

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Дерусова Дарья Александровна

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

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор В.П. Вавилов

Томск – 2016

Содержание

Термины и определения	4
Обозначения и сокращения	5
Введение	8
Глава 1. Обзор современных методов неразрушающего контроля композиционных и полимерных материалов	15
1.1. Ультразвуковой неразрушающий контроль волоконно-композитных материалов	15
1.1.1 Традиционные ультразвуковые методы НК	15
1.1.2 Ввод ультразвука через воздух	17
1.1.3 Резонансная ультразвуковая спектроскопия	19
1.2. Акустическая эмиссия	20
1.3. Линейная и нелинейная виброметрия	21
1.4. Радиационный контроль	23
1.5. Визуально-оптический контроль	24
1.6. Радиоволновый контроль	24
1.7. Термографические методы неразрушающего контроля	25
1.8. Выводы по Главе 1	25
Глава 2. Развитие метода ультразвукового инфракрасного термографического контроля с использованием магнитострикционного способа возбуждения ультразвука	27
2.1. Теоретические основы метода	27
2.2. Резюме ранних исследований, выполненных в ТПУ	31
2.3. Развитие магнитострикционного принципа возбуждения ультразвука применительно к задачам неразрушающего контроля	32
2.3.1 Установка для непрерывной УЗ стимуляции	32
2.3.2 Установка для импульсной УЗ стимуляции	34
2.3.3 Тепловизионная система теплового дефектоскопа	35
2.4. Магнитострикционный ультразвуковой инфракрасный дефектоскоп и результаты его применения для обнаружения ударных повреждений в углепластике	35
2.5. Спектральная характеристика ультразвукового инфракрасного контроля	40
2.6. Модификация компьютерной программы ThermoSource	46
2.6.1. Результаты моделирования термоакустического отклика дефектов в композиционных материалах (на примере углепластика)	48
2.6.2. Параметры дефектов	53
2.7. Преобразование акустической энергии в тепловую энергию	56

2.8. Выводы по Главе 2	64
Глава 3. Сравнительные экспериментальные исследования инфракрасного термографического контроля композитов при оптической и ультразвуковой стимуляции (синтез данных)	67
3.1. «Классический» тепловой контроль при оптической стимуляции	67
3.2. Исследуемые образцы	68
3.3. Контроль ударных повреждений в углепластиковых композитах	70
3.4. Выводы по Главе 3	74
Глава 4. Разработка метода маломощной резонансной стимуляции композитов с регистрацией температурных полей методом инфракрасной термографии	76
4.1. Резонансная ультразвуковая инфракрасная термография	76
4.2. Аппаратурная база метода	77
4.3. Резонанс дефекта	79
4.4. Теплогенерация в результате резонансных вибраций дефектов	86
4.5. Эффективность резонансной УЗ ИК вибротермографии	96
4.6. Перспективные направления исследований	100
4.7. Сравнение мощной и маломощной УЗ ИК термографии	114
4.8. Выводы по Главе 4	126
Общие выводы	126
Публикации автора	129
Литература	131
Приложение А Теоретический расчет частоты резонанса пластины в области прямоугольного отверстия	137
Приложение Б Теоретический расчет частоты резонанса пластины в области круглого отверстия	145
Приложение В Акт использования результатов диссертационных исследований	151

Термины и определения

Инфракрасная термография – совокупность методов и технических средств для дистанционной регистрации и анализа характеристик тепловых (температурных) полей объектов по их тепловому (инфракрасному) излучению.

Температурное поле – распределение температуры на участке поверхности контролируемого объекта.

Ультразвуковой неразрушающий контроль – метод (вид) неразрушающего контроля материалов и изделий, основанный на исследовании процесса распространения ультразвуковых колебаний с частотой от 0,5 до 50 МГц в объектах контроля с помощью специализированного оборудования.

Ультразвуковая инфракрасная термография – совокупность методов и технических средств для регистрации и анализа изменений температурного поля на поверхности объекта исследования, возникающих в результате его акустической стимуляции.

Тепловой неразрушающий контроль – метод (вид) неразрушающего контроля материалов и изделий, основанный на регистрации и анализе изменения температурных сигналов, полученных в результате регистрации температурного поля на поверхности объекта контроля.

Лазерная виброметрия – метод измерения скорости и смещения частиц среды на поверхности объекта в ответ на различные виды возбуждения за счет использования аппаратуры лазерной доплеровской виброметрии.

Обозначения и сокращения

- T – температурный сигнал, °C;
- ΔT – дифференциальный температурный сигнал, °C;
- ΔT_m – максимальный дифференциальный температурный сигнал, °C;
- α – температуропроводность материала, м²/с;
- K – теплопроводность материала, Вт/(м·K);
- ρ – плотность материала, кг/м³;
- C, c_n – теплоемкость материала, Дж/(кг·K),
- t – текущее время, с;
- c – скорость звука, м/с;
- λ – длина акустической волны, м;
- f – частота колебаний, Гц;
- ω – угловая (циклическая) частота колебаний, рад/с;
- v – колебательная скорость частиц среды, м/с;
- v_0 – амплитуда колебательной скорости частиц среды, м/с;
- V_{LDR} – амплитуда колебательной скорости частиц среды в области дефекта, м/с;
- V_{input} – амплитуда колебательной скорости частиц среды в бездефектной зоне, м/с;
- f_{LDR} – частота резонанса дефекта, Гц;
- K_{LDR} – коэффициент усиления амплитуды вибраций за счет резонанса дефекта;
- Z_m – максимальное смещение частиц среды относительно положения равновесия, мм;
- ϵ_0 – относительная деформация изделия;
- P – амплитуда переменного акустического давления, Па;
- I – интенсивность звука, Вт/м²;
- S – площадь поперечной площадки, расположенной перпендикулярно направлению распространения акустической волны, м²;
- $P_{эл.}$ – электрическая мощность генератора акустических колебаний, Вт;
- $P_{ак.}$ – акустическая мощность излучателя, переносимая звуковой волной через поперечную площадку, расположенную перпендикулярно распространению звука, Вт;
- $P_{тепл.}$ – тепловая мощность, затраченная на генерацию тепла в объеме материала, Вт;
- $\eta_{эа}$ – коэффициент преобразования электрической мощности излучателя в акустическую;
- $\eta_{ат}$ – коэффициент преобразования акустической мощности излучателя в тепловую мощность, рассеиваемую дефектом;

$\eta_{\text{эт}}$ – коэффициент преобразования электрической мощности излучателя в тепловую мощность, рассеиваемую дефектом;

$P_{\text{ном}}$ – потребляемая мощность, Вт;

$P_{\text{вых}}$ – выходная мощность, Вт;

ΔP – шаг дискретизации мощности, Вт;

$U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение, В;

$f_{\text{вых}}$ – частота генерации УЗ колебаний, кГц;

$I_{\text{подмагн.}}$ – ток подмагничивания, А;

L_0 – расстояние между магнитострикционным излучателем и дефектами, мм;

$S_{\text{нов.}}$ – площадь контролируемой поверхности, м²;

$\Delta T_{D1} - \Delta T_{D6}$ – дифференциальное значение температурного сигнала в области дефектов 1-6, °С;

x, y, z – декартовы координаты, м;

q_j – одна из декартовых координат x, y или z , м;

i – количество слоев и источников тепла, т.е. дефектов;

T_i – дифференциальный температурный сигнал в i -й области, °С;

T_{in} – начальная температура изделия, °С;

α_i^{qj} – температуропроводность в i -ой области по координате q_j , м²/с;

K_i^{qj} – теплопроводность в i -ой области по координате q_j , Вт/(м·К);

$w(x, y, \tau)$ – плотность мощности источников тепловыделения, Вт/м³;

$Q(x, y, \tau)$ – плотность теплового потока, Вт/м²;

h_F, h_R – коэффициенты теплообмена на передней и задней поверхностях пластины, Вт/(м²·К);

T_{amb} – температура окружающей среды, °С;

L_x, L_y, L_z – геометрические размеры образца, м;

L – толщина изделия, м;

l – глубина залегания дефекта, м;

d – толщина дефекта, м;

V – объем материала, м³;

Q – мощность, затраченная на тепловыделение в области дефекта, мВт;

K_{eff} – эффективная жесткость, Н/м;

M_{eff} – эффективная масса, кг;

R – радиус, мм;

D – изгибная жесткость пластины, Па×м³;

E – модуль Юнга (модуль упругости), Па;

ν, η – коэффициент Пуассона.

