

ДЕРУСОВА ДАРЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**ТЕПЛОВОЙ ВИБРОТЕРМОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КОМПОЗИТОВ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗОНАНСНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ И  
ОПТИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

Томск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Заслуженный деятель науки РФ  
Вавилов Владимир Платонович

Официальные оппоненты: **Плехов Олег Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор, Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН (ИМСС УрО РАН), зам. директора по научной работе.

**Седалищев Виктор Николаевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный университет» (ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»), заведующий кафедрой вычислительной техники и электроники.

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С. А. Чаплыгина»

Защита диссертации состоится «27» сентября 2016 г. в 17:00 час на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 на базе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», 634050, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент



Васендина Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Многослойные композиционные материалы и сотовые структуры широко используются при производстве летательных аппаратов авиационной и ракетно-космической техники. В процессе эксплуатации конструкций, изготовленных из композиционных материалов, возникают ударные механические и усталостные повреждения, образуются трещины, а периодические изменения влажности и температуры в конечном итоге приводят к их прогрессирующему росту. В связи с этим необходимо производить мониторинг состояния конструкций для обеспечения их своевременного ремонта и исключения непредвиденных разрушений, а также повышения безопасности их эксплуатации. Существующие методы неразрушающего контроля (НК) композиционных материалов имеют ряд недостатков, вследствие чего в настоящее время в ведущих научных центрах в области НК ведутся исследования, нацеленные на разработку и совершенствование наиболее эффективных диагностических методов.

### **Степень разработанности темы.**

Опыт разработки и обзор состояния отечественного и мирового теплового контроля (ТК) был обобщен в ряде монографий и обзорных статей в России: В.П. Вавиловым, О.А. Будадиным, О.А. Плеховым, Е.В. Абрамовой, В.А. Захаренко и рядом других ученых; и за рубежом: Х. Maldague (Канада), D. Burleigh (США), G. Busse (Германия), D. Balageas (Франция), D. Almond (Великобритания) и др. Научные исследования в области ультразвуковой (УЗ) инфракрасной (ИК) термографии проводятся в течение последнего десятилетия в ряде мировых научно-исследовательских лабораторий США (Ливерморская национальная лаборатория, Университет Уэйна, Сандия лаборатория), Великобритании (Империял колледж), Германии (Штуттгартский университет, Институт неразрушающего контроля в г. Саарбрюкене), Канады (Университет Лавалья), Китая (Бейхан Университет). В России исследования в данной области преимущественно проводятся в НИ ТПУ (Томск), ЦНИИ СМ (Москва), НИИИН МНПО «Спектр» (г. Москва). В смежных областях исследования проводятся в ФГУП СибНИА им. С.А. Чаплыгина (г.

Новосибирск), Институте механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь), Институте физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск) В настоящей диссертации получили развитие методы и результаты, полученные ранее В.П. Вавиловым и В.С. Хоревым в Томском политехническом университете, а также группой I. Solodov в Штуттгартском университете (Германия). При этом наибольшее внимание уделено новому методу резонансной УЗ термографии, которому посвящено незначительное число мировых публикаций (в основном, групп I. Solodov, В.П. Вавилова, О.Н. Будагина).

**Цель исследования:** разработать и усовершенствовать методику неразрушающего контроля дефектов в композиционных материалах по параметрам вибрационного и температурного отклика на ультразвуковую (УЗ) стимуляцию.

Для достижения цели в работе были поставлены следующие задачи:

- исследовать связь параметров стимулирующих механических УЗ волн, а также сопутствующих вибрационных и температурных сигналов, с частотой УЗ колебаний;
- разработать методику НК композиционных материалов с использованием резонансного УЗ возбуждения и методов ИК термографии, а также сканирующей лазерной виброметрии;
- исследовать эффективность маломощного резонансного УЗ возбуждения для идентификации дефектов в композиционных материалах в сравнении с мощной УЗ стимуляцией на постоянной частоте;
- разработать методику оценки мощности тепловыделения в ударных повреждениях композитов путем численного моделирования суммарного вклада множественных дефектов в результирующий температурный сигнал на контролируемой поверхности;
- разработать методику использования лазерной виброметрии применительно к методу резонансного УЗ ИК контроля;
- получить экспериментальные результаты по температурным полям и картам вибраций поверхности композиционных материалов на примере углепластика с ударными повреждениями различной мощности, подвергнутого УЗ стимуляции.

**Объект исследования** – активный тепловой НК материалов и изделий с использованием УЗ стимуляции.

**Предмет исследования** – разработка метода НК, основанного на анализе параметров вибрационного и теплового отклика на УЗ возбуждение материала, а также усовершенствование метода УЗ ИК термографии при мощной УЗ стимуляции.

#### **Научная новизна работы.**

- Предложена методика оценки эквивалентной тепловой мощности, генерируемой подповерхностными дефектами, которые облучаются механическими волнами УЗ диапазона. Установлено, что ударные повреждения в углепластиковых композитах с энергией 10–40 Джоулей характеризуются мощностью тепловыделения до 200 мВт при широко используемой частоте стимуляции 22 кГц и электрической мощности магнитоотриктора до 1,5 кВт. Основной вклад в повышение температуры углепластика вносят дефекты, расположенные на глубинах до 1,5 мм.

- Установлено, что мощная УЗ стимуляция ударных повреждений в углерод-углеродных композитах при электрической мощности магнитоотрикторных излучателей до 1,5 кВт, частоте УЗ волн 22 кГц и длительности стимуляции до 5 секунд обеспечивает температурные сигналы в дефектных зонах до 4–12°C на расстояниях до 30 см между точкой ввода акустического сигнала и дефектом. Выделенная тепловая мощность УЗ стимуляции дефектов эквивалентна ~ 0,7 % электрической мощности магнитоотрикторного излучателя, что составляет около 20% от акустической мощности излучателя.

- Экспериментально показано, что результаты ТК, полученные с помощью УЗ и оптической стимуляции, дополняют друг друга и могут быть использованы для синтеза данных. При этом стандартный ИК термографический контроль наиболее эффективен для обнаружения дефектов с большим тепловым сопротивлением, а УЗ ИК термография более пригодна для выявления «слипнутых» расслоений и микротрещин.

- Разработан способ НК композиционных материалов с использованием резонансного УЗ возбуждения, особенностью которого является использование широкополосного акустического возбуждения для анализа поведения материала в

широком диапазоне частот совместно с применением методов ИК термографии и аппаратуры сканирующей лазерной виброметрии, что улучшает оценку параметров дефектов различной формы и размеров. Впервые установлена связь между температурно-частотным спектром и спектром вибраций на поверхности исследуемых объектов, что позволяет наиболее эффективно организовать процесс акустической стимуляции исследуемого материала.

### **Практическая значимость работы.**

- Разработана лабораторная установка резонансной УЗ вибротермографии с использованием контактных пьезоэлектрических датчиков, задающего генератора акустических колебаний, работающего в широком спектре рабочих частот, буферного усилителя, трехкомпонентного сканирующего лазерного виброметра и ИК тепловизора.

- Выполнены практические испытания образцов композиционных материалов в интересах отечественного авиакосмического комплекса, в результате чего определены преимущественные области применения метода резонансной УЗ ИК вибротермографии (контроль ударных повреждений в углепластиковых и углерод-углеродных композитах, а также расслоений в многослойных панелях с монолитным наполнением).

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

- Ударные повреждения в углепластиковых композитах с энергией удара 10–40 Джоулей целесообразно моделировать набором расслоений различной формы и глубины, являющихся источниками тепловыделения мощностью до нескольких сотен милливатт (при частоте УЗ колебаний 22 кГц и электрической мощности магнитоотриктора до единиц киловатт). Источником тепловыделения является внутреннее трение стенок дефектов, причем в силу затухания тепловых диффузионных процессов наибольший вклад в поверхностные температурные сигналы вносят дефекты, расположенные на глубинах до 1,5 мм.

