

На правах рукописи



ХОРЕВ ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ

**МЕТОД И АППАРАТУРА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИНФРАКРАСНОГО КОНТРОЛЯ  
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.11.13 - Приборы и методы контроля природной  
среды, веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск-2013

Работа выполнена в Институте неразрушающего контроля Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Научный руководитель: **Вавилов Владимир Платонович**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ.

Официальные оппоненты: **Капранов Борис Иванович**, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор кафедры физических методов и приборов контроля качества

**Захаренко Владимир Андреевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология электронной аппаратуры» Омского Государственного Технического Университета (ОмГТУ)

Ведущая организация: Сибирский научно исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина (СибНИА), г. Новосибирск

Защита состоится «5» ноября 2013 г. в 17.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Савиных, дом 7, ауд. 215 (актовый зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». по адресу: 634034 г. Томск, ул. Белинского 55.

Автореферат разослан «    » сентября 2013г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.т.н.



---

Е.А. Васендина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность диссертационных исследований** обусловлена широкими применением новых конструкционных материалов, к которым, относятся современные *полимерные композиционные материалы* (далее ПКМ), отличающиеся высокой прочностью и технологичностью при малом удельном весе. Однако, при всех их достоинствах, полимерные композиционные материалы могут обладать специфическими дефектами, которые образуются в процессе производства и эксплуатации (расслоения, непроклеи, трещины, пористость, разрыв матрицы и т.п.).

Проблема неразрушающего контроля (НК) ПКМ обуславливается рядом особенностей и физических явлений, возникающих в процессе использования различных методов контроля. Таким образом, актуальность настоящих диссертационных исследований обусловлена:

- расширяющимся применением ПКМ нового поколения, прежде всего, в высокотехнологичных отраслях, таких как авиакосмическая техника, ядерная энергетика, автомобилестроение, судостроение и т.п.;
- возможностью образования недопустимых специфических дефектов в процессе изготовления или эксплуатации ПКМ;
- ограничениями, присущими традиционным видам неразрушающего контроля, при обнаружении дефектов ПКМ;
- положительными результатами практического применения теплового метода контроля ПКМ, включая выполненные за рубежом исследования в области ультразвуковой (УЗ) и инфракрасной (ИК) термографии;
- отсутствием на российском рынке коммерческих систем теплового контроля композиционных материалов, в особенности, с использованием метода УЗ ИК термографии (УЗ тепловидения).

**Цель работы** - разработка метода и устройства для ультразвукового тепловизионного неразрушающего контроля ПКМ.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач применялись теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретические исследования использовали методы численного моделирования. Экспериментальные исследования выполнены на разработанной автором установке для контроля ПКМ.

**Достоверность полученных результатов.** Измерения осуществлялись на аттестованном и поверенном оборудовании с использованием методик, соответствующим требованиям ГОСТов и сертификатам РФ.

**Научная новизна.** Решение поставленных задач определило новизну данной диссертационной работы, которая заключается в следующем.

- Разработаны теплофизическая и термомеханическая трехмерные модели генерации тепловых сигналов, стимулируемых мощным ультразвуком, что позволило оценить эквивалентную мощность тепловыделения в дефектных зонах, а также исследовать влияние частоты ультразвука, взаимной ориентации и расстояния между точкой ввода ультразвука и дефектами на регистрируемые температурные сигналы.
- Экспериментальным путем выявлены и подтверждены вышеуказанные закономерности УЗ ИК термографического контроля применительно к композиционным материалам, в

особенности, углепластику, являющимся одним из основных конструкционных материалов в авиакосмической промышленности. В частности, установлено, что эквивалентная мощность тепловыделения в зонах ударных повреждений углепластика достигает сотен милливольт, а температурно-частотный спектр сигналов обнаруживает значительное влияние частоты ультразвука на обнаружение скрытых дефектов.

- Выявлена высокая эффективность применения УЗ ИК термографического контроля для обнаружения ударных повреждений в слоистых композитах и сотовых структурах с композиционной обшивкой и неметаллическими ячейками.
- Установлено, что температурные сигналы в зонах структурных дефектов композитов прямо пропорциональны введенной акустической энергии и длительности стимуляции в диапазоне времен стимуляции до 10-15 секунд при электрической мощности стимуляции до 2,5 кВт.

#### **Практическая ценность работы** заключается в следующем.

- Разработана экспериментальная установка УЗ ИК термографического контроля, использующая непрерывное и импульсное возбуждение ультразвука магнитострикционным способом, а также тепловизионный способ регистрации динамических температурных полей;
- Выполнены приоритетные в отечественной практике экспериментальные исследования возможности УЗ ИК термографического контроля композиционных материалов, используемых в авиакосмической промышленности, ядерной энергетике, автомобилестроении и судостроении.
- Результаты данной работы используются в «Новоуральском научно-конструкторском центре» при разработке технологии контроля изделий из углепластика, используемых в ядерной энергетике, а также в МНПО «Спектр» (г. Москва) при испытаниях материалов авиакосмического профиля.
- Экспериментальная установка УЗ ИК термографического контроля используется в Национальном исследовательском Томском политехническом университете при выполнении выпускных работ бакалавров и магистров, проведении лабораторных работ студентами специальности «Физические методы и приборы контроля качества», а также слушателями курсов повышения квалификации в области теплового контроля.

**Личный вклад автора** - состоит в проведении научных исследований, анализе полученных данных, обработке полученных результатов и участии в разработке системы УЗ ИК термографического контроля композиционных материалов.

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту.**

1. Метод УЗ ИК термографии, восходящий к низкочастотной тепловизионной вибротермографии и испытывающий определенное возрождение в последнее десятилетие, перспективен для обнаружения структурных неоднородностей в твердых телах, которые проявляют эффекты механического гистерезиса и внутреннего трения. В особенности, данный метод пригоден для выявления трещин ударного и усталостного происхождения в композиционных и сотовых изделиях, используемых в авиакосмической технике, ядерной энергетике, автомобиле- и судостроении.

2. Наиболее используемые в настоящее время в УЗ ИК термографии акустические колебания с частотой до нескольких десятков килоГерц и электрической мощностью на

магнитострикторе до нескольких килоВатт не вызывают заметного нагрева «бездефектного» материала вследствие механического гистерезиса. Феноменологическая модель тепловыделения в дефектных зонах предполагает, что эффект внутреннего трения подобен постоянно-действующему источнику тепла, что позволяет использовать для оценки мощности тепловыделения классическую теорию теплопроводности. Сопоставление данных феноменологической модели и экспериментальных данных позволяет оценить вышеуказанную мощность тепловыделения (сотни милливольт при обнаружении трещин в композитах).