УЗ – ультразвуковой

ИК – инфракрасный

ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь

ТК – тепловой контроль

ТФХ – теплофизические характеристики

НК – неразрушающий контроль

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика

АЭ – акустическая эмиссия

СВЧ – сверхвысокочастотные

УФО – ультразвуковая финишная обработка

ПММА – полиметилметакрилат

ВВЕДЕНИЕ

Обнаружение и моделирование повреждений материалов, влияющих на качество и безопасность эксплуатации конструкций, являются взаимозависимыми областями научных исследований, имеющими самостоятельное научно-техническое значение. В настоящее время в различных технологических применениях находят все более широкое применение композиционные материалы, обладающие уникальными свойствами, которые превышают по свойства традиционно используемых материалов (древесины, стали, сплавов металлов). Одним из наиболее важных преимуществ этих материалов является возможность их предварительного проектирования соответственно техническим требованиям конкретного изделия в определенной области применения, что позволяет организовать индивидуальный подход к процессу производства материалов и изделий для решения конкретной научной задачи. Однако, вследствие наличия микроструктурных неоднородностей и дефектов в структуре композитов, их качество и состояние должны быть оценены и подвергнуты количественным оценкам для прогнозирования прочности и срока службы как исходных материалов, так и конкретных изделий. В связи с этим вопросы контроля качества, а также исследования старения и усталости композиционных материалов приобретают значительную актуальность.

В настоящее время мировыми научно-исследовательскими центрами разработан ряд методов неразрушающего контроля материалов и изделий, позволяющих осуществлять мониторинг развития повреждений в материале на всех стадиях до его полного разрушения в процессе приложения нагрузки на образец или в ходе старения материала. Таким образом, реализуется возможность постоянного контроля развития дефектов в различных материалах при определенных внешних воздействиях и эксплуатационных условиях. Очевидно, что решение вопроса об окончательной пригодности изделия является следствием непрерывно наблюдаемого процесса в конкретном образце. После того, как механизмы появления и развития дефектов материалов были исследованы с помощью неразрушающего контроля (НК), полученные информативные параметры используют для прогнозирования роста повреждений или трещин, а также вычисления предельных нагрузок структуры. Исследование развития дефектов в широком диапазоне волоконно-матричных (композиционных) структур позволяет проанализировать повреждения и создать общие модели дефектов, а также выполнить их классификацию. В целом, считается, что определение срока службы материалов и анализ процессов развития дефектов в них станут более предсказуемыми и регулируемыми после внедрения в практику вышеописанных подходов.

Известным фактором актуальности разработки именно тепловых/инфракрасных методов являются известные недостатки так называемых «традиционных» методов неразрушающих испытаний применительно к композитам. В частности, анализ зарубежной литературы позволяет сделать вывод, что тепловой контроль (ТК) в настоящее время является основным методом испытаний материалов и изделий авиакосмической техники. Обзор соответствующих исследований был сделан в кандидатских диссертациях В.С. Хорева, И.А. Лариошиной, А.С. Попова и А.О. Чулкова, ранее защищенных в Национальном исследовательском Томском политехническом университете (ТПУ).

Актуальность темы исследования

Многослойные композиционные материалы и сотовые структуры широко используются при производстве летательных аппаратов авиационной и ракетно-космической техники. Обеспечение надежной и безопасной эксплуатации этих изделий является важной научно-технической проблемой. Панели и узлы изделий из многослойных композитов эксплуатируются в условиях воздействия статических и динамических нагрузок, а также подвержены значительным колебаниям температуры и влажности окружающей среды, в том числе, из-за смены климатических и географических поясов. 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: X. 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 Лавала), Китая (Бейхан Университет). В России исследования в данной области преимущественно проводятся в НИ ТПУ (Томск), ЦНИИ СМ (Москва), НИИИИ 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 ТПУ, 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. Будадина).

Цель диссертационной работы: разработать и усовершенствовать методику неразрушающего контроля дефектов в композиционных материалах по параметрам вибрационного и температурного отклика на УЗ стимуляцию.

Для достижения цели в работе были поставлены следующие задачи:

- исследовать связь параметров УЗ излучения, вибрационного и температурного сигналов при УЗ стимуляции с изменяющейся частотой;
- 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

1. 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 магнитостриктора до 1,5 кВт. Основной вклад в повышение температуры углепластика вносят дефекты, расположенные на глубинах до 1,5 мм.

2. Установлено, что мощная УЗ стимуляция ударных повреждений в углерод-углеродных композитах при электрической мощности магнитострикционных 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 магнитострикционного излучателя, что составляет около 20% от акустической мощности излучателя.

3. 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.

4. 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.

Новизна вышеприведенных положений подтверждена 4-мя публикациями в международных журналах с импакт-фактором более 1.

Практическая значимость работы:

1. 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.

2. 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:

1. 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 магнитостриктора до нескольких сотен ватт). 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.

2. 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°C.

3. 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.

4. Поскольку дефекты композиционных материалов имеют сложную структуру, они являются самостоятельными 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).

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 АГТА-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 2014г. «Технологии и комплексы томографического неразрушающего контроля нового поколения», контракта №5-285/14 от 18.11.2014г. «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.

ГЛАВА 1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ И ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Ультразвуковой неразрушающий контроль волоконно-композиционных материалов

Существует множество методов НК и методов анализа свойств материалов с использованием упругих волн. Ниже представлены основные из них, наиболее подходящие для волоконно-композиционных материалов.

1.1.1 Традиционные ультразвуковые методы неразрушающего контроля

Помимо рентгеновского метода контроля, УЗ контроль является вторым старейшим из методов неразрушающей оценки качества материалов и изделий. Оба метода широко используются как для обычного тестирования, так и в качестве основы сложных томографических комплексов.

Наиболее распространенными типами УЗ контроля является эхо-импульсная и трансмиссионная техника для передачи УЗ с использованием пьезокерамических преобразователей (ПЭП), что широко освещено в литературе [1]. Эти виды УЗ контроля основаны на отражениях, рассеяниях и затуханиях продольной упругой волны в УЗ и звуковом диапазонах от 50 Гц до 50 МГц от дефектов в твердых телах. Датчики обычно плотно соединены с исследуемой поверхностью с помощью жидких или полужидких гелей. Реальные режимы сканирования становятся доступными при погружении зонда и образца в резервуар с водой, и при направлении волны через иммерсионный слой воды толщиной в несколько миллиметров или сантиметров.

Несмотря на то, что существует целый ряд методов и устройств для генерации и детектирования УЗ волн, таких как электромагнитные и емкостные датчики, мощные лазерные импульсы и интерферометрия, в инженерной практике, в основном, используются пьезоэлектрические преобразователи.

Визуализация данных

Ультразвуковой НК имеет ряд способов представления данных из точечных, линейных областей и площадей сканирования. Зарегистрированный сигнал обычно представляется следующими способами.

- А-сканирование: данный метод отображает информацию в виде одномерного изображения, в котором первая координата – это амплитуда отраженного сигнала от границы сред с разным акустическим сопротивлением, а вторая координата представляет собой

расстояние до этой границы. Всякий раз, когда звуковая волна встречает материал с отличной плотностью (акустический импеданс), часть звуковой волны отражается обратно к зонду и детектируется как эхо. Время, необходимое для регистрации эхо-сигнала используется для определения глубины отраженного объекта. Чем больше разница между значениями акустического импеданса двух сред, тем больше величина эхо-сигнала.

- **В-сканирование:** представляет собой двухмерное (2D) поперечное цветное или черно-белое изображение объекта исследования, яркость оттенков которого зависит от силы эхо-сигнала.

- **С-сканирование:** результатом сканирования выбранной области является 2D-изображение, расположенное в плоскости перпендикулярной плоскости В-сканирования. Глубина расположения дефекта определяется по аналогии с А-сканированием. Цвет каждого пиксела изображения определяется максимальной амплитудой эхо-сигнала в течение определенного времени среза.

Техника контактного ультразвука

Наиболее широко в УЗ контроле применяют один или два преобразователя, находящихся в тесном контакте с поверхностью образца.

Первоначально была реализована передача сигнала от одного датчика на другой, прикрепленный к противоположной стороне, например, стенке резервуара. В процессе прохождения УЗ волны через контролируемый объект при наличии дефекта (трещины и т.д.), происходит уменьшение амплитуды волны и запаздывание импульса, вызванное увеличением пути прохождения сигнала при огибании области повреждения. Ориентация дефекта при этом значения не имеет, что является одним из главных достоинств метода. К таким акустическим методам неразрушающего контроля относят амплитудный и временной теневые методы. Поскольку доступ к обеим поверхностям исследуемого образца не требуется, то становится возможным непрерывное тестирование закрытых структур. Достижения в области электроники и дизайна преобразователей позволяют генерировать короткие УЗ импульсы. При этом один датчик можно использовать для отправки и приема сигнала. По времени отраженного импульса перемещения на осциллографе можно определить не только размер дефекта, но и глубину его залегания.

Установка одного или двух датчиков, прочно соединенных с образцом, может быть использована для измерений свойств материалов путем исследования скорости распространения акустической волны в объекте исследования, её ослабления и спектрального отклика материала. Однако зонд должен размещаться вручную для каждого измерения отдельно, а слишком гладкая поверхность приводит к износу преобразователей. Поэтому основными недостатками данного метода являются: отсутствие возможности

точного определения положения и размера дефекта, необходимость двустороннего доступа к контролируемому объекту, низкая чувствительность и трудоемкое зондирование больших структур.