- Процессы необратимого преобразования механической энергии в тепловую незначительны в бездефектном углепластике. В зонах одиночных ударных повреждений до 20% акустической мощности переходит в тепловую, что эквивалентно ~0,7% электрической мощности, потребляемой установкой для

мощной УЗ ИК термографии на основе магнитострикционного УЗ излучателя. Такой мощности достаточно для генерации температурных сигналов величиной до 4–12°С.

- Оптическая и УЗ стимуляция приводит к различным физическим феноменам в композитах. В частности, оптический поверхностный нагрев эффективен при выявлении плоско-расположенных дефектов с большим тепловым сопротивлением, в то время как стимулированное ультразвуком внутреннее трение лучше всего обнаруживает «слипнутые» дефекты. Таким образом, комбинация двух техник стимуляции позволяет получить наиболее полную информацию о структуре дефектов.

- Поскольку дефекты композиционных материалов имеют сложную структуру, они являются самостоятельными звуковыми резонаторами с набором характерных резонансных частот. В связи с этой особенностью композитов практическое использование резонансной УЗ стимуляции требует анализа механических колебаний в широком спектре частот и дальнейшей стимуляции объекта акустическим сигналом в форме меандра, что позволяет активировать вибрации высших резонансных гармоник дефекта и получить более детальную информацию о его структуре. Метод лазерной виброметрии является полезным дополнением к методу УЗ ИК термографии.

### **Реализация результатов работы.**

Результаты диссертационных исследований использованы в НИИИН МНПО «Спектр», г. Москва, при испытаниях авиационных композитных материалов (Приложение В к диссертации).

**Достоверность полученных теоретических и экспериментальных результатов** обеспечивается использованием бесконтактной высокочувствительной аппаратуры сканирующей лазерной виброметрии (предельно обнаруживаемая скорость вибраций составляет единицы мкм\с, перемещение – единицы нм, диапазон рабочих частот от 0 до 25000 кГц), а также компьютерной тепловизионной аппаратуры, позволяющей измерять абсолютные температуры с основной погрешностью не более  $\pm 1\%$  или  $\pm 1^\circ\text{C}$  и дифференциальные температуры с чувствительностью до  $0,01^\circ\text{C}$ . Использованная программа расчета трехмерных

температурных сигналов основана на численном решении дифференциального уравнения теплопроводности, валидация которого осуществлена согласно предельным аналитическим решениям. Моделирование акустических феноменов проведено на платформах Comsol Multiphysics и MathCad. Для обработки экспериментальных данных использованы апробированные методы компьютерного анализа изображений и статистической обработки результатов измерений. Полученные теоретические и экспериментальные результаты не противоречат общефизическим принципам и данным, полученным другими авторами.

### **Апробация работы.**

Результаты диссертационных исследований докладывались на Международной конференции AITA-12, Castello del Valentino, Политехнический Университет Турина, Италия, 2013 г., Международной конференции по прикладной и теоретической механике MECHANICS, Италия, 2014 г., Международной конференции по количественной ИК термографии QIRT, Франция, 2015 г., конференции Международного общества оптической техники и фотоники SPIE "Thermosense", США, 2016 г..

### **Личный вклад автора заключается в:**

- разработке оригинальной методики резонансной УЗ вибротермографии с использованием аппаратуры сканирующей лазерной виброметрии;
- разработке и экспериментальной апробации методики оценки тепловыделения в ударных повреждениях композиционных материалов в результате УЗ стимуляции объектов исследования;
- разработке широкополосного задающего генератора акустических колебаний;
- проведении большого объема экспериментальных исследований с использованием метода ИК термографии и лазерной виброметрии.

### **Связь диссертационных исследований с научно-техническими грантами.**

Диссертационные исследования связаны с выполнением контракта №5-191/13У от 01.10.2013г. «Разработка метода определения теплофизических характеристик углепластика с помощью теплового неразрушающего контроля», гранта ВИУ\_ИНК\_66\_2014 от 2014 г. «Технологии и комплексы томографического

неразрушающего контроля нового поколения», контракта №5-285/14 от 18.11.2014 г. «Неразрушающий контроль авиационных и космических материалов методом активной количественной инфракрасной термографии (AQIRT)», а также индивидуального гранта диссертанта РФФИ № 16-32-00138 «Исследование резонансных термомеханических явлений, возникающих в процессе неразрушающего контроля полимерных материалов с использованием маломощной ультразвуковой термографии» от 2016 г..

### **Публикации**

Соискателем опубликовано 14 работ, из них по теме диссертации – 12 работ, в том числе 8 статей в изданиях, цитируемых в базах данных SCOPUS и Web of Science (4 статьи в изданиях с импакт-фактором более 1).

### **Структура и объем диссертационных исследований.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, включающего 68 работ, трех приложений, содержит 152 страницы текста, 83 рисунка, 110 формул и 18 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

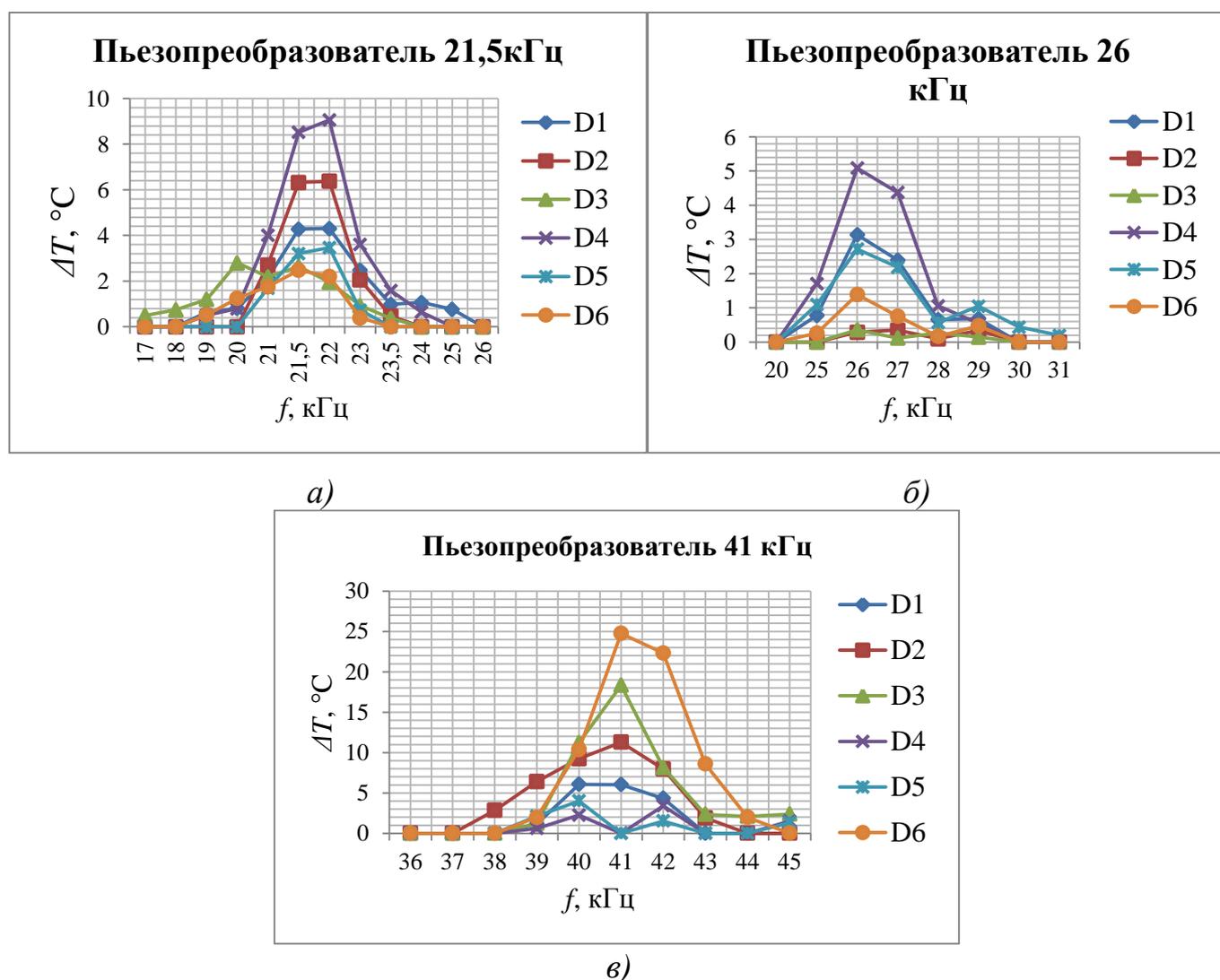
**Во введении** описаны актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационных исследований. Сформулированы цель и задачи диссертационных исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен обзор современных методов НК композиционных и полимерных материалов. Рассмотрены методы анализа свойств материалов с использованием упругих волн, наиболее пригодные для контроля качества волоконно-композиционных материалов. Описаны основные проблемы УЗ НК композитов и проанализированы изменения в технической аппаратуре, произошедшие в последнее десятилетие. Описаны перспективные методы, разрабатываемые ведущими зарубежными научными группами в области УЗ НК контроля, включая задачи исследования физических свойств материалов.