3. Термомеханическая модель УЗ ИК термографии предполагает совместное решение трехмерного уравнения распространения акустических волн и теплопроводности, на основании чего исследуют зависимости температурных сигналов в дефектных зонах от механических свойств материала (коэффициента Пуассона и модуля Юнга), частоты акустических волн, амплитуды колебаний магнитостриктора, расстояния между точкой УЗ стимуляции и точкой наблюдения, а также их взаимной ориентации.

4. Областью применения метода УЗ ИК термографии является неразрушающий контроль трещин ударного и усталостного происхождения, а также расслоений, непроклеев и других дефектов без взаимного проникновения контактирующих материалов. Отрасли преимущественного использования метода УЗ ИК термографии: авиакосмическая промышленность, ядерная энергетика, автомобиле- и судостроение.

5. Амплитуда температурных сигналов пропорциональна коэффициенту трения и эффективной (поглощенной) акустической энергии. В диапазоне исследованной электрической мощности УЗ стимуляции (до 2,5 кВт) температурные сигналы пропорциональны электрической мощности на магнитострикционном инденторе.

6. Наибольшие температурные сигналы возникают при перпендикулярном расположении дефектов типа трещин относительно преимущественного направления распространения ультразвука. Поэтому при проведении сплошного контроля изделий из композиционных материалов целесообразна последовательная УЗ стимуляция изделий в различных точках, или одновременная стимуляция нескольких точек.

**Апробация работы.** Основное содержание диссертационной работы докладывалось на Международной конференции по физической мезомеханике (г. Томск, Россия, 2011 г.), Ежегодной конференции Британского института неразрушающего контроля (г. Телфорд, Великобритания, 2011 г.), Международной конференции «Электроника-2012» (г. Созополь, Болгария, 2012 г.) и Научно-практической конференции по инновациям в неразрушающем контроле с международным участием «СибТест» (г. Томск, Россия, 2013 г.).

**Публикации.** Основные результаты исследований отражены в 8-ми публикациях, в том числе 4 публикации в изданиях из списка ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 100 наименований, а также двух приложений. Содержит 119 страниц текста, 73 рисунка и 13 таблиц.

### Основное содержание работы.

Во введении обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационных исследований. Сформулирована цель диссертационной работы, поставлены основные задачи, раскрыта научная новизна и практическая ценность исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор основных методов контроля ПКМ, этапы развития теплового метода контроля, рассмотрены стандартные методы неразрушающего контроля ПКМ, а также предложен метод УЗ ИК термографии для решения поставленной задачи.

Стандартные методы неразрушающего контроля неспособны в полном объеме выявлять специфические дефекты ПКМ, образующиеся в процессе изготовления или эксплуатации. Следовательно, имеется перманентная необходимость разработки новых методов неразрушающего контроля ПКМ.

Для решения поставленной задачи было предложено использовать метод *активного теплового контроля*, включающий использование источников тепловой стимуляции, в основе работы которых заложен *термоупругий эффект*. Тепловой контроль в России в последние годы интенсивно развивается (работы В.П.Вавилова, О.Н. Будадина, В.А. Захаренко, Е.В. Абрамовой, Д.А.Нестерука и др.), однако к началу диссертационных исследований отсутствовали работы в области УЗ ИК термографии. Приоритет в этой области принадлежит зарубежным исследователям (G. Busse, M. Morbidini, K. Reifsneider, J. Renshaw, X. Maldague и др.).

В процессе контроля в материалах с дефектами структуры под воздействием внешней механической стимуляции возникают температурные поля, обусловленные рассеянием энергии колебаний на дефектах и превращением её в тепловую энергию за счет внутреннего трения и механического гистерезиса. В областях нарушения однородности структуры (дефектах) возникают локальные зоны перегрева объекта. Пример термограммы изделия с дефектом, полученной с помощью механической стимуляции, представлен рисунке 1.

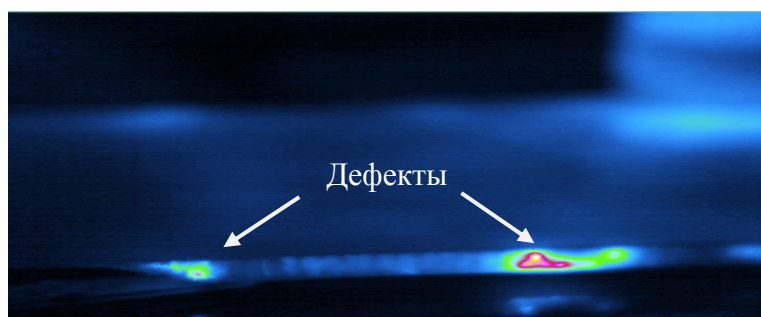


Рисунок 1 -Термограмма дефектной сотовой панели в процессе УЗ стимуляции

Из-за недостаточной изученности метода УЗ ИК термографии необходимо решить следующие задачи:

- на основе теоретических и экспериментальных исследований изучить процесс УЗ стимуляции ПКМ и выявить основные закономерности поведения температурных сигналов в зонах дефектов;
- разработать экспериментальную установку и методику испытаний ПКМ;

- оценить достоверность полученных результатов и получить экспериментальные зависимости температурных сигналов от параметров УЗ стимуляции и геометрических характеристик контроля.

**Вторая глава** посвящена описанию особенностей метода УЗ ИК термографии, а также механизма возникновения термоупругого эффекта в твердых телах при их облучении мощным ультразвуком.

Показано, что при механическом сжатии или растяжении, а также при разрушении, в твердых телах возникают температурные градиенты, обусловленные процессами преобразования механической энергии в тепловую. Выделение тепла происходит либо вследствие механического гистерезиса, либо за счет пластической деформации при возникновении и распространении трещин и разрушении.

Основными механизмами тепловыделения при прохождении акустических волн через твердые тела являются *механический гистерезис*, роль которого в неразрушающих испытаниях незначительна, и, в особенности, *внутреннее трение*, которое является основным источником повышения температуры в дефектных зонах.

**Третья глава** посвящена моделированию термомеханических эффектов в материалах со структурными неоднородностями при использовании метода УЗ ИК термографии. Для определения энергии (мощности), генерируемой дефектами, в особенности, трещинами, предложена теплофизическая модель, которая исходит из того, что распространение ультразвука в бездефектном материале происходит практически без поглощения и, соответственно, без повышения средней температуры материала. Существенное поглощение ультразвука имеет место при наличии структурных неоднородностей вследствие феномена трения стенок трещин.