Иммерсионная техника

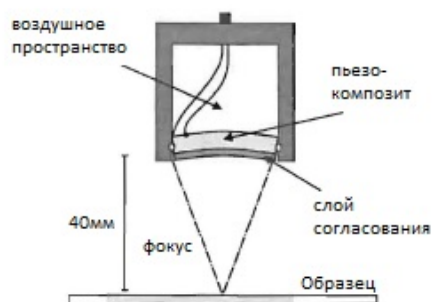
Методика погружения объекта исследования в иммерсионную жидкость применима для автоматического сканирования больших структур. Суть подхода состоит в заполнении зазора в слоях дефекта (до нескольких сантиметров) соединительной жидкостью, обычно водой, за счет погружения образца и преобразователя в достаточно большой резервуар с жидкостью и последующего сканирования всей поверхности объекта исследования. Поскольку положение образца известно, измерение времени отражения УЗ волны от стенки объекта позволяет получить 3D изображение поверхности образца. Фокусирующие преобразователи применяют для селективного зондирования определенной глубины внутри объекта путем простого изменения расстояния от поверхности твердого тела. Границей применения метода погружения является сканирующая акустическая микроскопия, которая использует высокочастотные сферически сфокусированные датчики с большой апертурой для сопоставления внешних и внутренних пограничных слоев. Разрешение приборов, использующих в своей работе данный метод, достигает 1 мкм.

Несмотря на то, что вышеописанные методы широко применяют в отраслях промышленности, ориентированных на металлы, для контроля качества современных волоконных композитных материалов они применяются ограниченно по следующим причинам.

1. Материалы, чувствительные к жидкостям, такие как дерево или предварительно пропитанные углеродные волокнистые материалы, будут «испорчены» при контакте с водой или любым из часто используемых гелей.
2. Свойства пористых материалов будут изменяться со временем при погружении в воду, даже если они не будут разрушаться. Вероятность обнаружения, например, отслоений, будет значительно сокращена при заполнении этого пространства водой.
3. Отсутствие возможности контроля образцов большого объема и их погружения в воду.

1.1.2 Ввод ультразвука через воздух

Использование «воздушного» ультразвука для неразрушающего контроля материалов долгое время считалось невозможным. Главной причиной является отражение волны на границе раздела двух сред. Поэтому динамический диапазон оборудования должен быть достаточно большим для обнаружения слабых сигналов.



а)



б)

Рисунок 1.1 Блок-схема (а) и фотография (б) воздушного УЗ пьезопреобразователя со сферической фокусировкой

Большинство УЗ пьезопреобразователей с воздушной связью являются резонансными, т.е. имеют узкую полосу рабочих частот и определенную частоту резонанса. Ещё одной важной особенностью данных преобразователей является наличие сильной зависимости коэффициентов передачи и отражения УЗ волны от отношения толщины пластины к длине УЗ волны. Поэтому одной из основных областей применения этих преобразователей является тестирование пластинчатых структур с использованием импульсов, более коротких, чем размеры образца. Блок-схема и изображение воздушного УЗ пьезопреобразователя со сферической фокусировкой приведены на Рисунке 1.1.

Аппаратура

Для организации процесса возбуждения материала с помощью воздушного УЗ преобразователя необходимо соблюсти следующие требования.

- Согласование полного сопротивления.

Когда УЗ волны, возбуждаемые пьезоэлектрическим преобразователем, передаются и принимаются через воздух, значительно возрастает коэффициента отражения. Коэффициент передачи может быть увеличен путем добавления на поверхность материала слоя материала, обеспечивающего согласования полных сопротивлений.

- Узкополосный диапазон частот

Амплитуда механических колебаний резонирующей системы зависит от ее полосы пропускания. Для компенсации высоких потерь, связанных с воздушной связью упругих волн, не требуется максимального увеличения амплитуды сигнала, что может быть достигнуто с помощью резонанса и узкополосного преобразователя. Отрицательной стороной «воздушного» ультразвука является очень длительные (десятки периодов) импульсы и необходимость совершенного частотного соответствия пар преобразователей.

- Мощное возбуждение

В то время как обычное оборудование, использующее широкополосное возбуждение, не создает амплитуду более 100 В, в случае «воздушного» ультразвука такого уровня энергии недостаточно. Для эффективного возбуждения резонансными «воздушными» УЗ преобразователями используют синусоидальные или прямоугольные импульсные сигналы с амплитудой в несколько сотен вольт. В постоянном режиме работы на «воздушные» УЗ преобразователи можно подавать сигнал с амплитудой не более 90 В.

- Фокусировка

Для создания необходимого уровня энергии упругой волны и увеличения чувствительности приемника, необходима минимальная активная поверхность преобразователя, как правило, до нескольких квадратных сантиметров. Однако в случае «воздушного» ультразвука следует корректировать параметры излучения и согласования пары преобразователей. Для большинства задач НК получающееся пространственное разрешение «воздушных» УЗ преобразователей без фокусировки было бы весьма неудовлетворительным, поэтому для эффективной работы преобразователей необходимо использовать фокусирование сигнала приема/передачи. Процесс выравнивания двух узко сфокусированных преобразователей довольно сложен, поэтому часто используют слабо сфокусированные системы с размером фокусного пятна в несколько миллиметров.

Несмотря на то, что в настоящее время проводятся исследования по использованию «воздушных» УЗ преобразователей в области НК, коммерческого применения такие преобразователи пока не нашли.

1.1.3 Резонансная ультразвуковая спектроскопия

Одним из методов неразрушающего контроля материалов и изделий является резонансная УЗ спектроскопия. Сущность метода заключается в возбуждении УЗ колебаний в определенном диапазоне частот и регистрации спектра сигнала отклика для его дальнейшей обработки. В качестве диагностического параметра используют статистический критерий отклонения экспериментального спектра отклика от рассчитанного.

Теоретически оптимизированный спектр отклика является результатом решения обратной задачи резонансной УЗ спектроскопии путем вариации значений модулей упругости в случае предположения материала однородным и изотропным с учетом его допустимой анизотропии или известной кристаллической структуры [2].

Техника синхронного детектирования (Lock-in)

Метод УЗ термографии также включает в себя использование сложных методов обработки данных. Одним из таких методов является «Lock-in», который осуществляет синусоидальную модуляцию сигнала УЗ стимуляции исследуемого образца, а также

синхронизирует последовательность термограмм по амплитуде и фазе. С помощью дальнейшего преобразования Фурье устраняют сигнал помехи, представляющий собой незначительный нагрев всей поверхности образца в процессе УЗ стимуляции [3].

Стоит отметить, что наличие скрытых дефектов приводит к искажениям поведения температурных функций во времени (в частотном спектре) и по амплитудам. Таким образом, при стимуляции объекта исследования УЗ или тепловым методом, изменение температуры в любой точке поверхности представляет собой гармоническую функцию определенной амплитуды и фазы, что после преобразования Фурье дает информацию о наличии дефектов и их характеристиках.

1.2. Акустическая эмиссия

Акустическая эмиссия (АЭ) определяется как локальное испускание акустических волн в объекте контроля. Для этого материал подвергают нагружению силой, давлением, температурным полем и т.д. Энергетический выпуск происходит в процессе деформации и разрушения (роста трещин) в объектах контроля и регистрируется одним или несколькими преобразователями, расположенными на поверхности материала.

Особенность метода заключается в том, что данный метод способен обнаруживать только образование новых трещин и прогрессирование существующих трещин, прохождение газообразных и жидких сред через узкие отверстия, процессы трения, которые неизбежно сопровождаются возникновением волн. Также следует отметить, что данный метод обладает весьма высокой чувствительностью к растущим дефектам (предельное значение чувствительности АЭ аппаратуры составляет 10^{-6} мм², что соответствует увеличению трещины длиной 1 мкм на величину 1 мкм) [4].

Метод акустической эмиссии является одним из нескольких методов, способных охарактеризовать процесс разрушения в непрозрачных материалах в условиях реальных нагрузок и определить возможные причины выхода испытуемого образца из строя, а также определить статическую прочность объекта исследования и срок его безопасной эксплуатации.

Недостатком способа является то, что частичное тестирование неидеально воспроизводит параметры дефекта из-за непредсказуемого характера источника сигнала. Например, при исследовании образования трещин следует учесть, что сигналы, связанные с трещиной, зависят от типа материала и типа тестирования. Хотя образцы одинаковой формы и изготовленные из одного и того же материала должны создавать одинаковые параметры акустической эмиссии под нагрузкой, но это не всегда соответствует действительности.

Главная проблема применения метода состоит в сложности выделения сигналов АЭ из сигнала помех, что связано со случайной импульсной природой происхождения полезного сигнала. Поэтому, если сигналы акустической эмиссии по амплитуде сравнимы с уровнем шума, выделение полезного сигнала представляет собой сложную задачу.