**Вторая глава** содержит историю развития метода УЗ НК термографического контроля с использованием магнитострикционного излучателя.

Описаны исследования, направленные на оценку эффективности метода «мощной» УЗ НК термографии с использованием магнитострикционного и

пьезоэлектрического излучателей. Получена спектральная характеристика УЗ ИК контроля с использованием пьезопреобразователей (резонансные частоты 21,5 кГц, 26 кГц и 41 кГц), на примере обнаружения дефектов в виде несквозных отверстий в образцах из алюминия, склеенных со слоем пробкового. В результате УЗ нагружения пластины в течение 10 секунд с использованием трех пьезопреобразователей были оценены изменения температурного отклика в области круглых отверстий в зависимости от рабочей частоты излучателя при постоянном уровне электрической мощности (50 Вт). На Рисунке 2 приведены температурно-частотные спектры сигнала в области отверстий.



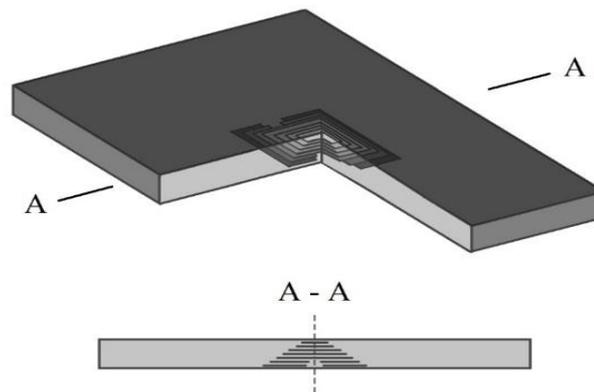
**Рисунок 2 Температурно-частотные спектры сигнала в области круглых отверстий в пластине из алюминия и пробкового материала при использовании большого (а), среднего (б) и малого (в) пьезопреобразователей**

В результате исследования было установлено, что максимальный температурный сигнал в области круглых отверстий возникает при работе излучателя на собственной частоте резонанса с отклонением  $\pm 500$  Гц. Показано, что частота

акустических колебаний оказывает влияние на выявляемость дефектов различного размера. Например, круглые отверстия, имеющие бóльший диаметр, создают бóльшие температурные сигналы на более низких частотах, в то время как максимальный температурный сигнал в области отверстий меньшего диаметра наблюдался при использовании пьезоизлучателя с более высокой частотой резонанса. Отсюда следует, что частота акустического сигнала оказывает значительное влияние на обнаружение дефектов различного размера.

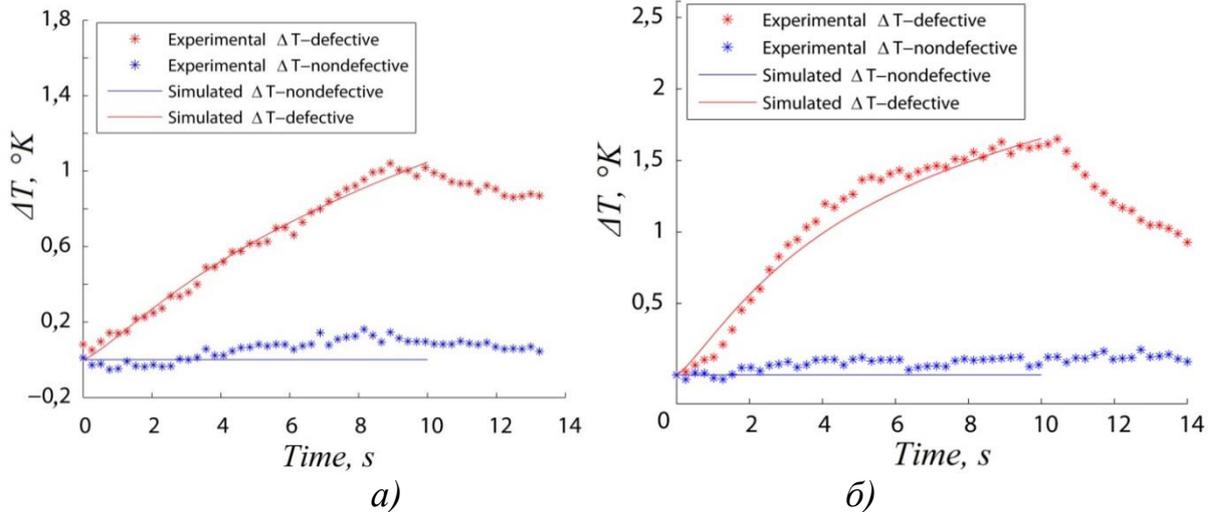
В диссертации приведен расчет «тепловой мощности дефектов» с помощью трехмерного моделирования процессов теплогенерации в материалах с дефектами в процессе их УЗ нагружения (использована оригинальная программа ThermoSource).

Расчет эквивалентной тепловой мощности, выделяемой в дефектах, был выполнен на примере ударного повреждения с энергией 16 Дж в углепластиковом композите при УЗ нагружении в течение 10 секунд. Размер и физические характеристики модели соответствовали реальным параметрам образца. Область дефекта была представлена в виде набора расслоений пирамидальной формы заполненных воздухом, выступающих в качестве локальных источников тепла (Рисунок 3.).



**Рисунок 3 Моделирование ударного повреждения углепластикового композита в декартовых координатах в виде составного дефекта пирамидальной формы**

В рамках предложенной модели была рассчитана мощность тепловыделения в процессе УЗ стимуляции как во всей зоне повреждения, так и в каждом отдельном сегменте дефекта. Путем комбинации теоретических и экспериментальных температурных изменений в зоне дефекта на передней и задней поверхностях углепластика (Рисунок 4, а, б) была рассчитана суммарная мощность сегментов дефекта, затраченная на тепловыделение, которая составила около 150 мВт.

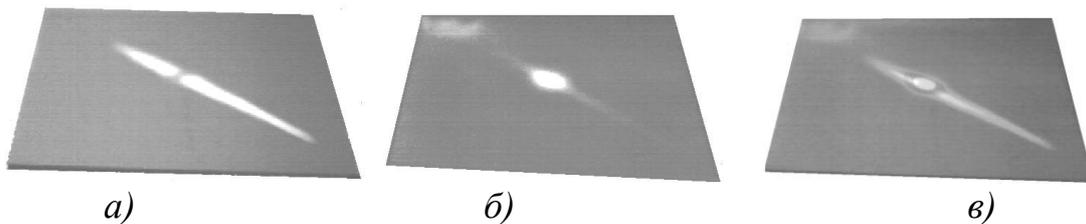


**Рисунок 4** Аппроксимация экспериментальных кривых изменения температуры в зоне дефекта на передней (а) и задней (б) поверхностях углепластика с использованием модели, показанной на Рисунке 3 (время УЗ стимуляции 10 с)

Установлено, что в силу тепловой диффузии основной вклад в повышение температуры на поверхности вносят дефекты, расположенные на глубинах до 1,5 мм от контролируемой поверхности.

