний вид блока приведен на рис. 4.3). Устройство генерации и оцифровки, выполненное на базе многоканального устройства сбора данных NI USB-6356,

генерацию тестового воздействия и оцифровку откликов осуществляет Каждый объекта. ИЗ измерительных каналов аналого-цифрового преобразователя оснащен дополнительным усилителем И аналоговыми (ФНЧ ФВЧ) фильтрами И Баттерворта. Это позволяет повысить чувствительность по входу, устранить влияние помехи и обеспечить передачу сигналов по дифференциальным линиям с удаленных датчиков, размещенных в блоке акустического воздействия и съема электромагнитных откликов. Выход цифро-аналогового преобразователя УГО подключен к входу высоковольтного усилителя Tabor Electronics 9200А.



Рисунок 4.3. Блок акустического воздействия и съема электромагнитных сигналов: 1 – многожильный кабель, 2 – держатель, во внутреннюю часть которого установлен пьезоэлектрический ударник, 3 – предварительный усилитель, 4 – пьезоэлектрический ударник, 5 – группа из шести дифференциальных емкостных датчиков, расположенных по окружности.

4.2 Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования заключались в возбуждении цементно-песчаного образца путем сканирования его поверхности. Для этого были изготовлены образцы с различными включениями: цементно-песчаный и

эпоксидно-песчаный образцы с включениями в виде пенопласта, образец из цементного камня с включением в виде кварцевого песка (рис.4.4).





б)

Рисунок 4.4. Образцы с дефектами: а) вид сверху, б) вид спереди; Образец 1 – цементно-песчаный, 2– эпоксидно-песчаный, 3 – цементный камень

С помощью рентгеноскопии были определены точные координаты включений. Затем, на образце была расчерчена координатная сетка. В узлах этой сетки проводилось возбуждение. На рис. 4.5 представлены снимки, полученные рентгеноскопии.





б)

Рисунок 4.5. Рентгеноскопия образца: а) вид сверху, б) вид спереди

БВиС перемещался координатографом над образцом по продольной координате с шагом 5 мм. Положение дефектов в образце, начальное и конечное положение БВиС при сканировании образца по продольной координате показано на рис. 4. Размеры дефектов: маленький – 10x10x10 мм, большой – 20x20x20 мм. В каждой точке измерения пьезоэлектрический излучатель прижимался к образцу с определенным усилием, и осуществлялось акустическое воздействие с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Для наилучшего акустического контакта излучателя с образцом использовалась смазка Литол-24.

Параметры измерений:

- частота 122 кГц;

– размах напряжения на пьезоэлектрическом ударнике - 400 В;

- время развертки ЛЧМ сигнала - 75 мкс.

- усреднение - 128.



Рисунок 4.6. Положение БВиС при сканировании образца

При каждом акустическом воздействии регистрировались электромагнитные отклики объекта. Зарегистрированные в цифровом виде отклики проходят предварительную обработку. Находится среднее значение в каждой точке выборки временных реализаций откликов при повторных возбуждениях образца, а так же проходят через ряд аналоговых фильтраций Баттерворта.

На рис. 4.7 приведен интерфейс программного обеспечения.



Рисунок 4.7. Интерфейс главного окна программного обеспечения.

Из рис. 4.7 можно наблюдать 3 отклика. Отклик красного цвета - отклик при однократном импульсном возбуждении, в котором присутствует полезная составляющая и помеха. Отклик синего цвета - усредненный сигнал отклика при многократном возбуждении. Усреднение осуществляется по 128 откликам, что позволяет существенно повысить сигнал/шум. Отклик зеленого цвета узкополосная составляющая сигнала отклика на частоте возбуждения 122 кГц с шириной полосы порядка 20 кГц. Параметры фильтра задаются в программном обеспечении в окне настройки цифрового фильтра.

4.3 Анализ экспериментальных данных

Для обработки сигнала была разработана программа, позволяющая исключать из отклика как низкочастотную, так и высокочастотную помеху, а также формировать матрицу данных. Матрица состоит из трех столбцов, в первом столбце записана одна из временных реализаций отклика. Во втором – усредненные значения при многократном возбуждениях. И в третьем столбце выделена гармоника из сигнала.