В качестве дополнительных преимуществ метода следует отметить то, что при благоприятных условиях проведения эксперимента, когда регистрируемый сигнал превышает пороговый уровень, необходимо небольшое количество датчиков для реализации процесса контроля материалов. Датчики закрепляют на поверхности образца в течение всего времени тестирования и не требуют перемещения для сканирования всей структуры. Также реализация метода не требует доступа к обеим сторонам объекта.

1.3. Линейная и нелинейная виброметрия

Современная измерительная лазерная техника основана на применении лазерных доплеровских виброметров. В связи с прогрессом в области микроэлектроники, такое устройство является отличным инструментом для измерения скорости и смещения частиц среды на поверхности объекта в ответ на различные виды возбуждения. В связи с этим, данная аппаратура часто используется для анализа качества в НК совместно с другими методами, в том числе, с УЗ стимуляцией.

Классификация виброметрии на линейную и нелинейную определяется типом передаточной функции системы (в случае УЗ стимуляции – синусоидальной упругой волны). Под системой подразумевается устройство или конструкция, воспринимающие какой-либо сигнал возбуждения (вход) и генерирующие на данный сигнал отклик (выход). Систему называют линейной, если выполняется два необходимых условия: выход системы пропорционален её входу и не дает на выходе сигнал с частотами, отсутствовавшими во входных сигналах. В противном случае система является нелинейной.

Оба типа виброметрии, линейная и нелинейная, являются мощными инструментами, которые обеспечивают оптимальную чувствительность и эффективность при анализе структурных повреждений [5].

Линейная виброметрия

Суть метода заключается в регистрации прогиба каждой точки поверхности исследуемого образца в процессе вибрации с помощью лазерного виброметра. Вибрации, в свою очередь, инициируются импульсом от «молотка» или «громкоговорителя» и заставляют образец вибрировать в многомодовом режиме, отражая упругие свойства объекта контроля.

Поскольку развитие или рост повреждений в композиционных материалах вызывает изменения модальных параметров, виброметрия подходит для неразрушающей оценки повреждений. Частота и демпфирование – две особенности полного модального анализа, который включает определение формы деформированного объекта в стационарных вибрационных условиях (стоячие волны, вибрационные моды). При условии, что дефект влияет на модальные параметры измеряемых полей, проведение анализа частот и коэффициентов затухания достаточно для оценки состояния повреждения.

Недостатком метода является необходимость обязательного проведения двух измерений для определения характера повреждения с точки зрения изменений частоты и затуханий вибраций: первое – в начальном состоянии контролируемого объекта и второе – в процессе роста повреждения. Кроме того, анализ изменения частоты и демпфирования не дает информации о положении дефекта в исследуемом объекте, поэтому местонахождение поврежденных зон, возможно, определить только с помощью анализа чувствительности.

Преимущество интегральной методики линейной виброметрии заключается в том, что она применима для контроля малых и крупных повреждений при сохранении надлежащего качества получаемых данных, сопоставимых по своим характеристикам с результатами других методов НК, оперирующими более подробной информацией о параметрах исследуемого объекта [6].

Нелинейная виброметрия

Данный метод основан на применении неклассической нелинейной акустики, которая, в основном, была разработана на основе классической нелинейной акустики. В случае классической нелинейности, увеличение волнового искажения происходит в то время, когда первоначально монохроматическая волна распространяется вдоль нелинейного материала, что приводит к возникновению ультра гармоник основных частот, которые несут информацию о свойствах материала [7].

В случае, когда частота возбуждения близка к собственной частоте дефекта, наблюдается явление резонанса дефекта, рассмотренное в работах профессора И.Ю. Солодова (I. Solodov) [8–10]. В этом случае вибрации в дефектной зоне значительно усиливаются, активируя поврежденную область и выделяя их на общем фоне в процессе сканирования объекта на данной частоте. Если частота возбуждения кратно отличается от частоты резонанса дефекта, в амплитудно-частотном спектре появятся нелинейные резонансные субгармоники.

В случае наличия в зоне повреждения нескольких характерных резонансных частот, система производит преобразование пар частот, складывая их между собой. Все нелинейные

частоты при этом выборочно указывают на нелинейные недостатки и тем самым облегчают задачу визуализации поврежденной области исследуемого материала и определение его структуры. Также следует отметить, что неотъемлемой частью метода является применение метода расчета конечных элементов в сочетании с модальным анализом для более подробной оценки состояния повреждения [6].

1.4. Радиационный контроль

Данный вид неразрушающего контроля основан на регистрации и анализе ионизирующего излучения (электроны, протоны, гамма-излучение, нейтронов и др. заряженные частицы) после взаимодействия с контролируемым объектом [11]. В основе радиационных методов контроля лежит получение дефектоскопической информации об объекте путем ионизации атомов и молекул контролируемой среды. Результаты применения радиационных методов НК определяются природой и свойствами ионизирующего излучения, физико-техническими характеристиками объекта исследования, типом и свойствами регистратора, а также технологией контроля и квалификацией операторов [12].

Современное оборудование рентгеновской компьютерной томографии позволяет получать двухмерные и трехмерные изображения объекта исследования, сочетая НК с послойным сканированием образца с разных углов зрения при его вращении вокруг своей оси. Благодаря индивидуальным особенностям поглощения и рассеивания ионизирующего излучения материалами, в ходе исследования определяется внутренняя структура и геометрия контролируемого объекта, внутренние контуры, зазоры, качество прилегания соединений, наличие и вид дефектов, появившихся в процессе эксплуатации, а также многие другие параметры, с точностью до единиц мкм. Приведенные достоинства радиационных методов делает их наиболее точными из всех имеющихся методов НК. Следует отметить, что радиография играет важную роль в аэрокосмическом секторе, однако, применение данной технологии для контроля качества композиционных материалов относится к процессу производства материалов, поскольку метод предусматривает необходимость всестороннего доступа к образцу исследования и специальные условия проведения эксперимента [12].

Принцип работы данного метода, а также томографическое оборудование, достаточно хорошо освещены в работах [13–15].

1.5. Визуально-оптический контроль

Исторически данный метод является основным, самым простым и, как правило, выполняется до применения других методов контроля. Самым простым применением данного метода является визуальный контроль, осуществляемый только глазом человека, однако ограниченные возможности человеческого зрения привели к совместному использованию оптических приборов, позволяющими увеличить эффективность осмотра. Такой метод, сочетающий визуальный контроль с использованием оптического оборудования, называют визуально-оптическим. К методикам оптического контроля также относятся рефрактометрия, интерферометрия, лазерные и голографические методы контроля.

Работа современных систем для визуально-оптического контроля основана на изучении взаимодействия светового излучения с поверхностью контроля. Современные системы включают в себя отдельные информационные и осветительные каналы с возможностью автоматизированного синхронного управления [16], сканирование поверхности лазерным микроскопом-зондом [17], метод широкографии [6] и т.д.

К преимуществам данного метода следует отнести его простоту и сравнительно малую трудоемкость. Однако применение данного метода ограничено точностью используемого оборудования и возможностью обследования только поверхностных дефектов материалов и изделий. Таким образом, для непрозрачных материалов в ходе оптического контроля может быть получена только косвенная информация о состоянии объекта, в связи с чем в дополнение к оптическому оборудованию даже высокого уровня необходимо параллельное использование других методов НК.

1.6. Радиоволновый контроль

Данный метод НК основан на анализе взаимодействия электромагнитного излучения радиоволнового диапазона с объектами контроля.

За счет большого интервала мощностей генерируемых волн и высокой точности метода, на практике более широкое применение находят сверхвысокочастотные (СВЧ) методы, работающие в диапазоне длин волн от 1 до 100 мм. Использование радиоволнового метода контроля позволяет проводить односторонний контроль качества с получением информации о внутренней структуре, составе, геометрии и дефектах исследуемого материала с хорошим уровнем помехоустойчивости по отношению к расположенным вблизи предметам и собственной температуре контролируемого объекта. Выбор определенного СВЧ метода контроля для конкретной области применения во многом определяется диэлектрическими

свойствами контролируемых материалов и дефектов, а именно, диэлектрической проницаемостью и тангенсом угла диэлектрических потерь.

Недостатком метода является малая глубина проникновения радиоволн, следствием чего является низкая разрешающая способность СВЧ устройств, для НК материалов и изделий [1].

1.7. Термографические методы неразрушающего контроля

В основе данного метода лежит исследование температурных процессов (температурных полей, тепловых потерь и т.д.) объекта контроля. Тепловой метод классифицируют на: активный с использованием дополнительного источника тепловой стимуляции объекта, пассивный режим, включающий анализ собственного температурного поля объекта, а также стационарный и нестационарный (динамический), различающиеся характером температурно-временной зависимости. Необходимость использования конкретного способа контроля определяется природой дефектов и их способностью без дополнительной стимуляции создавать «полезный» температурный сигнал [18].