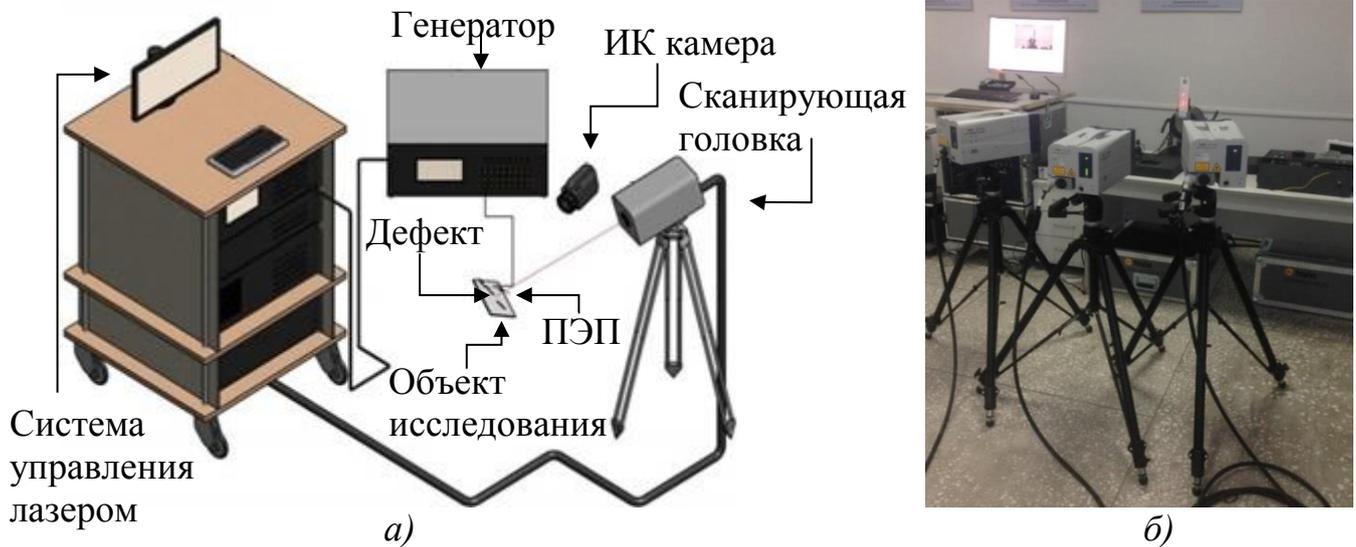
**Глава 3** посвящена описанию результатов сравнительных экспериментальных исследований ИК термографического контроля композитов при оптической и ультразвуковой стимуляции для обнаружения ударных повреждений в композитах.

Продемонстрировано, что результаты применения классического оптического ТК и метода УЗ ИК термографии при обнаружении скрытых дефектов различаются из-за особенностей механизмов генерации температурных сигналов; это проявилось в различных видах температурных распределений. При проведении экспериментов на углепластиковом и углерод-углеродном (Рисунок 5) композитах с ударными повреждениями было установлено, что результаты ТК, полученные с помощью УЗ и оптической стимуляции, дополняют друг друга и могут быть использованы для синтеза данных.



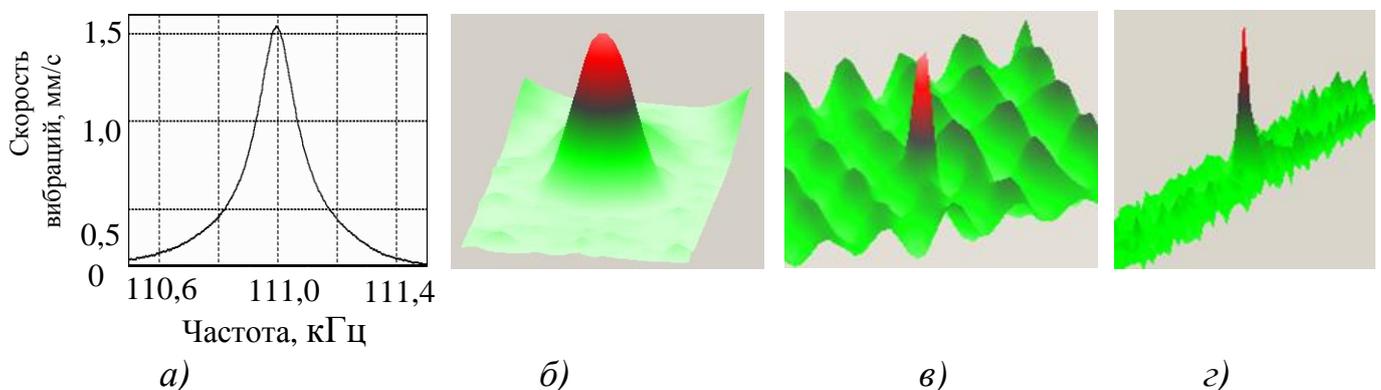
**Рисунок 5** Синтез экспериментальных результатов УЗ (а) и оптического (б) контроля в обобщенное изображение (в) ударного повреждения энергией 18 Дж в образце из углепластика

**Глава 5** посвящена разработке метода маломощной резонансной стимуляции композитов с регистрацией температурных полей методом ИК термографии. Описана разработанная экспериментальная установка для реализации режима высокоэффективной резонансной УЗ ИК вибротермографии (Рисунок 6).



**Рисунок 6 Структурная схема (а) и фотография (б) установки для проведения резонансной УЗ ИК термографии**

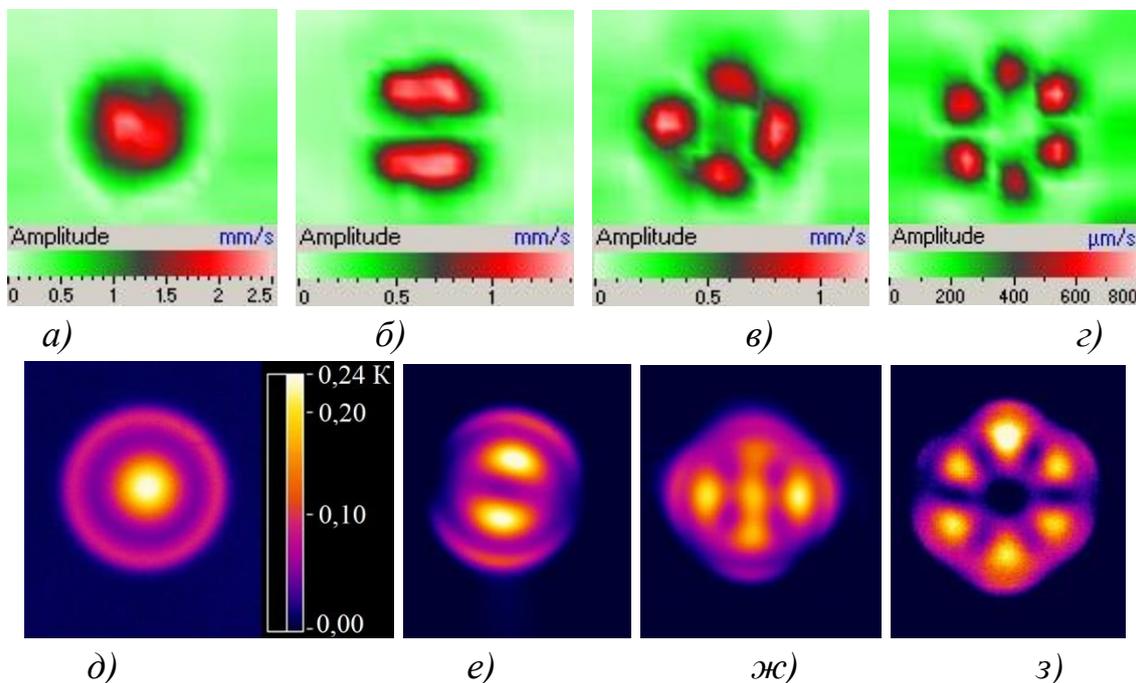
Рассмотрены экспериментальные и теоретические результаты исследований по определению локального резонанса дефектов. На Рисунке 7, а, б приведен пример определения резонансной частоты дефекта в виде круглого отверстия в пластине оргстекла (амплитудно-частотная характеристика дефекта – АЧХ). Значительное увеличение амплитуды вибраций в области дефекта характеризуется его резонансом. Аналогичная методика была применена для определения резонанса дефектов и в композитах (Рисунке 7, в, г).