Необходимо считать и объединить данные с помощью командной функции «concat». Объединенные данные проходят этап кадрирования. На данном этапе все входные данные обрезаются командой «submatrix» и формируются матрицы для каждого значения номера ряда, которые в виде файлов записываются в память ЭВМ.

ii := 0.. 18
nam0 := "0/"
name_{ii} := concat(nam0, num2str(ii), ".csv")

$$a_{ii} := READFILE(name_{ii}, "delimited", 2)^{\langle 1 \rangle}$$

 $j := 0.. rows(a_0) - 1$
 $ac^{\langle ii \rangle} := submatrix(a_{ii}, 3500, 10000, 0, 0)$
 $i := 0.. rows(ac) - 1$
name1 := "sig0.prn"
WRITEPRN(name1) := ac

Данная функция позволяет нам получить матрицу из массива данных. Эта позволяет нам упростить весь процесс. В качестве примера можно привести временную реализацию откликов.



Рисунок 4.8. Временная реализация откликов.

Проанализировав полученные временные реализации, можно заметить ряд графиков, которые показывают особенности откликов в виде выбросов на образце. Для наглядного восприятия приведены некоторые результаты.





На рис. 4.9 (а) представлен отклик на бездефектной области. На рис. 4.9 (б, в, г) можно наблюдать характерный скачок импульсов, что говорит о наличии дефекта.

Следующим этапом является отчистка от помех с помощью «medmooth» для низких и высоких частот. Сигналы проходят через ряд аналоговых фильтров Баттерворта и сглаживание алгоритмом «бегущих медиан».



Для визуализации образца была создана матрица, моделирующая поверхность образца (рис. 4.10).



Рисунок 4.10. Матрица поверхности цементно-песчаного образца.

На рис. 4.11 приведены графики трех временных реализаций заданных координат поверхности образца из области без включения и области с включением.



Рисунок 4.11. Сглаженные временные реализации, а) бездефектная область, б) область дефекта.

Разработанная экспериментальная установка позволяет регистрировать электромагнитные отклики из диэлектриков, после обработки, которых можно судить о наличии в образце включений.

Заключение

В ходе проделанной работы было проведено исследование дефектности материалов и их НДС с использованием метода МЭП; был разработан макет экспериментальной установки мультисенсорной системы контроля (блок-схема установки приведена выше); были проведены исследования макета к степени дефектности и НДС образцов из эпоксидной смолы с наполнением песка; полученные результаты исследования показали, что разработанная система обладает высокую чувствительность за счет усреднения откликов при импульсном возбуждении образца; многократном были проведены исследования по поиску параметров отклика, связанных с дефектностью и НДС; проведенные исследования показали, что наиболее чувствительными параметрами являются параметры, связанные с частотными характеристиками И с преобразованием Гильберта: амплитудно-временные, фазовые характеристики мгновенной частоты аналитического сигнала, сформированного из временной реализации отклика и преобразование Гильберта этой временной реализации; на основании анализа, полученных результатов было разработано техническое задание на макет мультисенсорной системы; на основании технического задания в Томском государственном университете система управления и радиосвязи был разработан действующий макет мультисенсорной изготовлены образцы системы контроля; С (с помощью рентгеноскопии были включениями определены точные координаты включений); полученный сигнал, подвергался фильтрации (для этого потребовалось разработать алгоритм обработки); в результате было выявлено, что мультисенсорная система контроля определяет включения и их местоположения.

Приложение А

Глава 1. Неразрушающие методы контроля структурных нарушений Chapter 1. Non-destructive testing of structural defects

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4А	Цыбенов Даши-Цэвэк Алдарович		

Консультант кафедры ФМПК

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. кафедрой	Суржиков	Д. ф-м. н.,		
ФМПК	Анатолий Петрович	профессор		

Консультант – лингвист кафедры ИЯФТ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Veriovenuma			
кафедры	устюжанина	К.ф.н.		
ТФRИ	Анна Константиновна			

Non-destructive testing of structural defects

1.1.Methods based on the phenomenon of acoustic emission

Acoustic emission is called radiation of acoustic waves accompanying some types of irreversible transformations in the solid body. There are three main types of mechanisms of this issue: 1) mechanisms related to plastic deformation (movement of dislocations, sliding of domain boundaries in ferromagnetics and ferroelectrics, etc.); 2) phase transitions, in particular of the martensitic transformation in steel; 3) the formation and development of cracks

Scheme of experiment for observation of this emission.