Для контроля качества композитов широко используется метод активного ТК в нестационарных режимах для определения наличия подповерхностных дефектов, их положения, глубины залегания [19–21], а также ориентации волокон композиционных материалов, определении числа слоев в исследуемом образце, состава материала, его пористости и т.п. [22, 23]. Применение ТК ограничено толщиной исследуемого материала (5...10 мм), поскольку при исследовании глубинных дефектов требуется увеличивать поглощенную энергию, что влечет опасность перегрева изделия в конце действия теплового импульса; кроме того, зачастую имеет место неравномерность нагрева и, как следствие, низкий контраст температуры, что влечет за собой сложность выделения полезного сигнала на фоне помех.

1.8. Выводы по Главе 1

1. В настоящее время существует множество методов НК и методов анализа свойств материалов с использованием упругих волн, электромагнитных волн и динамического переноса тепла, нацеленные на контроль качества волоконно-композиционных материалов, широко используемых в авиастроении, область применения которых определена задачами проведения процедуры контроля качества.

2. Методы УЗ контроля широко применяют в отраслях промышленности, ориентированных на металлы, однако для контроля качества современных волоконных композитных материалов по ряду причин они применяются ограниченно.

3. Одним из перспективных методов неразрушающего контроля материалов и изделий является резонансная УЗ спектроскопия, используемая в качестве диагностического параметра статистический критерий отклонения экспериментального спектра отклика от рассчитанного, позволяющая исследовать физические свойства материалов.

ГЛАВА 2. РАЗВИТИЕ МЕТОДА УЗ ИК ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО СПОСОБА ВОЗБУЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА

2.1. Теоретические основы метода

УЗ ИК термография, называемая также вибротермографией, звуковой ИК термографией, акустической термографией, ИК термографией с использованием упругих волн, а также методом VibroIR (торговая марка) [24–27], основана на совместном использовании техники УЗ стимуляции объектов и аппаратуры ИК термографии для регистрации температурного поля поверхности исследуемого образца с целью выявления температурных различий между дефектными и бездефектными зонами. В случае УЗ ИК термографии стимуляция осуществляется механическими волнами с помощью источника УЗ колебаний, устанавливаемого на поверхности изделия, что приводит к локальному повышению температуры вследствие преобразования акустической энергии в тепловую. Преимущество использования данного метода в НК заключается в том, что испытания проводят в реальном времени и на сравнительно большой площади вокруг точки УЗ стимуляции (до 0,25 м²) [28]. Схема теплогенерации при проведении УЗ ИК термографического контроля показана на Рисунке 2.1. Характерной особенностью метода является отсутствие разогрева бездефектной области материала в ходе испытаний, что повышает чувствительность метода к дефектам малых размеров.

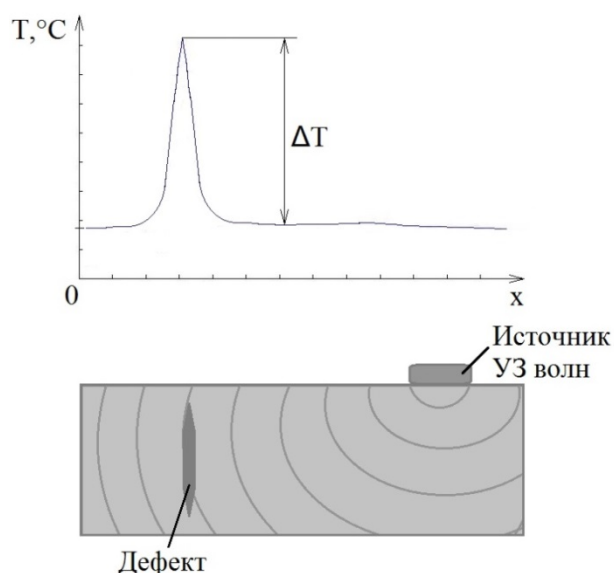


Рисунок 2.1 Схема теплогенерации на поверхности исследуемого материала в результате осуществления УЗ ИК термографии ($T, ^\circ\text{C}$ – температура изделия, ΔT – изменение температурного сигнала в области дефекта)

Принцип непрерывных и импульсных вибротермографических испытаний был предложен в конце 1970х годов Хеннеке (Henneke) и др. [24, 26]. Применение акустической стимуляции в частотном диапазоне от 1 до 20 кГц в сочетании с ИК тепловизором AGA Thermovision-680 позволило обнаружить разнообразные структурные дефекты в металлах, композитах и слоистых структурах.

В 1990^х годах Фавро (Favro) и др. [28] из Университета Уэйна, США привели результаты исследований по выявлению трещин при импульсном УЗ возбуждении. В качестве источника УЗ стимуляции была применена УЗ пушка фирмы Branson, генерировавшая импульсы мощностью до 1 кВт и длительностью от 30 до 200 мс на несущей частоте 20 кГц. Ультразвук вводили в материал через иммерсионную пасту и волновод в виде стального диска диаметром 13 мм. Подповерхностные трещины проявляли себя локальными повышениями температуры на фоне отсутствия разогрева поверхности бездефектных областей. Процесс генерации тепла в зоне дефектов визуализировали, используя режим анимации.

В Национальной Ливерморской лаборатории (США) УЗ ИК термография была использована для проверки качества сварных швов в изделиях сложной геометрической формы [29]. Дефектные швы характеризовались специфическими температурными сигнатурами, возникавшими вследствие облучения УЗ импульсами мощностью до 300 кВт и длительностью 100 мс (при несущей частоте 30 кГц). Преимуществом данного метода контроля была слабая зависимость результатов от положения точки УЗ возбуждения, а недостатком – возможность инициации новых дефектов в результате ввода столь мощного ультразвука. Теми же исследователями было выполнено сравнение возможностей акустической микроскопии, радиографии, ультразвукового и вибротермографического методов НК при выявлении дефектов в панели космического челнока, которая была выполнена из 36-слойного углепластикового композита, покрытого карбидом кремния.

В Университете штата Айова (США) применили вибротермографию для испытания 150 образцов, из которых 75 были изготовлены из титана и 75 – из сплава Инконель [30, 31]. Целью исследования было обеспечить представительную выборку для определения вероятности обнаружения дефектов. Было установлено, что посредством анализа резонансных частот возможна оценка локальных напряжений в отдельных точках, используя стандартный виброметр.

В вибротермографических экспериментах, как правило, используют мощный ультразвук определенной частоты (до 40 кГц) в связи с коммерческой доступностью и удобством эксплуатации соответствующих УЗ устройств. В стандартных испытаниях рупор УЗ датчика прижимают к объекту контроля, что может приводить к нестабильному

температурному отклику дефектов с плохо воспроизводимыми результатами. Для преодоления этого недостатка ряд исследователей, например, из Университета штата Айова (США), применили широкодиапазонное УЗ возбуждение сравнительно низкой мощности с плавающей несущей частотой [32]. Результаты исследований показали, что УЗ стимуляция даже низкой мощности способна обеспечить регистрируемые изменения температуры благодаря эффекту внутреннего трения в микронеоднородностях (при температурной чувствительности тепловизоров до 20 мК). Использование качающейся несущей частоты акустического сигнала позволило определять резонансные частоты различных дефектов.

Следуя этой концепции, Г. Буссе и И. Солодов (G. Busse и I. Solodov) из Штуттгартского Университета (Германия) выдвинули идею локального резонанса дефектов (local defect resonance – LDR) с целью повышения чувствительности маломощной УЗ ИК термографии [33]. При возникновении локального резонанса акустическая энергия преобразователя эффективно передается в дефект и затем преобразуется в тепловую энергию. Аналогичная методика была предложена С. Паем и Р. Адамсом (Pye C.J. и Adams R.D.) в 1981 г. при обнаружении сдвиговых трещин в стекло- и углепластиковых композитах путем возбуждения резонансных вибраций [34]. В ходе исследований качества материалов для каждого образца определяли соответствующую резонансную частоту, что позволило создавать необходимые механические напряжения при относительно низкой мощности возбуждения.

Структурная схема экспериментальной установки для УЗ ИК термографии (Рисунок 2.2) состоит из генератора акустических колебаний (3), устройства управления генератора (5), УЗ преобразователя (5), присоединенного к объекту исследования (1) через иммерсионный слой (6). С помощью ИК тепловизора (8) регистрируют температурное поле исследуемого материала, после чего данные передаются на персональный компьютер (9), обеспечивающий сбор и обработку цифровых данных, а также для анализа качества изделия на наличие дефектов (2). Для оптимизации работы генератора и ИК тепловизора используется блок синхронизации (7). В ряде случаев для измерения частоты и амплитуды инжектированных механических волн используют лазерный виброметр [30, 33, 35].

УЗ возбуждение может быть непрерывным, модулированным и импульсным, в соответствии, с чем различают синхронный и импульсный режимы, а также УЗ ИК термографию с использованием меняющейся частоты подаваемого акустического сигнала [28, 34–39].