Описанный в диссертации феноменологический алгоритм был реализован в виде компьютерной программы ThermoSource и применен для моделирования температурных полей в ПКМ. Пример результатов расчета для углепластика толщиной 5 мм, содержащего трещины различного размера, приведен на рисунке 2.

Более реалистичной является предложенная в диссертации термомеханическая модель генерации тепла в дефектах, которая реализована в компьютерной программе ThermoSon. На рисунке 3 приведены типичные форматы ввода и вывода данных при работе с данной программой.

На рисунках 4 - 5 показаны основные зависимости температурного сигнала  $\Delta T$  от параметров УЗ стимуляции.

Очевидно, что расположение точки ввода УЗ колебаний относительно ориентации трещин должно оказывать существенное влияние на амплитуду температурных сигналов. Изменение  $\Delta T$  в зависимости от положения точки ввода ультразвука показано на рисунке 6. Интерпретация полученных сигналов не является тривиальной, поскольку нужно принимать во внимание возможные многократные отражения между плоскими трещинами и краями образца.

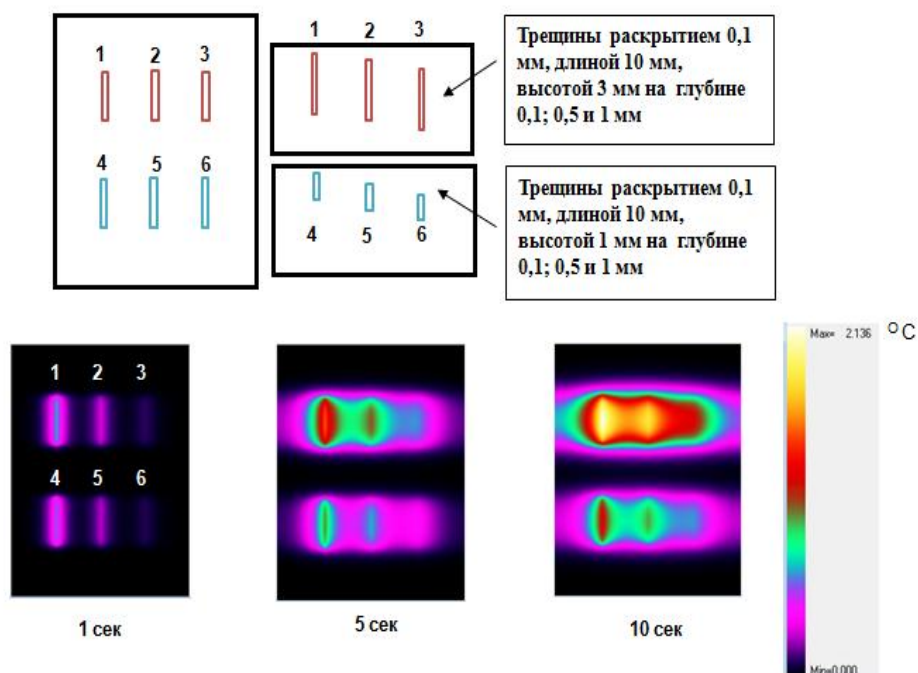
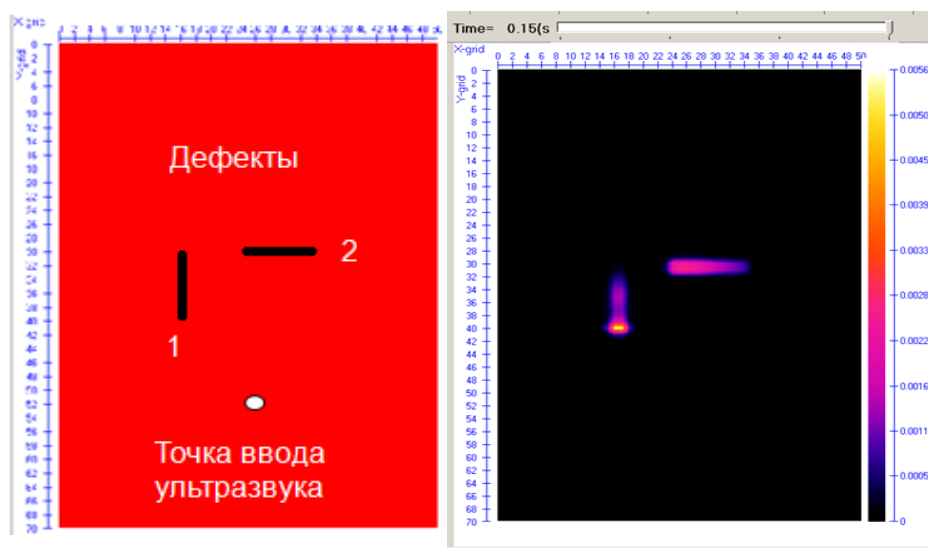


Рисунок 2 – Результат трехмерного компьютерного моделирования процесса генерации тепловой энергии в подповерхностных трещинах (углепластик толщиной 5 мм)



а)

б)

а - изделие; б - поле температуры через 0,15 с после начала УЗ стимуляции

Рисунок 3 - Пример результатов теоретического моделирования термомеханических эффектов с помощью программы ThermoSon (углепластик толщиной 1 мм, ТФХ: коэффициент теплопроводности 0,33; 0,48 и 0,55 Вт/(м·К), плотность 1570 кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость 780 Дж/(кг·К); модуль Юнга 6,8·10<sup>10</sup> Н/м<sup>2</sup>; коэффициент Пуассона 0,36; два взаимно-перпендикулярных дефекта длиной 5 мм нулевой толщины, коэффициент трения стенок трещины 1, частота УЗ возбуждения 22 кГц, амплитуда колебаний индентора 7 мкм)



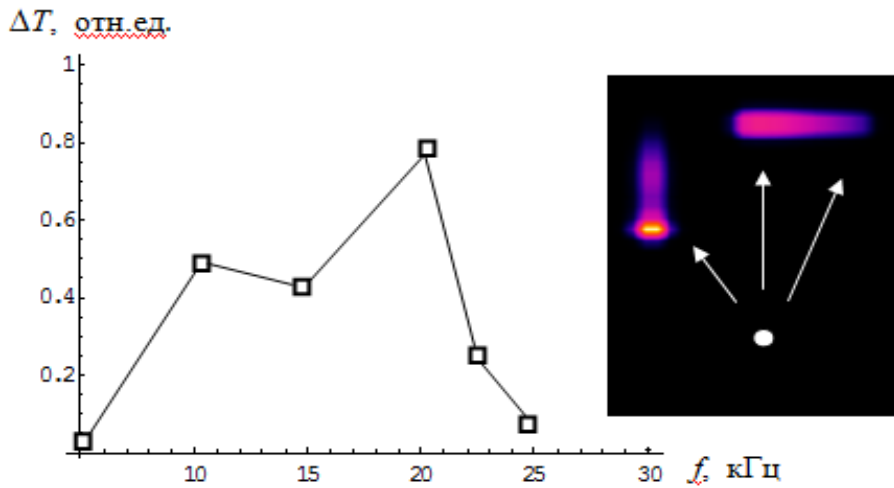


Рисунок 4 - Изменение температурного сигнала над дефектом при изменении частоты ультразвука (углепластик толщиной 1 мм)