Waves excited by evolving defect (source of emission), undergoing various changes at the boundaries of the sample and on the other the static heterogeneities that reach the receiver of the sound (usually a piezoelectric transducer), an electrical signal which is usually supplied to the processing circuit. Remove from the piezoelectric transducer signal has the appearance of a random sequence of radio pulses, corresponding to individual events — outbreaks of acoustic emission. The Central frequency of the radio pulses is mainly determined by the resonance properties of the transducer. The elementary principle of signal processing of emission used in most existing methods, is the following: the radar pulse after amplification falls to a threshold device, sets it apart from extraneous noise.

This is a threshold device generates a radar pulse from a sequence of pulses of accounts which are then transferred to counting devices. Despite the fact that such a processing scheme uses only a small part of the information, it is possible to make a number of important physical observations.

Practical application of acoustic emission are extremely diverse. However, the main area of application of acoustic emission is currently non-destructive and online monitoring of engineering constructions and buildings. The main advantage of non-destructive testing methods using acoustic emission, making them especially valuable is the fact that this emission is accompanied by only developing, i.e. the most

dangerous defects. Another attractive side of application of acoustic emission is that the source of the sound, and while quite powerful, are themselves defects, making the task of detection and localization of the defect (the source of acoustic emission) is considerably easier. Much practical value of acoustic emission has caused the growth of research in this direction, mainly experimental, resulting in a relatively short period of time control methods based on acoustic emission, is widespread in those areas where the yield of product failure entails a catastrophic failure.

The most important applications of acoustic emission include nuclear energy.

1.2. Ultrasonic inspection methods

Ultrasonic inspection methods is widespread for detection of defects and their visualization

Methods of ULTRASONIC control relates to active acoustic methods and are divided into sub-groups: methods that use the passage, reflection of waves, and combined methods, which is used as a reflection and passage. Methods of passing suggest the presence of two converters — emitting and receiving, is located on opposite sides of the test object or the monitored area. To this sub-group include the following methods of NDT.

Shadow (or amplitude-shadow) method is based on registration of reduction of the amplitude of the transmitted wave (the so-called end-to-end signal) under the influence of the defect. Used both flash and (at least) continuous radiation.

Temporary shadow method based on the measurement of delay of the pulses caused by the diffraction of the defect.

In the methods of reflection using one or two transducers; used, generally a pulsed radiation. To this sub-group include the following methods of NDT.

Echo method based on the detection of echo signals from defects. At the time of arrival of the pulses is judged on the depth of occurrence of the defect and the thickness of the test object. Exothermally method in which you analyze the signals that experienced the mirror reflection from the bottom surface of the test object and defect.

Reverberation method is based on the time analysis of volume reverberation is the gradual decay of sound in a volume — controlled object. For example, when controlling a double-walled construction reverberation time in the layer which contacts the transducer will be less in the case of benign joint layers, as part of the energy will move to a different layer.

In the combined methods use the principle of registration of the echo signals from defects. On the screen of indicator usually see sent (probe) pulse, pulse, reflected from the opposite surface (bottom) of the test object (bottom signal) and the echo from the defect.

These ULTRASONIC inspection methods are designed for detection and location of defects in OK.

For the study of inhomogeneities and defects structure of materials used methods of ultrasonic spectroscopy and radiography, based on the analysis of frequency dependences of attenuation coefficient and phase velocity of acoustic waves in the material.

On measurements of phase velocities of acoustic waves in a wide frequency range, the calculation of the elastic moduli of solids, in particular, anisotropic composite materials.

The characteristic sizes of inhomogeneities in the structure of structural materials lie in the range from units to hundreds of micrometers.