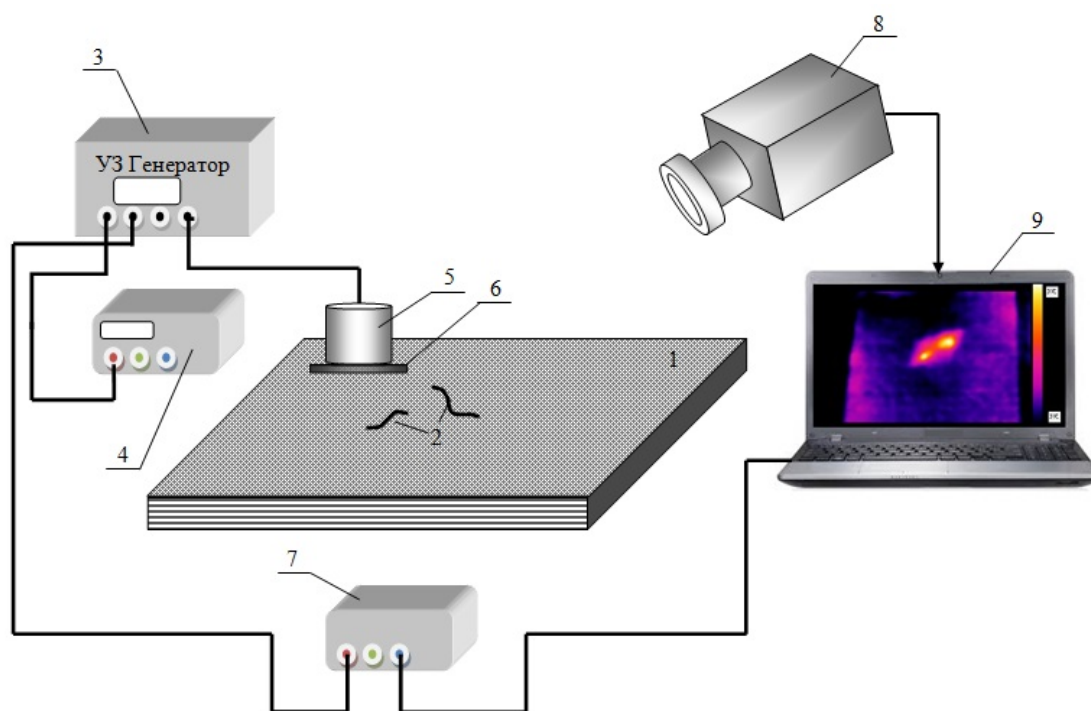


Рисунок 2.2 Структурная схема экспериментальной установки для проведения УЗ ИК термографии

В качестве акустических преобразователей для задач УЗ ИК термографии применяют пьезодатчики или магнитострикционные преобразователи, часто используемые в оборудовании для УЗ сварки и финишной очистки металлов. Применение магнитострикторов для механизмов УЗ нагружения позволяет получить до нескольких киловатт электрической мощности аппаратуры с выходным сигналом фиксированной частоты около 20 кГц. Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), используемые для УЗ термографии, также имеют свою резонансную частоту, в пределах которой их использование становится максимально эффективным. Некоторые резонансные ПЭП с узкой полосой рабочих частот, имеющих небольшое отклонение от основного значения, обеспечивают высокий допустимый уровень подаваемого электрического сигнала, что также определяет уровень акустической мощности на излучателе и, как следствие, эффективность их применения для задач мощной УЗ ИК термографии.

Для задач маломощной УЗ ИК термографии используются ПЭП с частотой резонанса в области единиц и сотен МГц. Данный тип излучателей не отличается высоким уровнем допустимой акустической мощности, однако, имеет широкополосную амплитудно-частотную характеристику, что обуславливает их применение в режиме меняющейся частоты акустического сигнала. Благодаря использованию такого типа излучателей можно исследовать поведения материала и дефектных включений в зависимости от меняющейся частоты подаваемого сигнала.

Механические волны, распространяющиеся в контролируемом материале, заставляют его вибрировать. В зонах структурных неоднородностей акустическая энергия преобразуется в тепловую, вызывая локальный рост температуры. Интенсивность теплогенерации зависит от условий стимуляции, физических свойств материала и вида дефекта. Механизм УЗ ИК термографии до сих пор составляет предмет дискуссии, считается, что тепловая энергия генерируется в дефектных зонах благодаря ряду феноменов, а именно, внутреннему трению, пластической деформации, механическому гистерезису и термоупругости [25, 28, 35, 38–40].

2.2. Резюме ранних исследований, выполненных в ТПУ

Первые отечественные исследования в области мощного УЗ ИК контроля были выполнены в НИ ТПУ в 2011–2012 гг. В.П. Вавиловым, В. С. Хоревым и др. В результате данных исследований была создана лабораторная аппаратура для УЗ ИК термографического контроля на основе мощного магнитострикционного преобразователя, используемого для ввода акустического сигнала в контролируемый объект и работающего в режимах непрерывного и импульсного возбуждения ультразвука [36]. Технические характеристики установки: частота выходного сигнала 22 кГц, минимальная длительность импульса 100 мс, шаг дискретизации 100 мс, длительность стимуляции без охлаждения до 20 с, электрическая мощность на магнитострикторе до 1,5 кВт. С использованием данной установки был проведен ряд экспериментальных исследований по определению возможностей применения УЗ ИК термографии для контроля качества композиционных материалов. Исследования [37] были направлены на определение основных механизмов тепловыделения при распространении акустических волн в твердых телах. Было выдвинуто предположение о том, что главным механизмом тепловыделения в результате УЗ ИК термографии является внутреннее трение в дефектных зонах, поскольку при отсутствии дефектов заметного разогрева образцов не наблюдалось.

В работах В.С. Хорева [41–43] также впервые была произведена оценка эквивалентной мощности тепловыделения в дефектных зонах композитов с использованием термомеханической модели тепловыделения в дефектных зонах исследуемых материалов, реализованная в два этапа. На первом этапе производили решение трехмерной задачи распространения УЗ колебаний в объекте исследования и вычисление мощности, генерируемой дефектом нулевой толщины вследствие механизма внутреннего трения. Далее, на втором этапе исследований, выполняли решение трехмерной задачи распространения тепла от известного локального источника. С помощью вышеуказанной модели были исследованы зависимости температурных сигналов в дефектных зонах от механических

свойств материала (модуля Юнга и коэффициента Пуассона), частоты акустических волн, расстояния между точкой ввода акустических колебаний и точкой наблюдения, а также их взаимной ориентации.

2.3. Развитие магнитострикционного принципа возбуждения ультразвука применительно к задачам неразрушающего контроля

В результате исследований В.С. Хорева и др. в НИ ТПУ была создана лабораторная аппаратура мощного УЗ ИК термографического контроля на основе магнитострикционного преобразователя, используемого для ввода акустического сигнала в контролируемый объект и работающего в непрерывном и импульсное возбуждение ультразвука [36]. Данные устройства были также использованы и в диссертационной работе. Ниже для связности изложения материалов настоящих диссертационных исследований кратко приведены схемы, технические характеристики и описан принцип работы двух мощных УЗ установок на основе магнитострикционных излучателей, работающие в непрерывном и импульсном режимах стимуляции.

2.3.1 Установка для непрерывной УЗ стимуляции

Ультразвуковая установка для непрерывной стимуляции основана на использовании стандартного комплекса ультразвуковой финишной обработки (УФО) металлов на базе УЗ генератора УЗГТ-02/22 и магнитострикционного преобразователя, разработанного совместно ООО «Ультразвуковые технологии» (г. Санкт-Петербург) и Институтом физики прочности и материаловедения сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН, г. Томск). На основе данной установки в Институте неразрушающего контроля ТПУ (ИНК ТПУ) был разработан УЗ тепловой дефектоскоп, работающий в режиме непрерывной УЗ стимуляции (Рисунок 2.3). Дефектоскоп включает в себя УЗ генератор УЗГТ-02/22 (1), магнитострикционный ультразвуковой излучатель (2), тепловизор (3), персональный компьютер (4) с соответствующим программным обеспечением.

Технические параметры генератора УЗГТ-02/22: 1) потребляемая мощность $P_{ном} = 400$ Вт, выходная мощность $P_{вых} = 250$ Вт, шаг дискретизации выходной мощности ΔP составляет 5 Вт, выходное напряжение $U_{вых} = 200$ В; 2) регулировка выходной мощности устройства возможна в диапазоне от 50 до 250 Вт; 3) частота генерации УЗ колебаний фиксирована и составляет $f_{вых} = 22,0$ кГц, ток подмагничивания варьируется в диапазоне $I_{подмагн.} = 2 \dots 4,5$ А; устройство работает в непрерывном режиме.

Технические характеристики магнитострикционного преобразователя:

- 1) частота генерации УЗ колебаний магнитострикционного преобразователя фиксирована и составляет $f_{\text{вых}} = 22,0$ кГц, амплитуда колебаний меняется от 5 до 20 мкм, статическое усилие прижима преобразователя варьируется в диапазоне от 60Н до 100Н;
- 2) устройство имеет воздушно-водяное охлаждение.