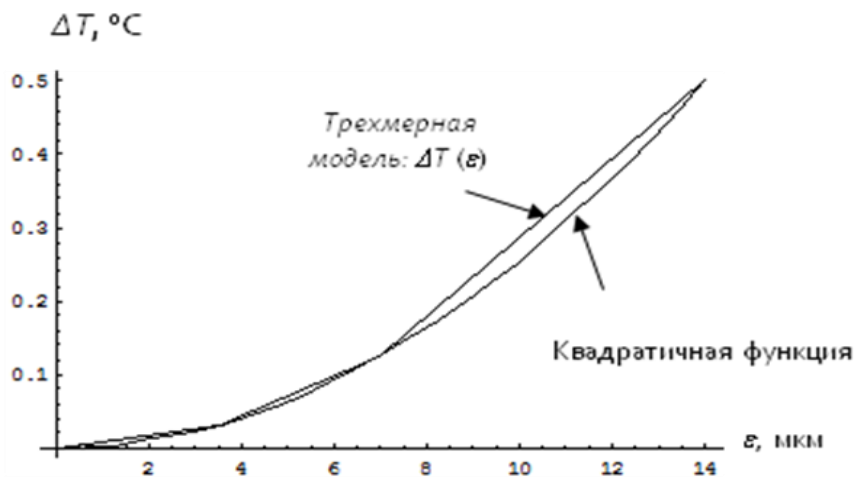


Рисунок 5 - Зависимость дифференциального температурного сигнала над дефектом от амплитуды акустических колебаний на инденторе (углепластик толщиной 1 мм)

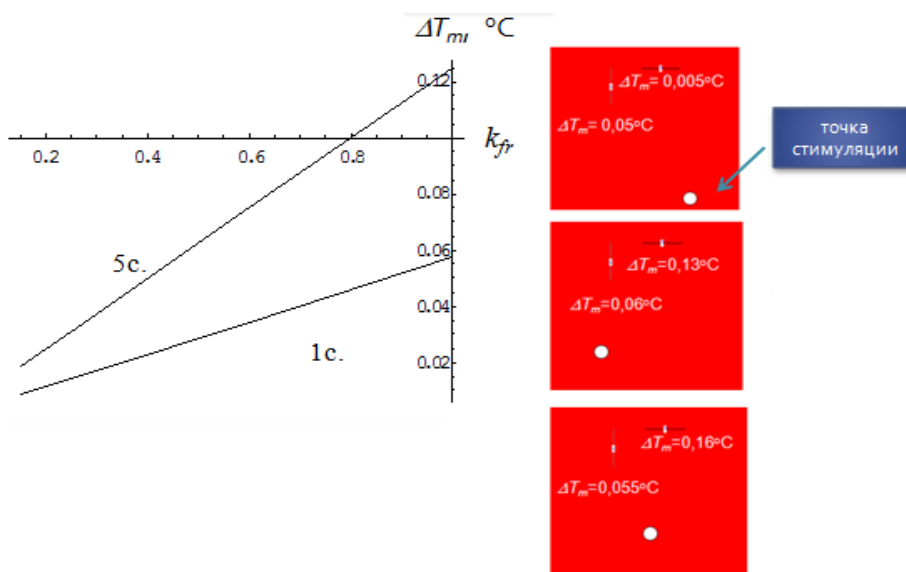


Рисунок 6 - Расчетные температурные сигналы в углепластике в зависимости от основных дефектных параметров (длина трещин 5 мм, длительность УЗ стимуляции 1 с)

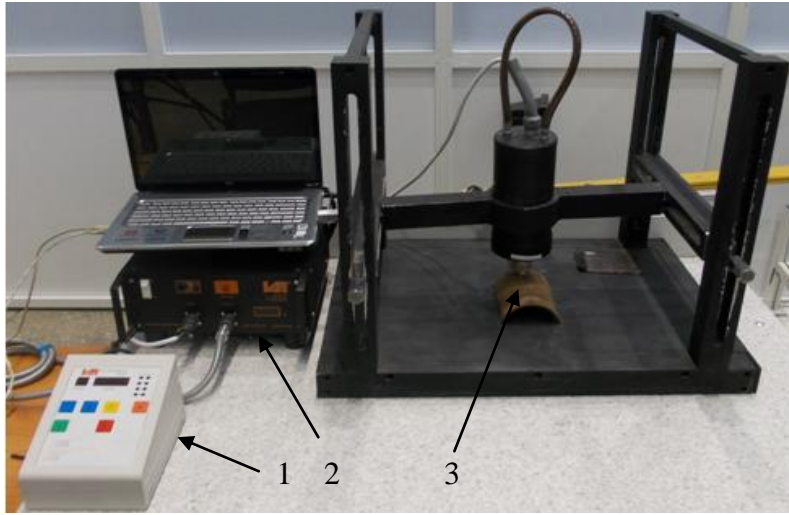
Результаты исследований, описанных в третьей главе.

- Предложена простая феноменологическая модель, которая сводит тепловыделение в дефектах к действию локальных источников тепла.
- Разработана более строгая термомеханическая модель тепловыделения в дефектных зонах, реализацию которой проводят в два этапа: 1) решение трехмерной задачи распространения УЗ колебаний в пластине и вычисление мощности, генерируемой дефектом с нулевой толщиной вследствие внутреннего трения; 2) решение трехмерной задачи распространения тепла от источника, мощность которого определены на первом этапе.
- С помощью данных моделей исследованы зависимости температурных сигналов в дефектных зонах от механических свойств материала (коэффициента Пуассона и модуля Юнга), частоты акустических волн, амплитуды колебаний магнитостриктора, расстояния между точкой УЗ стимуляции и точкой наблюдения, а также их взаимной ориентации.
- Амплитуда температурных сигналов пропорциональна коэффициенту трения и эффективной (поглощенной) акустической энергии.
- Расчетным путем получены оценки так называемого температурно-акустического спектра, вид которого для композитов типа углепластика показывает существенную зависимость температурных сигналов от частоты ультразвука.
- Наибольшие температурные сигналы возникают при перпендикулярном расположении дефектов типа трещин относительно преимущественного направления распространения ультразвука.