Therefore, to measure the attenuation and phase velocity of ultrasonic waves in such materials it is necessary to apply broadband acoustic pulses with a spectral range from fractions to tens of megahertz. In this range the value of ultrasound attenuation coefficient can reach tens of inverse centimeters, so the amplitude of the probing pulses should be large enough to ensure a diagnosis products with a thickness up to several centimeters.

Ensure acceptable parameters of the excitation pulse is possible with the use of laser thermo-optical excitation of sound.

Was developed laser ultrasonic technique based on the pulsed photoacoustic effect, which enables local non-destructive diagnosis of mechanical and acoustic properties of composite materials based on the actual condition. Such diagnostics is necessary at the stage of development and improvement of technology of manufacture of the material, as well as to identify "weak" places with less strength in the material before the production of parts and products.

1.3. Control method based on electromagnetic emission

It was found that by brittle fracture of dielectrics electromagnetic radiation occurs.

The development of control methods using the phenomenon of electromagnetic emission (EME) was developed at Tomsk Polytechnic Institute team under the leadership of A. A. Vorobyev.

Was expressed the hypothesis that the occurrence and development of cracks should be accompanied by the emission of pulses of electromagnetic nature. These works gave impetus to the studies of the physics of the process of EME. Currently, there are about thirteen of the hypotheses of the occurrence of EME. According to the basic of them, the pulses of EME may arise due to the emission of electrons from the shores of the growing crack due to uneven (accelerated) motion of the charge mosaic on the banks of a growing crack, in violation of the ties of the electric double layer near the surface rupture. The most significant contribution to the EME makes the radiation of charges moving with top of sprouting cracks. It is known that a significant contribution to the EME have moving dislocations during deformation, for example, alkali halide crystals.

On the basis of model concepts was assumed to occur at the birth and germination of cracks electromagnetic radiation generated by the sources, which can be formed by areas with high and low density of charged dislocations, as well as the movement of the charge mosaic on the banks of a growing crack. The oscillatory movement of electric charges in these areas leads to the emergence of electric current accompanying the growing crack, the change of the geometrical sizes of which are associated with emitted in a wide range of frequencies of electromagnetic energy. In the General case when time-varying on the banks of the germinating crack charges and currents in the surrounding space, there is a variable electromagnetic field sources and the electromagnetic nature can be modeled by elementary electric (charge) and magnetic (current source) dipoles.

It was found that when the emergence of crack time of development equal to the duration of signal of electromagnetic radiation. It was also assumed that there is a correlation between the sizes generated under load of cracks and the resulting signals of certain duration.

In this regard, it is considered that the occurrence of a fracture is accompanied by either a single pulse or packet of pulses of EME.

Of EME from rocks formed the basis of a number of methods for forecasting of geodynamic phenomena (earthquakes, rock bursts, landslides), dynamic manifestations of rock pressure in the array.

Conducted laboratory work for the study of defects and stress-strain state of the samples of dielectric materials using the method of EME.

The methodological disadvantage of these studies is that as the parameter EME is used, the intensity of the pulsed flow (the number of pulses of EME in excess of the specified threshold, per unit time).

A large cycle of works on the study of the links between the VAT and the amplitude-time parameters of signals, EME was performed in the Institute of mining of SB RAS. This methodology was developed and stand for simultaneous measurement of EME and loads under uniaxial compression of rock samples. The stand has investigated the structure of EME signals at loading of samples at a given rate. In the process of experiments simultaneously on the two channels recorded the signals of EME and the load, whose parameters on the PC screen are displayed in a separate frame. Each frame contained 214 samples the values of EME and load the digitized 12-bit ADC, taken with an interval of 2 μ s.

Of the frames formed a temporary implementation, which was used for analysis.

It has been shown that there is a correlation between the occurrence of EME for loading and a local drop of the load due to micrometrology (microfacture).

According to the results of the research have been made, in particular, conclusions:

• It is established that the transition from stationary phase accumulation of fractures to non-stationary stage of damage during the loading samples of rocks associated with changes in the structure in signals, EME — the emergence of periodic low-frequency oscillations with variable amplitude and duration — self-oscillating quasi-resonant process.