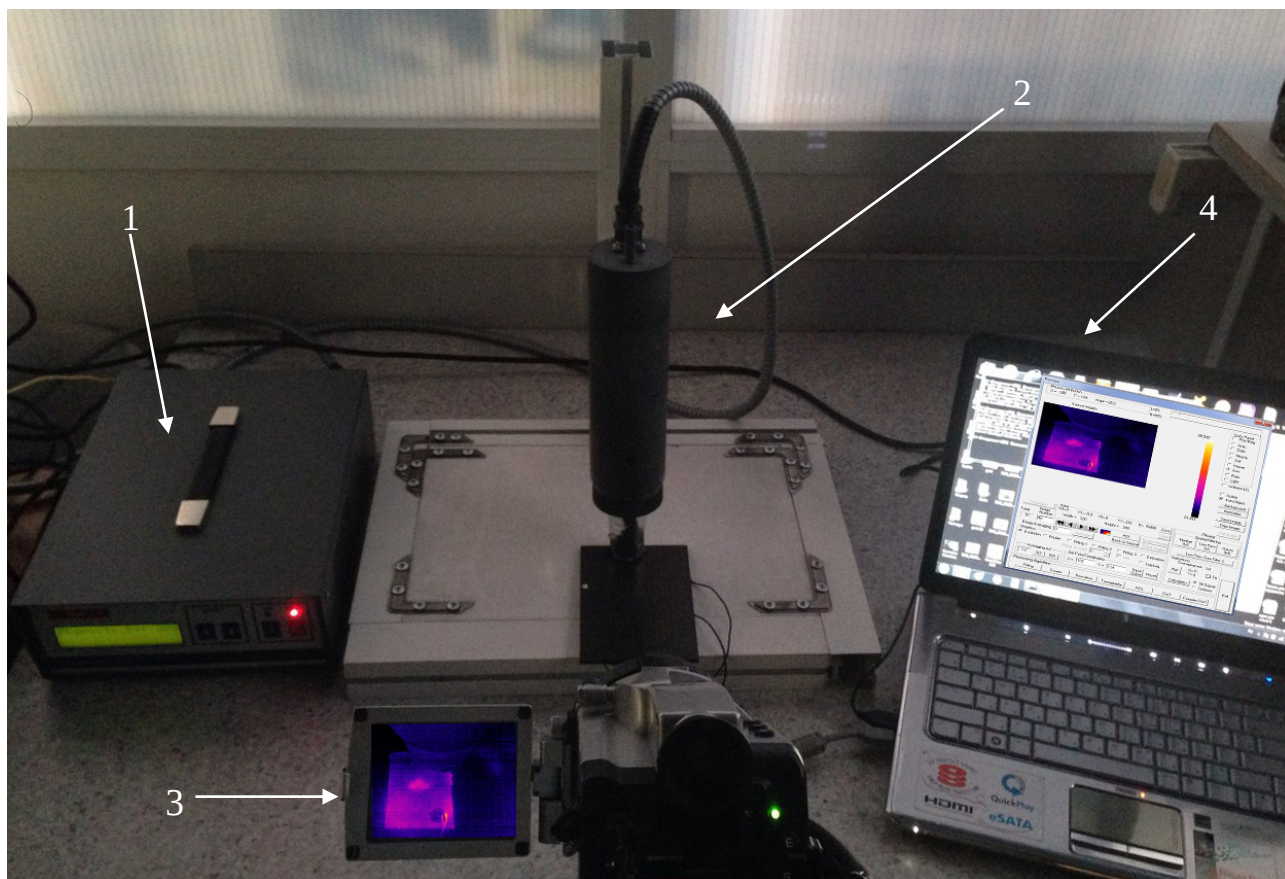


Рисунок 2.3 Тепловой дефектоскоп с непрерывной УЗ стимуляцией

Принцип работы системы УЗ ИК контроля состоит в следующем: оператор запускает запись ИК изображений тепловизором, после чего включает УЗ генератор, который в течение определенного времени подает на магнитострикционный излучатель электрический сигнал заданной частоты. После окончания стимуляции объекта, оператор останавливает работу генератора. По истечении заданного времени (обычно 5–20 секунд) после окончания УЗ нагружения объекта, запись ИК изображений также останавливается, после чего оператор производит анализ полученных изображений с помощью специализированного программного обеспечения.

2.3.2 Установка для импульсной УЗ стимуляции

Ультразвуковая установка с импульсной стимуляцией (Рисунок 2.4) разработана и изготовлена ООО «Инлаб» (г. Санкт-Петербург) по заказу ИНК ТПУ. Устройство включает генератор УЗ колебаний (1), блок управления работы генератора (2), магнитострикционный преобразователь (3) и персональный компьютер.



Рисунок 2.4 Лабораторная установка для импульсной генерации акустических волн

Технические параметры генератора УЗ колебаний ИЛ10-2.5М: 1) потребляемая электрическая мощность равна 1,5 кВт, выходная электрическая мощность составляет 1,05 кВт с возможностью регулировки в пределах 50%, 75% и 100%; 2) рабочая частота акустического сигнала фиксирована и составляет 22,0 кГц с возможностью отклонения в пределах ± 150 Гц; 3) установка времени длительности одиночного импульса варьируется в пределах 0,1–50 секунд при дискретности установки времени импульса равной 0,1 секунды.

Технические характеристики магнитострикционного преобразователя: 1) потребляемая электрическая мощность излучателя 1,5 кВт, электроакустический КПД составляет 58%, ток подмагничивания равен 7 А; 2) устройство имеет жидкостное охлаждение.

Принцип работы импульсного устройства аналогично предыдущему и состоит в следующем: оператор запускает запись ИК изображений тепловизором, после чего включает УЗ генератор, который в течение предварительно установленного времени подает на магнитострикционный излучатель электрический сигнал заданной частоты. После окончания стимуляции объекта, генератор автоматически прекращает свою работу. По истечении заданного времени после окончания УЗ нагружения объекта, оператор останавливает запись ИК изображений и производит анализ полученных изображений с помощью специализированного программного обеспечения.

2.3.3 Тепловизионная система теплового дефектоскопа

В настоящих диссертационных исследованиях была использована тепловизионная система NEC TH-9100 производства фирмы NEC Avio (Япония), представленная на Рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 Инфракрасная тепловизионная камера NEC TH-9100

Технические характеристики тепловизионной камеры NEC TH-9100: 1) спектральный диапазон от 8 до 14 мкм, встроенная цветная цифровая видеокамера обеспечивает 752×480 элементов; 2) устройство производит измерение температур с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$, но не менее $\pm 2\%$ в четырех диапазонах – диапазон 1: $-20\dots+100^\circ\text{C}$ / $-40\dots+120^\circ\text{C}$; диапазон 2: $0\dots+250^\circ\text{C}$ / $0\dots500^\circ\text{C}$; диапазон 3: $100\dots800^\circ\text{C}$ / $200\dots2000^\circ\text{C}$; диапазон 4: $200\dots2000^\circ\text{C}$; 3) поле зрения составляет $21,7^\circ \times 16,4^\circ$ с возможностью автоматической фокусировки при минимальном расстоянии 30 мм, температурная чувствительность составляет $0,08/0,1^\circ\text{C}$ при проведении измерений с частотой 60 Гц и $0,04/0,05^\circ\text{C}$ при осреднении 16 измерений; 4) частота кадров составляет 60 Гц; 5) детектор – неохлаждаемая микроболометрическая матрица из 320×240 элементов; 6) формат файлов – JPEG; 7) в качестве устройства памяти используется сменная карта памяти Compact flash; 8) дополнительно устройство включает встроенную цветную цифровую видеокамеру 752×480 элементов, двух и четырех кратный оптический «зум».

2.4 Магнитострикционный УЗ ИК дефектоскоп и результаты его применения для обнаружения ударных повреждений в углепластике

Ультразвуковой ИК метод перспективен для испытаний композиционных материалов с ударными повреждениями, в которых под воздействием вибраций и трения стенок дефектов возникает специфическое локальное увеличение температуры в области ударного повреждения на поверхности исследуемого материала, обусловленное рассеянием энергии механических колебаний на дефектах и превращением её в тепловую энергию.

Инфракрасные термограммы испытуемых материалов также отчетливо обнаруживают трещины, расслоения и другие виды дефектов, в которых при УЗ облучении возникает внутреннее трение.

Лабораторные исследования для оценки обнаружения ударных повреждений в углепластиковом композиционном материале были проведены с использованием лабораторной установки мощной УЗ ИК термографии с импульсным режимом стимуляции, описанной в разделе 2.5.2.

Объектом контроля служил образец из углерод-углеродного композита размером $450 \times 350 \times 10$ мм³, в котором с помощью свободно падающего стального шарика были внесены 12 ударных повреждений с энергией 5 Дж (схема дефектов приведена на Рисунке 2.6). Указанная энергия повреждения в большинстве случаев не привела к заметным проявлениям разрушения композита на обеих поверхностях образца.