**Четвертая глава** содержит описание аппаратуры для экспериментальных исследований. На первом этапе исследований для непрерывной УЗ стимуляции дефектов использовали комплекс на базе устройства финишной обработки металлов (УФО) с работой в режиме постоянной стимуляции.

Для проведения дальнейших исследований был разработан специализированный дефектоскоп для активного ТК с УЗ стимуляцией. Дефектоскоп, изображенный на рисунке 7, включает ИК тепловизор и комплекс УЗ стимуляции, состоящий из магнитострикционного УЗ-излучателя, блока управления и специальной технологической оснастки для крепления излучателя и экспериментальных образцов.

Динамические температурные сигналы регистрировали с помощью ИК тепловизоров ThermoCAM P65 производства фирмы FLIR Systems (США) и NEC TH-9100 производства фирмы NEC Avio (Япония).



1- панель управления; 2 - блок питания; 3 - магнитострикционный преобразователь.  
Рисунок 7 - Тепловизионный дефектоскопа с УЗ стимуляцией

В пятой главе описаны экспериментальные результаты по УЗ ИК термографическому контролю структурных неоднородностей в ПКМ и количественной оценке ряда показателей процедур испытаний. В качестве таких показателей выбраны дифференциальный температурный сигнал  $\Delta T$  и отношение сигнал/шум  $SNR$ . Результаты приведены на рисунках 8 - 9. Изменение дифференциальных температурных сигналов во времени  $\Delta T(\tau)$  описывается приблизительно линейными функциями независимо от типа УЗ стимуляции, что хорошо согласуется с теоретическими предположениями о линейности термомеханического процесса, которые приведены во второй главе. При стимуляции пакетом УЗ импульсов температурное поле на поверхности образца характеризуется более высоким визуальным контрастом между дефектными и бездефектными участками, по – видимому, благодаря более короткому времени стимуляции и, следовательно, меньшей диффузии тепловой энергии в материале (аналогично тому, как это имеет место при поверхностной оптической стимуляции).

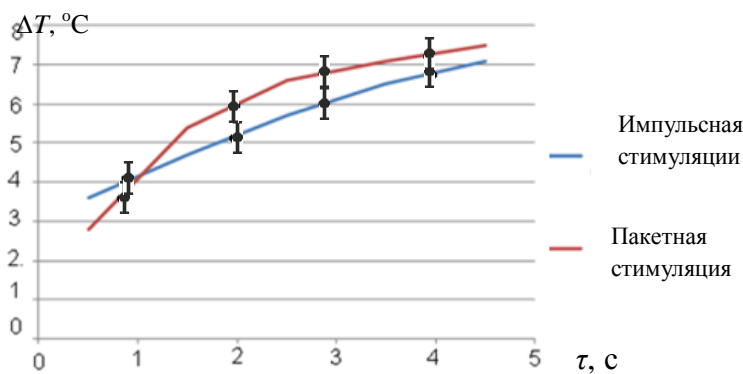


Рисунок 8 - Эволюция  $\Delta T$  в зоне дефектов при УЗ стимуляции органопластика

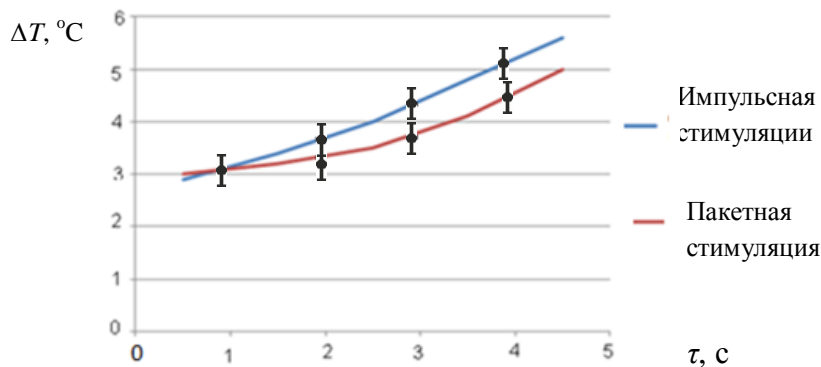


Рисунок 9- Эволюция  $\Delta T$  в зоне дефектов при УЗ стимуляции углепластика

Для более объективного сравнения процедур УЗ ИК термографии целесообразно применить нормирование регистрируемых сигналов  $\Delta T$  на мощность УЗ возбуждения (электрическую мощность на магнитоистраторе)  $P$ :

$$K = \Delta T / P, \quad (1)$$

где параметр  $K$  назван относительным температурным сигналом, °C/Вт.

При заданном значении акустической мощности на входе преобразователя амплитуда колебаний определяется сопротивлением нагрузки. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Влияние типа и длительности УЗ стимуляции на относительный температурный сигнал при тепловом контроле углепластика

Время стимуляции \ Вид стимуляции	1 с	2 с	3 с	4 с	5 с
Импульсный, 1 кВт	7.2	9.4	11.4	13	14.2
Постоянный, 150 Вт	5.6	10.8	13.2	14.2	15.0
Импульсный, 1,5 кВт	3.86	4.53	5.33	6.4	7.47
Постоянный 225 Вт	4.0	4.26	4.66	5.46	6.67

Поскольку величина  $\Delta T$  пропорциональна поглощенной УЗ энергии, более подходящим критерием сравнения процедур ТК является отношение сигнал/шум  $SNR$ , которое учитывает не только амплитуды «полезных» температурных сигналов, но и помехи, сопутствующие той или иной процедуре испытаний.

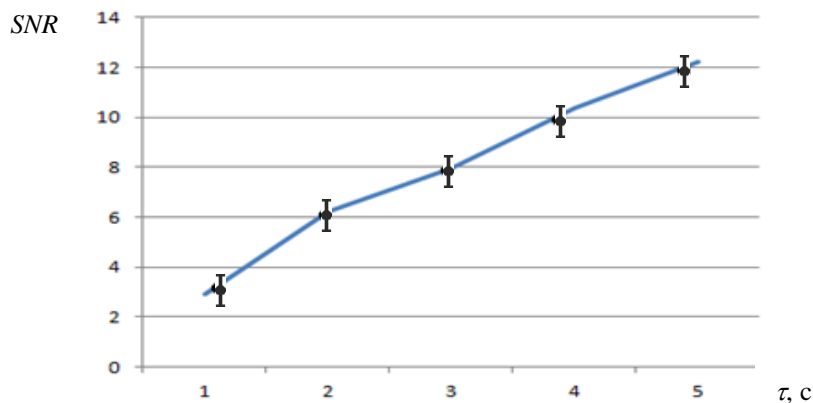


Рисунок 10 - График изменения  $SNR$  в зависимости от времени УЗ стимуляции

Установлено, что избыточная температура изделия линейно возрастает во времени, а отношение сигнал/шум увеличивается с ростом времени УЗ стимуляции. Физически это объясняется тем, что линейно возрастают дифференциальные сигналы  $\Delta T$ , а дисперсия температурного шума  $\sigma$  остается постоянной. При этом диффузия тепла в «поперечных» направлениях относительно невелика вследствие сравнительно низкой теплопроводности композита. Линейный характер тепловыделения в дефекте при его УЗ стимуляции в обобщенном виде проиллюстрирован данными в таблице 2 и на рисунке 10, где значения  $SNR$  приведены в зависимости от электрической (условной) мощности на инденторе и длительности УЗ стимуляции.