**Рисунок 7 АЧХ (а) и картина вибраций в области несквозного круглого отверстия в пластине из ПММА (б); визуализация резонансных вибраций в области расслоения в углепластиковом композите на частоте 91160 Гц (в), вибрации на поверхности пластины углепластика (г) на резонансной частоте ударного повреждения (110 кГц)**

На Рисунке 8 приведены результаты исследования вибраций и температурного отклика, регистрируемых на поверхности пластины из оргстекла, ослабленной круглым отверстием, при её стимуляции акустическими сигналами с частотами, соответствующими резонансным частотам круглого отверстия. Измеренные резонансные частоты отверстия составили: основная частота резонанса соответствует частоте 5,75 кГц, вибрации высших резонансных гармоник наблюдались на частотах 12,53 кГц; 19,19 кГц и 27,88 кГц (Рисунок 8, б, в, г).

Важно отметить, что тепловой сигнал дефекта, регистрируемый при акустической стимуляции материала на частотах высших резонансных гармоник дефектов, оказался существенно ниже температурного сигнала, возникающего в результате вибраций дефекта на его основной резонансной частоте, что объясняется снижением интенсивности вибраций с увеличением порядка резонансных гармоник. Тем не менее, использование высокочувствительной измерительной аппаратуры и программного обеспечения для обработки данных позволило получить качественные фазовые картины изменения температурного поля в области дефекта.

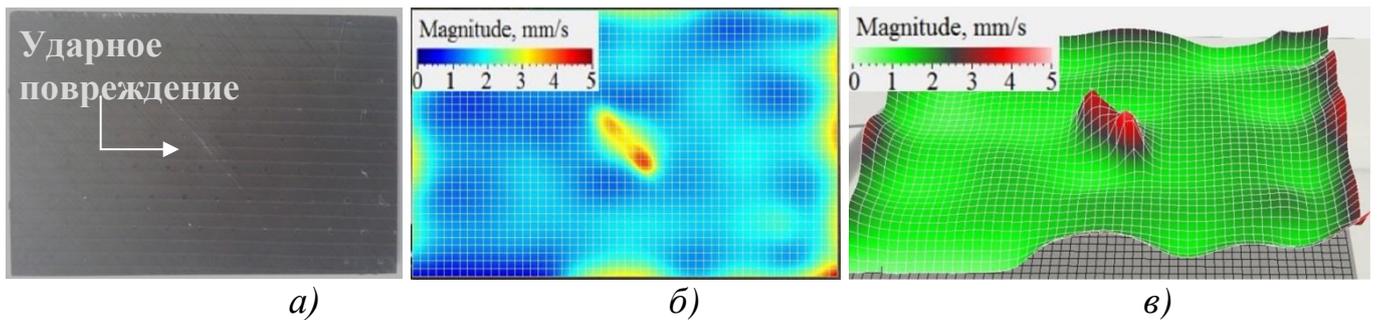


**Рисунок 8** Картины вибраций (а-г), термограмма (д) и фазовые изображения (е-з) пластины ПММА в области круглого отверстия, полученные при её акустической стимуляции с частотой основного резонанса отверстия (5,75 кГц (а, д)) и его высших гармоник (12,53 кГц (б, е); 19,19 кГц (в, ж); 27,88 кГц (г, з))

В отличие от картин вибраций, ИК термограммы, полученные при нагружении объекта акустическим сигналом с частотой его основного резонанса дефекта,

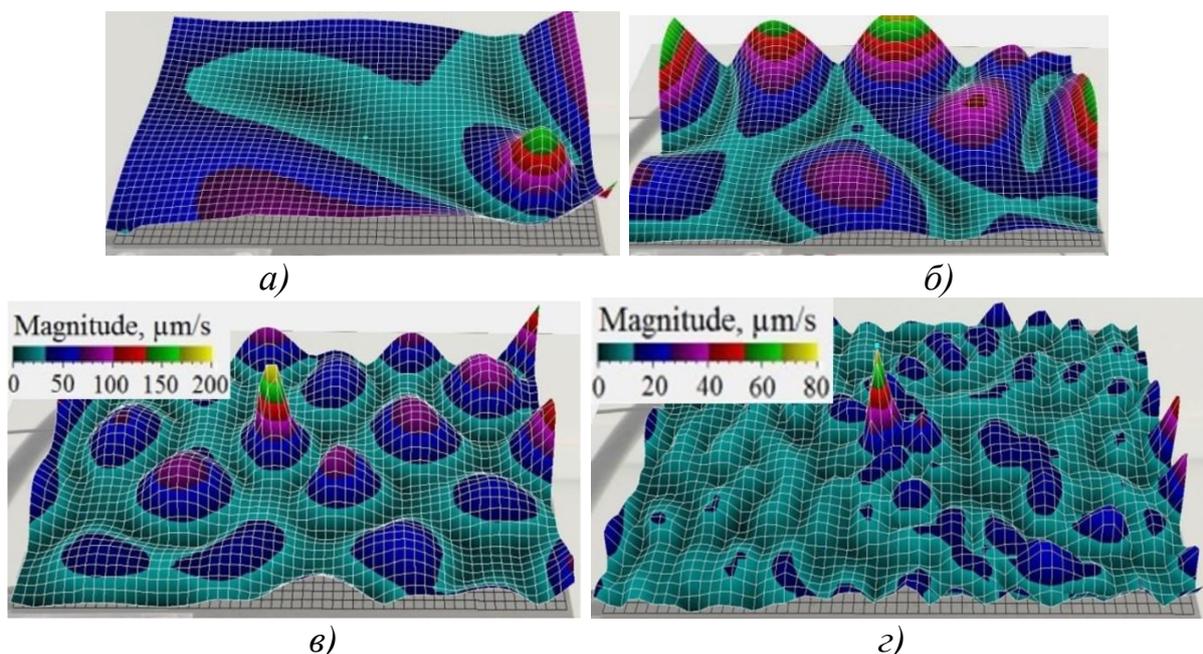
позволяют визуализировать контуры дефектов. Однако, для получения полной информации о расположении и форме дефектов, ИК термограммы и картины вибраций различных резонансных частот дефекта, должны быть суммированы.

Методология широкополосного акустического нагружения материалов была применена для контроля качества углепластикового композита с ударным повреждением энергией 16 Дж (Рисунок 9, *а*).



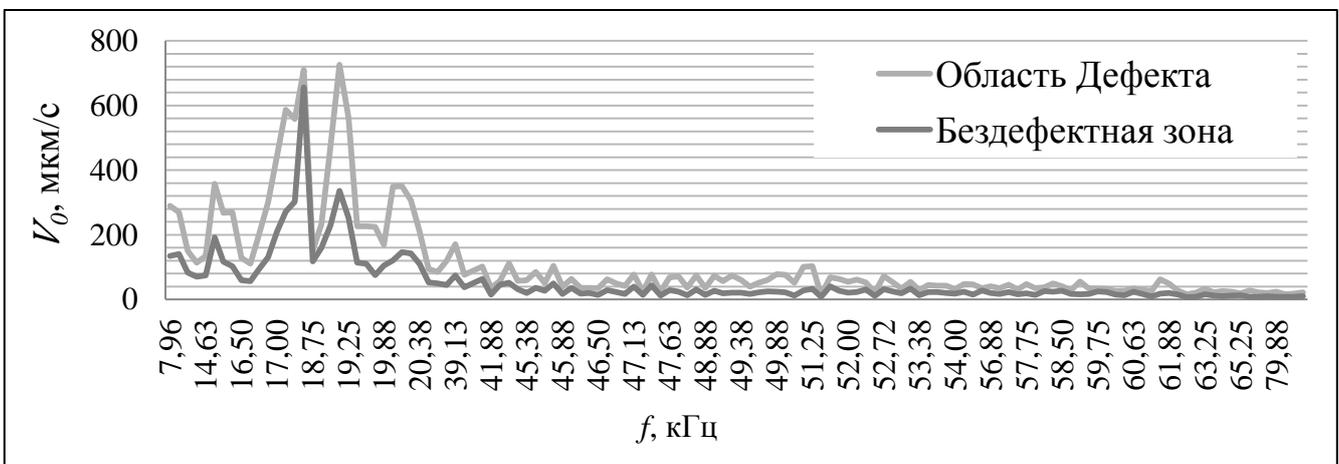
**Рисунок 9** Фотография образца углепластикового композита (*а*), двумерная (*б*) и трехмерная (*в*) суммарные картины вибраций в режиме широкополосного сканирования в диапазоне частот от 0 до 100 кГц

Полученные результаты подтверждают, что дефект поддается идентификации только в случае соответствия его резонансной частоты частоте стимулирующих акустических волн. В частности, в исследуемом образце пластические деформации наблюдались в широком частотном диапазоне, начиная от 1 и 5,88 кГц (Рисунок 10, *а*, *б*), в то время как ударное повреждение начинает проявляться на более высоких частотах: 7,88 кГц; 16,75 кГц; 50,75 кГц и выше (Рисунок 10, *в*, *г*).