• Experimentally proved that under uniaxial loading of rock samples is manifested techstudent the process of their destruction, which is reflected in the S-shaped character of change of spectral structure-time parameters of signals, EME: the first stage appears as a high frequency process with sequential shift of the spectrum of EME as loading samples in the lower frequency area; the second — on the contrary, as the process offset of the spectrum in the high frequency part of the range; third stage, discontinuity is characterized by the fact that the spectral parameters are again recorded in the low frequency region of the frequency range.

1.4. Control method based on mechano electrical transformations

The first method mechano electrical transformations (MEP) for the control of structural defects in composite dielectric materials started to be developed in Tomsk Polytechnic University in the early 70-ies. The method of MEP is as follows. Is pulsed mechanical excitation of the dielectric sample, with the result that there arises an acoustic wave, which spreads through the sample, reflecting from its boundaries. During the movement of the wave front crosses mechano electrical sources of transformations that convert a portion of wave energy in the alternating electromagnetic field. The parameters of the electromagnetic field recorded in the form of a signal response with capacitive or inductive receivers located near the surface of the sample.

In essence the method of MEP-type ULTRASONIC control methods similar to the method of the reverb. The difference is that in the ULTRASONIC method, the signal recorded contact acoustoelectric transducers (often on the basis of the piezoelectric effect), and MEP in the method first converts the acoustic energy in the electromagnetic field, and then into an electrical signal using capacitive or inductive sensors (usually capacitive). One of the advantages of the method of MEP is the possibility of contactless reception of signals that eliminates the problem of contact stability and also ensures the absence of influence of receiver parameters on signal response.

During the propagation of acoustic waves on the sample at multiple reflection from the boundaries is their scattering by inhomogeneities of the structure, therefore, the receiver signal comes, the superposition of the scattered waves, in which ULTRASONIC method of control noisy the useful signal associated with the defects. The superposition of scattered waves is called the structural noise. Specifics of structural noise is that the resulting response is stable during repeated excitation of the sample with the same excitation system in case of invariability of the structure of the sample and the geometry of the system excitation source – sample – signal receiver.

Pilot studies have been undertaken to assess the possibility of using the phenomenon of MEP for inspection, verification of the stress-strain state and strength of composite materials.

An analysis was conducted of the sensitivity of the method to map grain size in the concrete. A number of works devoted to consideration of the mechanisms of MEP. Was the dependence of amplitude-frequency characteristics for impact excitation of concrete from the dimensions and geometry of the location of the inclusions. A physical model of the source signal and the calculated values of the frequency response characteristics of the electric circuit of substitution. The good agreement between the calculated and experimental results, which confirms the correctness of the proposed mechanism mechano electrical transformations.

It is shown that under shock excitation of high resistance composite materials can have parasitic components associated with the movement of the metal firing pin impact device and with the electrification of the material at the point of impact.

Was used to study the changes in the spectral characteristics of the response under uniaxial compression, the contacting of samples of rocks of different composition. A significant effect on the responses of the contacts of rocks of different mineralogical composition.

Proposed and physically substantiated method determining the dynamics of changes in the quality of contact and the adhesion strength of the dielectric matrix and of the metal in the reinforced composite materials based on the phenomenon of the MEP.

A connection is established the frequency characteristics of the electromagnetic signals characteristics of the acoustic signal impinging on the samples of artificial crystalline quartz and real rocks represented by quartzite, and investigated the change of the spectral characteristics of the response of the distance between the capacitive sensor and the sample surface.

It is shown that using the method mechanoelectrical transformations it is possible to assess the degree of stress-strain state, temperature fields generated.

The efficiency of the method, the MEP in the assessment of defects of concrete under cyclic freezing-thawing.

Investigated the effect of humidity on the parameters of the electromagnetic response under pulsed mechanical excitation of samples of concrete. The developed equivalent circuit of the electrical processes that affect the response parameters at different degrees of humidity.