Таблица 2 - Зависимость отношения сигнал/шум от времени и мощности УЗ стимуляции

Электрическая мощность стимуляции, Вт	Время стимуляции, с	Условная энергия стимуляции, Дж	Отношение сигнал/шум ( $SNR$ )
1000	3	3000	16,3
1500	3	4500	23.0
2000	3	6000	69.4
1000	4	4000	17.8
1500	4	6000	27.7
2000	4	8000	57,3
1000	5	5000	24,1
1500	5	7500	60
2000	5	10000	71.2

Следующим этапом исследований был анализ текстуры температурного поля в зоне трещин, стимулируемых ультразвуком, а также оценка возможного нагрева бездефектного материала. Результаты показаны на рисунке 12 и в таблице 3.

Очевидно, что максимальный рост температуры происходит непосредственно над дефектом. При длительной УЗ стимуляции наблюдается незначительный рост температуры в бездефектной области, что можно объяснить диффузией тепла за счет теплопроводности, а не поглощением УЗ энергии. Были выполнены исследования влияния иммерсионной жидкости на эффективность УЗ стимуляции. Результаты представлены в таблице 4. В данных экспериментах между индентором и образцом размещали слой жидкости высотой от одного до двух миллиметров. Стимуляцию осуществляли как «короткими» (0,3 с), так и «длинными» импульсами.

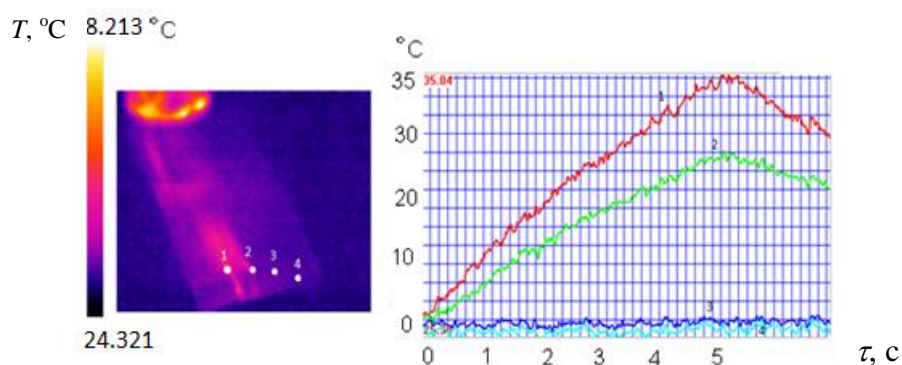


Рисунок 11 - Изменение температуры во времени в различных точка поверхности образца из углепластика при УЗ стимуляции мощностью 1 кВт в течение 5 с

Таблица 3 - Оценка температуры в различных точках поверхности образца из углепластика толщиной 1 мм при УЗ стимуляции

Координаты точки наблюдения на термограмме	Номер температурной кривой	Максимальная Температура в точке, °C	Время достижения максимальной температуры в заданной точке, с
Электрическая мощность 1 кВт, время стимуляции 5 с,			
140/190	1	37.38	5.1
146/185	2	33.128	5.12
180/177	3	27.00	нет данных
207/107	4	26.73	нет данных
Электрическая мощность 2 кВт, время стимуляции 3 с,			
140/190	1	60,3	192
124/190	2	35,18	193
109/189	3	31.1	193
84/184	4	29,11	194

Таблица 4 - Влияние иммерсионной жидкости на отношение сигнал/шум (трещина в углепластике толщиной 3 мм, электрическая мощность на инденторе 1,9 кВт)

Тип жидкости	Время стимуляции, с	Дифференциальный температурный сигнал $\Delta T$ , °C	Отношение сигнал/шум $S$
Глицерин	0,3	- *	- *
Литол	0,3	1,2	8,8
Без иммерсионной жидкости	0,3	1,1	10
Глицерин	3	6,2	9,1
Литол	3	5,6	8,5
Без иммерсионной жидкости	3	5,9	5,2

\* Сигнал ниже уровня шума

Интуитивно ожидалось, что ориентация точки ввода ультразвука относительно трещин существенно влияет на  $\Delta T$ . Эксперимент проводили на образце из углепластика круглой формы толщиной 2 мм с искусственной боковой трещиной. Максимальные сигналы наблюдались при угле  $90^\circ$ , что соответствовало перпендикулярному облучению трещины ультразвуком (результаты представлены в таблице 5).

Таблица 5 - Влияние взаимной ориентации точки ввода ультразвука и дефекта на амплитуду температурных сигналов (мощность УЗ стимуляции 1,3 кВт, длительность импульса 1 с, расстояние до точки ввода 5 см)

Угловое положение точки ввода ультразвука, °	Сигнал/шум, $SNR$	Дифференциальный температурный сигнал $\Delta T$ , °C
0	- *	- *
20	6,3	1,9
70	31,8	6,2
90	49	7,1

\* Сигнал ниже уровня шума

В результате вышеописанных исследований можно сделать вывод о существенном влиянии взаимной ориентации точки ввода ультразвука и узкого протяженного дефекта (трещины). Лучше всего обнаруживаются трещины, расположенные перпендикулярно радиальному распространению ультразвука, тогда как параллельные дефекты создают весьма слабые сигналы.

Особенности выявления двух трещин одновременно были исследованы в эксперименте, результаты которого приведены в таблице 6. Контролировали элемент авиационной панели из углепластика толщиной 5 мм с ребрами жесткости, в котором в силу существенной анизотропии композита было возможно ввести две перпендикулярно расположенных трещины.