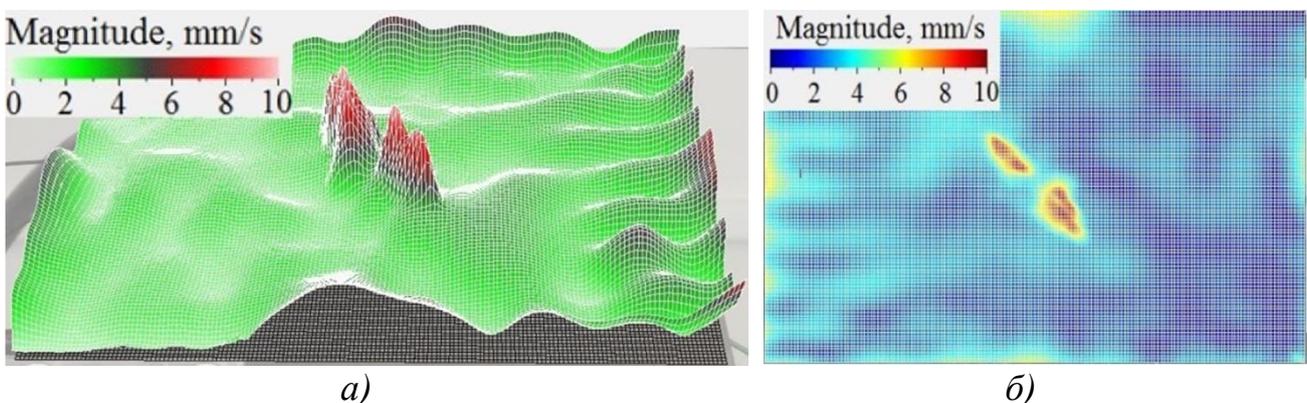
**Рисунок 10** Изображения вибраций поверхности образца из углепластикового композита на частотах 1 кГц (*а*) и 5,88 кГц (*б*) без проявления дефекта и на резонансных частотах 16,75 кГц (*в*) и 50,75 кГц (*г*)

Вследствие неоднородной структуры композитов энергия удара распределяется в материале неравномерно, при этом картины деформаций и разрушения зависят от ориентации волокон. В большинстве случаев это приводит к образованию множественных расслоений в композитах, которые являются самостоятельными звуковыми резонаторами с набором характерных резонансных частот в широком диапазоне. Исследованный образец наглядно иллюстрирует эту особенность ударных повреждений, что отражено на его АЧХ (Рисунок 11). На графике приведены амплитудные значения скорости вибраций в области локальных резонансов дефекта, а также в бездефектной зоне.



**Рисунок 11 АЧХ изделия из углепластикового композита CFRP в области ударного повреждения (дефект) и в бездефектной зоне, полученные с помощью аппаратуры сканирующей лазерной виброметрии**

В ходе повторного нагружения изделия сигналом в виде мендра на резонансной частоте дефекта, за счет активации вибраций высших резонансных гармоник, была определена обобщенная картина локализации и структуры дефекта (Рисунок 12).

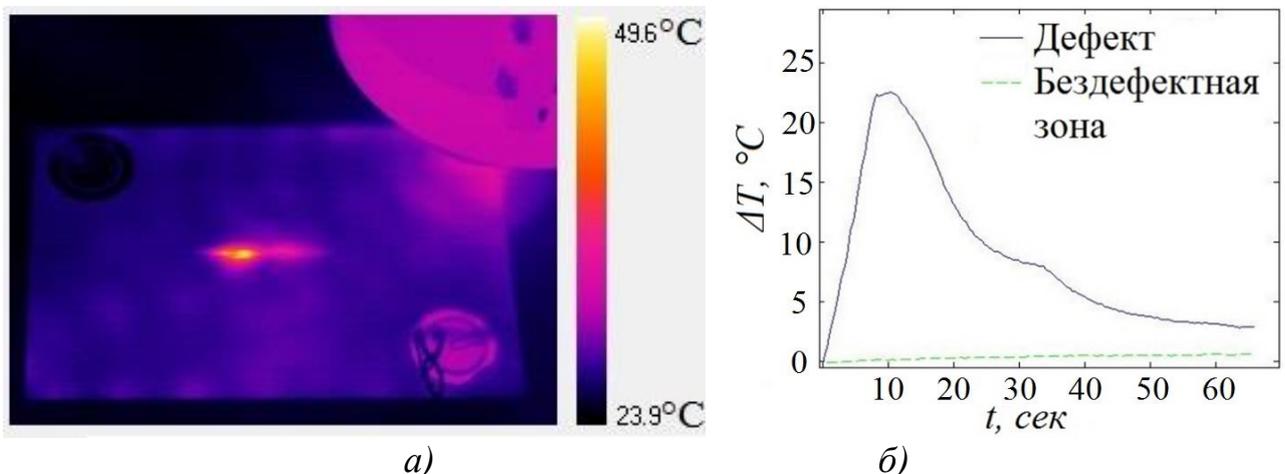


**Рисунок 12 Двухмерная (а) и трехмерная (б) суммарные картины вибраций после применения быстрого преобразования Фурье на частоте резонанса дефекта 7,96 кГц**

Выполнено сравнение эффективности проведения «мощной» и «маломощной» УЗ ИК термографии на примере контроля ударного повреждения энергией 14 Дж в углепластиковом композите (указанные термины являются относительными и относятся к мощности используемой УЗ аппаратуры). В точке удара визуально отмечено поверхностное повреждение структуры углепластика размером около 5 мм, а на противоположной поверхности пластины повреждение наблюдалось в виде двух вытянутых зон размером  $37 \times 6 \text{ мм}^2$ .

Результатом контроля пластины с помощью установки мощной УЗ ИК термографии на основе магнитострикционного преобразователя являются последовательности ИК термограмм, записанные в процессе УЗ стимуляции длительностью 10 секунд. Температурный профиль в зоне дефекта, полученный при электрической мощности установки 1,5 кВт, показан на Рисунке 13, а. На расстоянии 65 мм от точки ввода ультразвука максимальный дифференциальный сигнал составил  $22,4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Размер дефектной зоны на термограмме равен  $33 \times 9 \text{ мм}^2$ , что на 40% меньше площади визуальной оценки.