Was to estimate the impact of structural phase transitions during heat treatment of gypsum on the parameters of electromagnetic response on its shock excitation. Studies were conducted of the influence of lamination of composite materials on the parameters of the electromagnetic response by using the method of MEP. It is shown that increasing the number of layers significantly affects the range of response.

A number of papers devoted to mathematical models of the method of the MEP. At the same time realized the two approaches. One of them use the ray approximation for calculations of the movement of fronts of acoustic waves in the sample.

In another lies a numerical method for calculating wave fields in accordance with the equations included in the mathematical formulation of the plane problem of elasticity theory. It includes the equations of motion, geometric relations (Cauchy's ratio), physical relations, initial and boundary conditions.

Radiation mathematical model gives the possibility to set the size of the sample in the form of a parallelepiped, the coordinates of the source of mechanical excitation and signal receiver, attached to the pattern. The basis of this model is the method mechanoelectrical transformations. Was used a calculation method based on geometric acoustics. To reduce the complexity of the calculation, due to the need to consider the angles of reflection of rays from the boundaries of the sample, the sample space was replaced by an equivalent semi-infinite space, in which rays from a point of excitation propagate rectilinearly. This space has the appearance of a periodic structure and consists of cells, each of which contains an electric double layer (source mechanoelectrical transformations) and the receiver located in her mirror relative to adjacent cells. Each pair of cells has translational symmetry.

The feature is that induction is recorded component of the electromagnetic field from various sources MEP (no electromagnetic lag). At the same time, phase time-dependencies of components of the signal are determined by the phases of the acoustic waves in spatially separated sources to the MEP.

Based on these data was compiled the program algorithm of calculation which includes:

• Specify the size and coordinates of the electrical double layer and the surface of the receiver relative to the sample of rectangular shape (whose dimensions may also be specified).

• The assignment form of shock in time and computing the samples of its derivative in time using the given time interval.

• The calculation of the vertical component of the deformation rate at each point in the signal space corresponding cell, given the indexes of the vector of translation and the mirror symmetry of adjacent cells.

• Calculation of the time dependence of the velocity of this deformation, then the formation of a full time implementation for the cell.

Obtained temporary implementation of appropriately formed according to the provisional indexes for determining the values of vertical components of the induction vectors and the calculation of the bias current.

Thus, application of this model may be useful for selecting optimal parameters of the developed control method.

Calculations based on this model showed that the geometry of the system source of the acoustic signal – sample – capacitive receiver of the electromagnetic response has a significant impact on its shape and spectral characteristics.

In addition, the calculations showed that with a homogeneous distribution of sources the MEP to sample the main contribution to the signal response provide sources in the immediate vicinity of the signal receiver.

1.5. State of the problem and objectives of the study

As the analysis of literature, modern concepts of fracture mechanics are associated with the concentration of defects and the nature of their savings (chaotic or correlated). According to the method of acoustic emission and other methods shows that the distribution of defects by size is a power character, which is a sign of the coming destruction. For this reason, in the method of control of defects and stressstrain state must be provided the opportunity of determining the spatial distribution of defects in the object of study and the evaluation of the distribution of defects by size. In addition, the method should give an integrated assessment of the defects and the extent of stress-strain state.

Of the NDT methods is the preferred method mechanoelectrical transformation, which has a significant advantage over acoustic methods, such as contactless at check signal response. In addition, a capacitive receiver, the method mechanoelectrical transformations can perceive the signals of electromagnetic emission, which extends the possibilities of the method.

2. DEVELOPMENT OF A LABORATORY MODEL MULTI-TOUCH CONTROL SYSTEM

2.1. The prerequisites for the development of the equipment

It can be assumed that the metrological effect of this method is the MEP for the control of structural changes (defects and inhomogeneities of the structure) of the research object under the action of mechanical stress are that there is an accumulation of deformations of direct and reflected acoustic waves excitation, which is reflected in the response.

When using conventional methods mechanoelectrical transformations, it was observed that for the same geometry of the experiment and with a steady shock excitation with a ball or Electromechanical transducer with an accuracy noise repeatability of response was quite high. Thus, it is possible to conclude that the propagation of acoustic waves excitation in the sample, and, therefore, the process mechanoelectrical transformation is deterministic with low stochastic component.