Таблица 6 - Результаты эксперимента по выявлению двух перпендикулярно расположенных дефектов в углепластике

Угол ввода, °	Сигнал/шум $SNR$ , 1-й дефект	Сигнал/шум $SNR$ , 2-й дефект	$\Delta T$ , °C 1-й дефект	$\Delta T$ , °C 2-й дефект
0	13,9	Нет данных	0,39	Нет данных
45	40,2	Нет данных	2,34	Нет данных
90	44,8	16,62	3,34	1,95

Анализируя вышесказанное можно сделать вывод, что для наиболее достоверного обнаружения дефектов в композиционных материалах необходимо стимулировать объект контроля двумя и более источниками акустической энергии одновременно.

В следующем эксперименте исследовали стоячие волны в образцах правильной формы. Теоретически ожидалось появление чередований теплых и холодных участков на поверхности объекта контроля вследствие образования стоячих волн в изделиях правильной формы. Данный эффект является частотно-зависимым, носит непостоянный характер и проявляется не на каждом экспериментальном образце. В выполненных экспериментальных исследованиях стоячие волны наблюдались в углепластиковом образце прямоугольной формы, изображенном на рисунке 12.

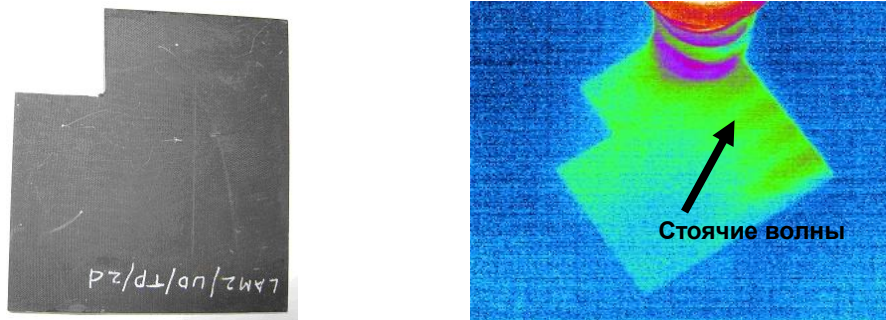


Рисунок 12 - Образование стоячих волн в образце из углепластика толщиной 3 мм

Следует отметить, что стоячие волны в данном образце подавлялись при внесении в образец ударных повреждений, по-видимому, вследствие изменения геометрии распространения УЗ волн.

Результаты исследований, описанных в пятой главе.

- Приведены результаты экспериментальных исследований, направленные на определение особенностей взаимодействия акустической энергии УЗ диапазона, вводимой с помощью мощного магнитострикционного излучателя в анизотропные композиционные материалы.
- Установлено, что, в соответствии с теоретическими предсказаниями, амплитуда температурных сигналов в дефектных зонах пропорциональна поглощенной акустической энергии (электрической мощности на магнитострикторе) и не зависит от характера изменения акустических сигналов во времени. Предпочтительность мощных коротких импульсов по сравнению с маломощной, но длительной стимуляцией, не установлена, по-видимому, вследствие сравнительно низкой интенсивности тепловой диффузии в композиционных материалах.
- Согласно предсказаниям термомеханической теории внутреннего трения максимальные температурные сигналы образуются в зоне трещин с высоким коэффициентом трения стенок. УЗ стимуляция дефектов округлой формы, в частности, попытка обнаружить унос материала (коррозию) не привела к положительным результатам.
- Наличие иммерсионной жидкости не оказывает существенного влияния на температурные сигналы вследствие того, что в настоящих исследованиях применен магнитострикционный принцип возбуждения акустических волн.
- Экспериментально показано, что эффективность УЗ ИК термографического контроля максимальна при облучении трещин ультразвуком по нормали и снижается с увеличением расстояния между точкой ввода ультразвука и дефектами. Поэтому целесообразна последовательная УЗ стимуляция изделий в различных точках, или одновременная стимуляция нескольких точек.
- Площадь одновременного контроля с использованием метода УЗ ИК термографического метода приблизительно пропорциональна квадрату акустической энергии и ограничена возможной деструкцией контролируемого материала в точке ввода ультразвука. Максимальная ожидаемая производительность испытаний составляет около 0,01 м<sup>2</sup>/с,



или 36 м<sup>2</sup>/час без учета времени подготовки и переоснастки оборудования, а также обработки данных.

- В процессе УЗ стимуляции объектов определенной формы и размеров возможно образование стоячих волн, которые можно подавить, применяя девиацию несущей УЗ частоты.

### **Основные результаты диссертационных исследований**

- В результате обзора научно-технической литературы показано, что традиционные методы НК не решают в полном объеме проблему неразрушающих испытаний ПКМ. Сделан вывод, что перспективным методом испытаний изделий сложной формы из ПКМ является вибротепловизионный метод, названный в данной работе «ультразвуковым инфракрасным термографическим (тепловизионным) контролем». Особенности данного метода и физические явления, происходящие в объектах контроля при УЗ стимуляции, слабо изучены с точки зрения практического применения метода.
- Основными механизмами тепловыделения при прохождении акустических волн через твердые тела являются механический гистерезис, роль которого в неразрушающих испытаниях незначительна, и, в особенности, внутреннее трение, которое является основным источником повышения температуры в дефектных зонах.
- Областью применения метода УЗ ИК термографии является НК трещин ударного и усталостного происхождения, а также расслоений, непроклеев и других дефектов без взаимного проникновения контактирующих материалов. Отрасли преимущественного использования метода УЗ ИК термографии: авиакосмическая промышленность, ядерная энергетика, автомобиле- и судостроение.
- Предложена простая теплофизическая модель оценки тепловыделения в дефектных зонах при УЗ стимуляции, в рамках которой предполагается, что трещина феноменологически проявляет себя в поверхностном температурном поле как источник внутреннего тепловыделения. Таким образом, путем сопоставления теоретических и экспериментальных данных, возможна оценка мощности рассеяния УЗ энергии на дефектах.
- Разработана более строгая термомеханическая модель тепловыделения в дефектных зонах, реализацию которой проводят в два этапа: 1) решение трехмерной задачи распространения УЗ колебаний в пластине и вычисление мощности, генерируемой дефектом с нулевой толщиной вследствие внутреннего трения; 2) решение трехмерной задачи распространения тепла от источника, мощность которого определены на первом этапе.
- С помощью вышеуказанной модели исследованы зависимости температурных сигналов в дефектных зонах от механических свойств материала (коэффициента Пуассона и модуля Юнга), частоты акустических волн, амплитуды колебаний магнитостриктора, расстояния между точкой УЗ стимуляции и точкой наблюдения, а также их взаимной ориентации.
- Амплитуда температурных сигналов пропорциональна коэффициенту трения и эффективной (поглощенной) акустической энергии. В диапазоне исследованной электрической мощности УЗ стимуляции (до 2,5 кВт), температурные сигналы пропорциональны электрической мощности на магнитострикционном инденторе.