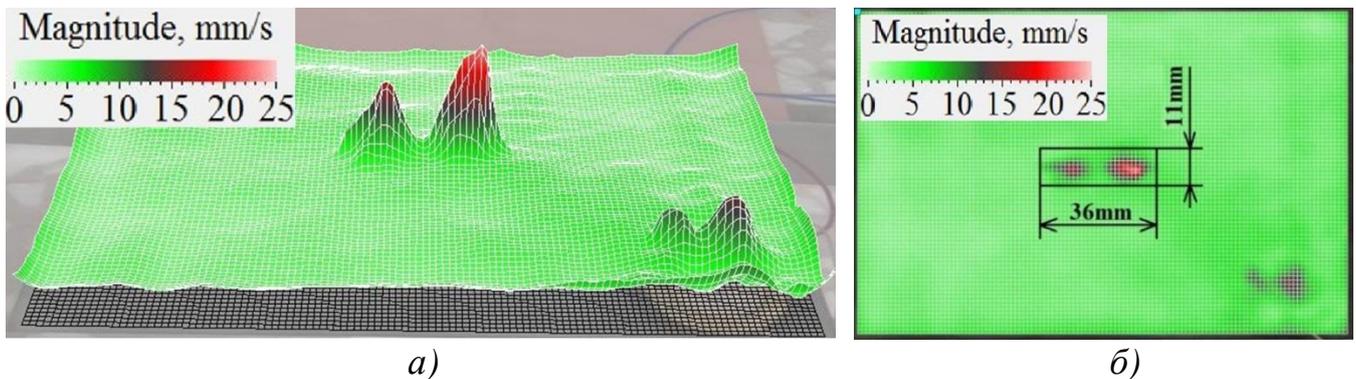
В результате моделирования процесса тепловыделения в зоне ударного повреждения при УЗ стимуляции с помощью программы ThermoSource было определено, что тепловыделение в дефекте составляет 0,788 Вт. Тогда коэффициент преобразования электрической мощности излучателя в тепловую мощность, рассеиваемую в области дефекта, равен 0,052 %.



**Рисунок 13 Термограмма (а) и график изменения температурного поля (б) на поверхности углепластикового композита, противоположной ударному повреждению, при магнитострикционной УЗ стимуляции мощностью 1,5 кВт в течение 10 с**

Резонансную УЗ ИК стимуляцию осуществляли с помощью лабораторной установки, включающей: ПЭП марки FT-27T (Германия), лабораторный генератор акустических колебаний, трехкомпонентный сканирующий лазерный виброметр PSV-400-3D фирмы Polytec и ИК тепловизор NEC Avio TH 9100 (Рисунок 6).

С помощью сканирования и оценки поверхностных вибраций при широкополосной акустической стимуляции материала акустическим излучением были получены суммарные картины вибраций пластины углепластика (Рисунок 14). Максимальный поперечный размер дефекта по результатам виброметрии составляет  $36 \times 11$  мм<sup>2</sup>, что существенно превышает визуальную и ИК термографическую оценки. Полученный результат можно объяснить более эффективной стимуляцией микро-дефектов, входящих в структуру повреждения.



**Рисунок 14** Суммарные двухмерная (б) и трехмерная (а) картины вибраций на поверхности пластины из углепластика

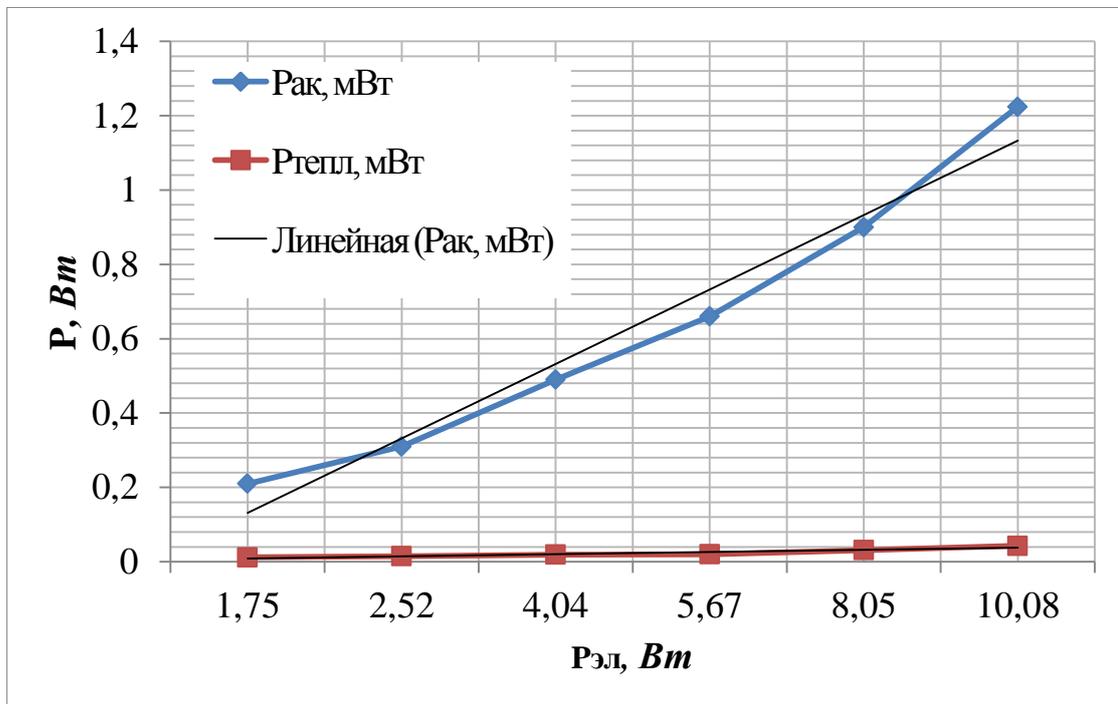
Экспериментальные величины температурного сигнала в области ударного повреждения углепластика при УЗ стимуляции с частотой резонанса дефекта в зависимости от уровня потребляемой электрической мощности установки приведены в Таблице 1. Максимальное изменение температурного сигнала составило  $0,9$  °C при расстоянии между точкой ввода УЗ и дефектом 50 мм.

**Таблица 1 – Зависимость изменения температуры в зоне дефекта от изменения входного напряжения и акустической мощности преобразователя**

$P_{\text{эл}}$ , Вт	1,75	2,52	4,04	5,67	8,05	10,08
$P_{\text{ак}}$ , Вт	0,21	0,31	0,49	0,66	0,9	1,224
$P_{\text{тепл}}$ , мВт	12	15	19	20	31	43
$\eta_{\text{эв}}$ , %	12	12,3	12,1	11,6	11,2	12,1
$\eta_{\text{ав}}$ , %	5,7	4,8	3,9	3	3,44	3,51
$\eta_{\text{эв}}$ , %	0,69	0,59	0,47	0,35	0,39	0,43
$\Delta T$ , °C	0,27	0,34	0,42	0,44	0,76	1,1

С помощью программы Microsoft Excel была проведена полиномиальная

аппроксимация зависимости акустической и тепловой мощности от уровня потребляемой электрической мощности, в результате чего были получены функции, близкие к линейным (Рисунок 15).



**Рисунок 15** Изменение акустической мощности магнитостриктора и тепловой мощности, выделяемой в области дефекта, в зависимости от уровня электрической мощности магнитострикционного преобразователя

Результаты компьютерного моделирования тепловой мощности, рассеиваемой в области дефекта, а также расчетные значения акустической мощности пьезопреобразователя и потребляемой электрической мощности генератора (Таблица 1), показали, что среднее значение коэффициента преобразования электрической мощности, потребляемой аппаратурой резонансной УЗ ИК термографии, в тепловую мощность составляет около 0,5%, что превосходит по своим показателям величину аналогичного коэффициента преобразования установки мощной УЗ ИК термографии (0,052%), показанной на Рисунке 14, почти в 10 раз. Вышеприведенные данные доказывают эффективность осуществления маломощной УЗ стимуляции дефектов в твердых телах.

### Основные научные результаты и выводы

- Возможности УЗ ИК термографии в настоящее время представляют интерес, как для промышленного применения, так и для академических исследователей, решающих термомеханические задачи.