The accumulation component of the useful signal on the background of interference is widely used (e.g., in location, astronomy).

The gist of it is that if the object of study, with a deterministic impulse response, to initiate a series of N pulses of a given shape, then the output will be a sequence of responses, representing the mixture of useful components and noise. For coherent addition of useful components, their level will increase by N times. Stochastic (random) components of the noise will be folded correlian, and their level will increase by \sqrt{N} times. As a result of addition of the feedback signal to the noise level of the signals will increase by \sqrt{N} times.

On playback response direct impact of stability of excitation. At the commonly used excitation is a variation of the interaction parameters of the impact device with the object of study because of the heterogeneity of its surface. Thus changing from impact to impact duration of impact device contact with the surface of the object of study, which affects the form of the generated acoustic waves. Measures

were taken to reduce the impact on the impact of heterogeneity of the surface of the object field by the use of metal plates, which effectively averaged the heterogeneity of the surface.

From the mathematical model it follows that the form of the response varies depending on the location of the signal receiver. For a point excitation of the sample it begins to spread to the front of the acoustic waves reflected from the boundaries. The response is formed as a superposition of signals due to mechanoelectrical transformations on the sources of MEP, through which the rays of the acoustic wave. The magnitude of the electrical signal of the receiver decreases with distance from the source MEP, therefore, ceteris paribus, with a uniform distribution of the sources of MEP material sample the main contribution to the response will be from sources MEP, located near its surface by capacitive receivers.

In addition, plays a role the size of the receiver. With the increase in size for high-frequency components of the signal response of the receiver can play the role of a diffraction grating. The wavelengths of the spectral components, a multiple linear fit to the dimensions of the capacitive plates of the receiver will coherently emerge, whereas for the other terms of the summation will be less favorable, including they can fully compensate for each other.

For more broadband reception of signals of response it is desirable to have the smaller receivers. On the other hand, the small size of the receiver reduces the signal/noise of the amplifier channel.

The problem is removed by using a multi-sensor system with small linear dimensions of the capacitive plates of the receiver under the condition of multiplepulse excitation of the object of study.

When using multiple excitation of the object of study of highly stable pulses and the allocation of the average value of the temporary implementation opens up the possibility to make a comparative analysis of certain parameters of the response due to changes of defects and the stress-strain state.

This raises the possibility of using statistical methods to assess the reliability of the obtained differences in the parameters of responses in a structural change of the object. For normal distributions the current values of the responses at each point of sampling is usually used the criterion of student (t-test).

2.2. Description of the layout

On the basis of the foregoing was developed laboratory model of a multitouch system control of defects and stress-strain state on the basis of the phenomenon mechanoelectrical transformations.

A block diagram of the multi-sensor control system shown in Fig. 2.1. The sample is excited with a given number of short acoustic pulses (beats) of a certain shape and amplitude piezoelectric transducer based on CTS–19, excited by an electric high-precision generator with adjustable waveform.



Figure 2.1. The block diagram of measurements.

The response is perceived by the system of differential capacitive sensors. Each of the differential capacitive sensor consists of 2 receiving plates, the measuring path consisting of emitter followers with a high impedance input and a low noise amplifier, the signal from which through the switching unit BNC - 2120 is supplied to a multifunction acquisition Board PCI – 6251 computer, in which is formed a

database for further processing. The system envisages to digitize the signal with a preset discretization step, optimal for solving various problems in comparative analysis. The measuring system involves the use of interchangeable system receivers, made on a plate of glass epoxy by etching. The shape and the number of receivers is determined by the objectives of the experiment.

Registered in digital form, the responses from each receiver are preprocessing: is the average value at each sample point of temporal realizations of the response with repeated excitations of the sample, normalized to the initial moment of excitatory impulses and the standard deviation for each point of time of the sample response. The latter is necessary for statistical evaluation of differences of average values of time samples of responses when changing the characteristics of the sample using comparative analysis.

It should be noted that the considered mathematical model is suitable only for the case of narrowband pulsed excitation, as in the model not provided in reality existing frequency dependence of attenuation.