- Расчетным путем получены оценки так называемого температурно-акустического спектра, вид которого для композитов типа углепластика показывает существенную зависимость температурных сигналов от частоты ультразвука, что, по-видимому, связано с комбинированным проявлением эффектов механического гистерезиса и резонансных явлений.
- Наибольшие температурные сигналы возникают при перпендикулярном расположении дефектов типа трещин относительно преимущественного направления распространения ультразвука. Поэтому при проведении сплошного контроля изделий из ПКМ целесообразна последовательная УЗ стимуляция изделий в различных точках, или одновременная стимуляция нескольких точек.
- Для экспериментальных исследований композиционных материалов разработан экспериментальный комплекс, включающий вышеупомянутые устройства УЗ стимуляции, ряд моделей ИК тепловизоров, компьютер типа «лэп-топ» и устройство управления на базе модуля Ke-USB24R, а также оригинальное программное обеспечение.
- Для непрерывного возбуждения акустических волн использована стандартная установка финишной обработки металлов (частота 22 кГц, электрическая мощность на магнитострикторе до 300 Вт, длительность стимуляции композиционных материалов без охлаждения до 20 с). Для импульсной УЗ стимуляции разработана специализированная установка (изготовитель ООО «Инлаб»): частота 22 кГц, электрическая мощность на магнитострикторе до 2,5 кВт, минимальная длительность импульса 0,1 с, шаг дискретизации 0,1 с, длительность стимуляции композиционных материалов без охлаждения до 20 с. В данной установке, с целью предотвращения образования стоячих волн, предусмотрена девиация частоты.
- Экспериментальные исследования выполнены с использованием импульсной, периодической и непрерывной УЗ стимуляции, а также стандартных ИК тепловизоров высокого уровня: ThermaCAM P65 и NEC Avio TH-9100. Предпочтительность применения мощных коротких импульсов по сравнению с маломощной, но длительной стимуляцией, не подтверждена, по-видимому, вследствие сравнительно низкой интенсивности тепловой диффузии в композиционных материалах, например, по сравнению с металлами.
- Согласно предсказаниям термомеханической теории внутреннего трения максимальные температурные сигналы образуются в зоне трещин с высоким коэффициентом трения стенок. УЗ стимуляция дефектов округлой формы, в частности, попытка контроля уноса материала (коррозии), не привела к положительным результатам.
- Установлено, что наличие иммерсионной жидкости не оказывает существенного влияния на температурные сигналы вследствие того, что в настоящих исследованиях применен магнитострикционный принцип возбуждения акустических волн.
- Эффективность УЗ термографического контроля максимальна при облучении трещин ультразвуком по нормали к трещинам и снижается с увеличением расстояния между точкой ввода ультразвука и дефектами. Поэтому при проведении сплошного контроля изделий из ПКМ целесообразна последовательная УЗ стимуляция изделий в различных точках или одновременная стимуляция нескольких точек.
- Площадь одновременного контроля с использованием метода УЗ ИК термографического метода пропорциональна приблизительно квадрату акустической энергии и ограничена

- возможной деструкцией контролируемого материала в точке ввода ультразвука. В выполненных исследованиях площадь одновременного контроля составляет 0,1-0,2 кв. м.
- В процессе УЗ стимуляции объектов определенной формы и размеров возможно образование стоячих волн, которые можно подавить, применяя девиацию несущей УЗ частоты. В ряде случаев, наличие протяженных дефектов виде трещин способствует подавлению стоячих волн.
  - Результаты данной работы используются в «Новоуральском научно-конструкторском центре» при разработке технологии контроля изделий из углепластика, используемых в ядерной энергетике, а также в МНПО «Спектр» (г. Москва) при испытаниях материалов авиакосмического профиля. Экспериментальная установка УЗ ИК термографического контроля используется в Томском политехническом университете при выполнении выпускных работ бакалавров и магистров и проведении лабораторных работ студентами специальности «Физические методы и приборы контроля качества», а также слушателями курсов повышения квалификации в области теплового контроля.
  - По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых изданиях из списка ВАК и 2 зарубежные публикации.

#### **Публикации автора по теме диссертационных исследований**

1. **Хорев, В.С.** Ультразвуковой инфракрасный метод выявления ударных повреждений и усталостных трещин в металлах и композитах / В.П. Вавилов, Д.А. Нестерук, В.С. Хорев // В мире НК, март 2010, 1(47), с. 36-58.
2. **Хорев, В.С.** Обработка результатов активного теплового контроля методом вейвлет – анализа / В.П.Вавилов, В.В.Ширяев, В.С.Хорев // Дефектоскопия, 2011, №4, с. 70-79.
3. **Хорев, В.С.** Ультразвуковой инфракрасный термографический неразрушающий контроль композиционных материалов / В.П.Вавилов, А.О.Чулков, В.С.Хорев // Тезисы докладов Международн. конф. по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, 5-9 сентября 2011 г., Томск, Россия, с. 323-326.
4. **Хорев, В.С.** IR Thermographic NDT Research at Tomsk Polytechnic University, Siberia, Russia / V.P.Vavilov, D.A.Nesteruk, V.S.Khorev // Proceedings of the 50<sup>th</sup> Annual Conference of British Institute of Nondestructive Testing, 12-15 Sept. 2011, Telford, U.K.. paper 1C3 (only electronic version).-12 p.
5. **Хорев, В.С.** Тепловой контроль ударных повреждений в углепластике с применением ультразвуковой стимуляции / В.В.Ширяев, В.С. Хорев. // Контроль. Диагностика.- 2011 (спецвыпуск). с. 112-114.
6. **Хорев, В.С.** Инфракрасно - ультразвуковой контроль воды в сотовых панелях самолетов / Д.А.Нестерук, В.С.Хорев, К.Н.Коробов. // Контроль. Диагностика.-2011, №11. с. 11-14
7. **Хорев, В.С.** Исследование метода ультразвукового инфракрасного контроля трещин в композитных материалах / В.П. Вавилов, В.С. Хорев, А.О.Чулков// Контроль и диагностика.- 2012 (спецвыпуск), с. 197-201.
8. **Хорев, В.С.** Ultrasonic and Inductive IR Thermographic Procedures as Newly – Emerged Techniques in Thermal NDT/ VI. Vavilov, D. Nesteruk, VL. Khorev // Annual Journal of Electronics, Sofia, 2012, Volume 6, Number 2, p. 74-78.