- Предложен новый подход к определению эквивалентной тепловой мощности, генерируемой подповерхностными дефектами, которые облучаются механическими волнами УЗ диапазона. Дефекты представляются конгломератом отдельных тепловыделяющих расслоений, в каждом из которых оптимизируют величину выделяемой тепловой мощности таким образом, чтобы расчетные температурно-временные зависимости наилучшим образом, т.е. с использованием метода наименьших квадратов, соответствовали экспериментальным результатам. Показано, что мощная УЗ стимуляция (электрическая мощность до 1,5 кВт, частота 22 кГц) обеспечивает тепловыделение внутри дефектов от десятков до сотен милливатт, что соответствует опубликованным данным. Продемонстрировано, что основной вклад в повышение температуры вносят дефекты, расположенные на глубинах до 1,5 мм, считая от контролируемой поверхности.
- Используемые в УЗ ИК термографии резонансные пьезопреобразователи и магнитострикторы имеют узкую полосу рабочих частот, поэтому эффективность теплогенерации в области дефекта зависит от соответствия частоты подаваемого на излучатель акустического сигнала частоте его резонанса. В настоящее время это ограничение преодолевают увеличением общей мощности устройств контроля, что является одним из главных недостатков «классической» УЗ ИК термографии, что ставит под сомнение неразрушающий характер испытаний.
- Метод мощной УЗ ИК термографии доказал свою высокую эффективность при обнаружении низкоэнергетических ударных повреждений в углерод-углеродном композите. При электрической мощности установки до 1,5 кВт, частоте УЗ волн 22 кГц и длительности стимуляции до 5 секунд температурные сигналы в дефектных зонах достигают 4–12°C на расстояниях до 30 см от точки ввода ультразвука. Площадь контролируемой поверхности составляет 0,28 м<sup>2</sup>.
- Исследование преобразования электрической мощности магнитострикционного излучателя в акустическую, а затем в тепловую мощность, рассеиваемую в дефектах, показало, что в случае мощного ультразвука дефекты выделяют тепловую мощность, по своей величине эквивалентную 0,71% потребляемой электрической мощности магнитострикционного излучателя, что, в свою очередь,

составляет около 20% от акустической мощности установки. В связи с этим, метод УЗ ИК термографии должен быть усовершенствован с точки зрения более эффективного преобразования электрической энергии в акустическую и тепловую, например, используя явление механического резонанса.

- Механизмы генерации температурных сигналов при УЗ и оптической стимуляции в значительной степени различаются. При облучении дефектов механическими волнами звуковой и УЗ частоты основным механизмом теплогенерации является трение стенок дефектов, что приводит к феномену лучшего проявления «тонких» дефектов по сравнению с дефектами, имеющими большое раскрытие. Таким образом, дефект является локальным тепловым источником, а тепловая энергия распространяется от дефекта к поверхности. При оптическом нагреве тепловая «волна» от стимулируемой поверхности распространяется вглубь материала, встречает дефект, как правило, низкотеплопроводный, что приводит к локальной аккумуляции тепловой энергии.
- Экспериментально показано, что результаты ТК, полученные с помощью УЗ и оптической стимуляции, дополняют друг друга, и соответствующие изображения могут быть использованы для синтеза данных. При этом стандартная ИК термограмма показывает части дефектов с большим тепловым сопротивлением, а УЗ ИК термография более подходит для выявления расслоений и микротрещин.
- Использование явления локального резонанса дефекта для задач УЗ ИК термографии позволяет усиливать локальные вибрации частиц среды в дефектных областях, что приводит к интенсивной теплогенерации в этих зонах при сравнительно низких уровнях вибраций в бездефектных зонах. Таким образом, достигается эффективное преобразование акустической энергии в тепловую энергию, что значительно повышает эффективность проведения процедуры НК.
- Для определения точного положения и оценки размеров дефектов с помощью виброметрических картин и тепловых изображений поверхности материала, необходимо использовать широкополосный акустический сигнал, что, в свою очередь будет активировать вибрации дефекта основного и высоких порядков.
- Совместное использование резонансной УЗ ИК термографии с воздушно-связанными излучателями позволяет производить бесконтактный УЗ НК, однако

низкие значения мощности данных излучателей, а также жесткие требования к параметрам эксперимента и наличие собственных резонансных частот у таких излучателей ограничивают их применение в НК материалов и изделий.

- По результатам настоящего диссертационного исследования опубликовано 14 работ, в том числе 8 статей в изданиях, цитируемых в базах данных SCOPUS и Web of Science (4 статьи в изданиях с импакт-фактором более 1). Материалы исследования использованы в НИИИИИ МНПО «Спектр», г. Москва.

#### **Основные результаты диссертации изложены в публикациях:**

1. **Derusova, D.A.** Thermal NDT research at Tomsk Polutechnic University / V. P. Vavilov, A.O. Chulkov, D.A. Derusova, Y. Pan. // Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2016. – Pp. 1–16. Scopus (Импакт фактор ИФ>1).

2. **Derusova, D.A.** Thermosonic Chladni figures for defect-selective imaging / I. Solodov, D. Derusova, M. Rahammer. // Ultrasonics 60.–2015.–Pp.1–5. Scopus (ИФ>1)

3. **Derusova, D.A.** Highly-efficient and noncontact vibro-thermography via local defect resonance / I. Solodov, M. Rahammer, D. Derusova, G. Busse // Quantitative InfraRed Thermography Journal.–2015.–Volume 12.– Issue 1.–Pp. 98–111 (Scopus, ИФ>1)

4. **Derusova, D.A.** Ultrasonic and optical stimulation in IR thermographic NDT of impact damage in carbon composites / V. Vavilov, W. Świdorski, D. Derusova // Quantitative InfraRed Thermography Journal.–2015.–Volume 12.– Issue 2.–Pp. 162-172. Scopus (ИФ>1).

5. **Derusova, D.A.** Evaluating impact damage in graphite epoxy composite by using low-power vibrothermography / D.A. Derusova, V.P. Vavilov, N.V. Druzhinin // Proceedings of SPIE, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVIII.– 2016.– Volume 9861. doi:10.1117/12.222987 SCOPUS, (в печати).

6. **Derusova, D.A.** Evaluation of equivalent defect heat generation in carbon epoxy composite under ultrasonic stimulation by using infrared thermography/ D.A. Derusova, V.P. Vavilov, S.S. Pawar // International Scientific Conference on Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials, RTEP 2014.– 2015.–Volume 81.– Issue 1. Scopus.

7. **Derusova, D.A.** Evaluating Severity of Impact Damage in CFRP by Determining Thermal Effusivity and Diffusivity / V.P. Vavilov, A.O. Chulkov, D.A. Derusova //

WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer. – 2014.–Volume 9.– Issue 1.– Pp. 251-260. Scopus.

8. **Derusova, D.A.** IR thermographic characterization of low energy impact damage in carbon/carbon composite by applying optical and ultrasonic stimulation / V.P. Vavilov, A.O. Chulkov, D.A. Derusova // Proceedings of SPIE, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVI.–2014.– Volume 9105.– Pp. 1-7. Scopus.

9. **Derusova, D.A.** Data Fusion in IR Thermographic Detection of Landmines and NDT of Composites / W. Świdorski, D. Nesteruk, V. Vavilov, D. Derusova // Conference paper AITA-12, At Castello del Valentino, Polytechnic of Turin, Italy, Volume: Atti della “Fondazione GiorGioronchi” Anno LXXIX.– 2014.– n. 4.– Pp. 473-478.

10. **Дерусова, Д.А.** Тепловой контроль композиционных материалов в авиакосмической промышленности: возрождение интереса и направления применения / В.П. Вавилов, А.О. Чулков, Д.А. Дерусова, В. Швидерски // В мире неразрушающего контроля. – 2014. – № 2 (64) - С. 47-52.

11. **Дерусова, Д.А.** Неразрушающий контроль ударных повреждений в углерод-углеродном композите методом ультразвуковой инфракрасной термографии / Д.А. Дерусова, А.О.Чулков // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – №1 (20) – С. 45-48.

12. **Derusova, D.A.** ‘Classical’ Thermal NDT of hidden defects: Passing from detection to defect characterization / V.P. Vavilov, A.O. Chulkov, D.A. Derusova // Proc. of the 10th International Conference on Applied and Theoretical Mechanics (MECHANICS’14), Salerno, Italy June 3-5.–2014.

13. **Дерусова, Д.А.** Новые идеи в активном тепловом контроле / В.П. Вавилов, А.О. Чулков, Д.А. Дерусова, Я. Пань // В мире неразрушающего контроля. – 2016. – № 1 – С. 5-7.

14. **Дерусова, Д.А.** Неразрушающий контроль материалов методом резонансной ультразвуковой инфракрасной термографии / Д.А. Дерусова, В.П. Вавилов // В мире неразрушающего контроля. – 2016. – № 1 – С. 21-23.