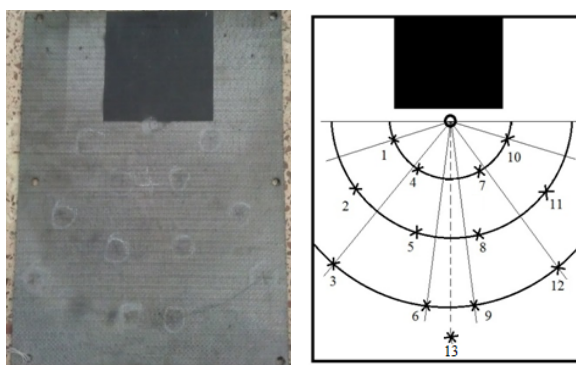


Рисунок 2.6 Углерод-углеродная панель толщиной 10 мм, содержащая 13 ударных повреждений

В ходе экспериментов было проанализировано влияние расстояния между магнитострикционным излучателем (индентором) и дефектами L_0 (50, 100, 150 и 200 мм), а также влияние ориентации дефектов относительно направления углеродных волокон на регистрируемые температурные сигналы. Длительность стимуляции составляла 5 секунд при электрической мощности на катушке магнитостриктора 1,5 кВт, причем одинаковое усилие прижима индентора к поверхности создавалось массой УЗ головки (3,5 кг). В Таблице 2.1 приведены максимальные дифференциальные температурные сигналы ΔT_m и максимальная температура образца в области дефектов в конце стимуляции T_m для различных значений L_0 . Соответствующие графики для всех дефектов приведены на Рисунке 2.7. Наилучшей аппроксимацией полученных зависимостей оказались линейные функции, хотя первоначально ожидался спад сигнала обратно пропорционально квадрату расстояния (этот факт можно объяснить конечными размерами образца и, соответственно, отражением ультразвука от краев образца).

Таблица 2.1- Зависимость максимальных дифференциальных температурных сигналов от расстояния между индентором и дефектами

$L_0, \text{мм}$	50				100				150				200
№ дефекта	1	4	7	10	2	5	8	11	3	6	9	12	13
$T_m, ^\circ\text{C}$	34,8	32,7	30,6	26,5	33,9	31,9	30,6	28,3	29,7	28,4	26,5	26,5	26,3
$\Delta T_m, ^\circ\text{C}$	11,8	8,4	7,8	4,5	9,2	8,4	7,1	4,9	7,0	5,9	5,5	4,4	2,4

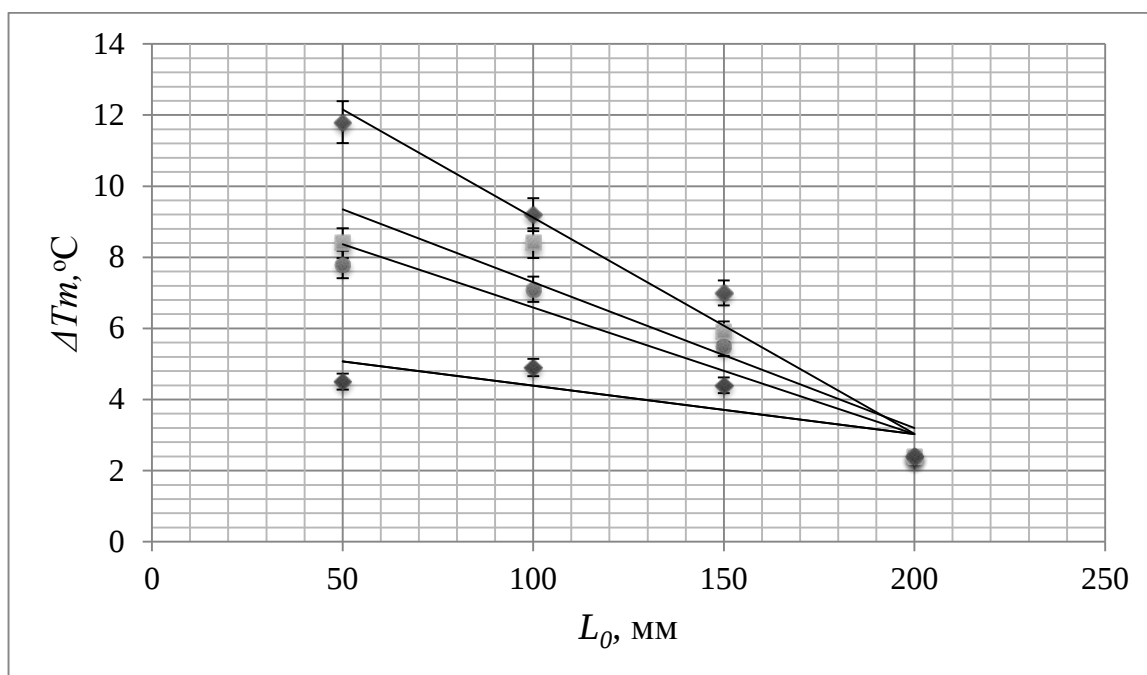


Рисунок 2.7 Зависимость изменения температуры в области дефектов от расстояния между индентором и дефектом (см. Таблицу 2.1)

Было установлено, что величина ΔT_m заметно зависит от ориентации волокон относительно направления преимущественного распространения ультразвука, причем изменения сигнала достигали 20–30%. Например, изменение температуры в зоне дефекта 1, стимулируемого вдоль волокон, составило 4,91 °C, тогда как изменение температуры в области расположенных под углом дефектов 2 и 3 составила 3,85 °C и 3,67 °C соответственно (Рисунок 2.8).

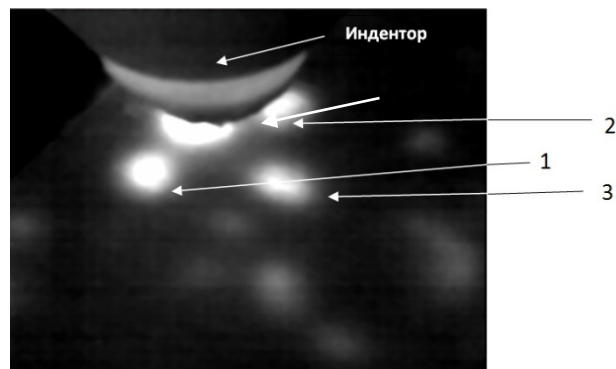


Рисунок 2.8 ИК термограмма ударных повреждений в углерод-углеродном композите

Исследовали выявляемость дефектов при использовании двух типов прокладок между объектом контроля и основанием УЗ установки и постоянном усилии прижима индентора. В качестве первой прокладки был использован лист вспененного полиэтилена толщиной 5 мм, во втором случае были применены две опоры из алюминиевого углового профиля (см. схему на Рисунке 2.9). Результаты сведены в Таблицу 2.2 в сравнении со случаем жесткого основания.

На Рисунке 2.10,*а* показана ИК термограмма объекта исследований при отсутствии прокладки (изделие на жестком основании), а на Рисунке 2.10,*б, в* – для различных расстояний между опорными профилями. Видно, что меньшая площадь опоры приводит к снижению температурных сигналов из-за большей жесткости структуры, но, в целом, наилучшие результаты получены при использовании в качестве подложки вспененного полиэтилена (Рисунок 2.10,*г*).

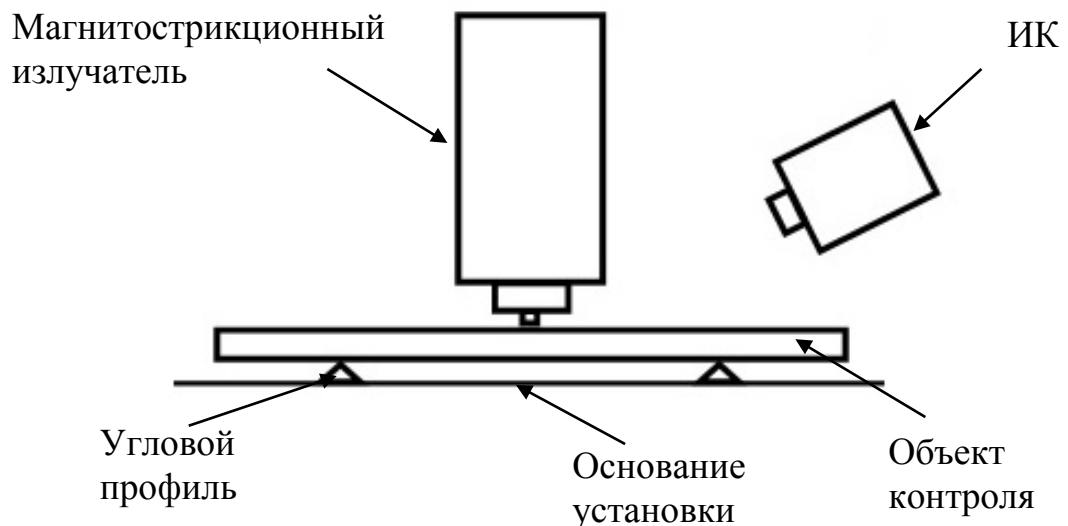


Рисунок 2.9 Схема эксперимента с использованием угловых профилей из алюминия в качестве опоры

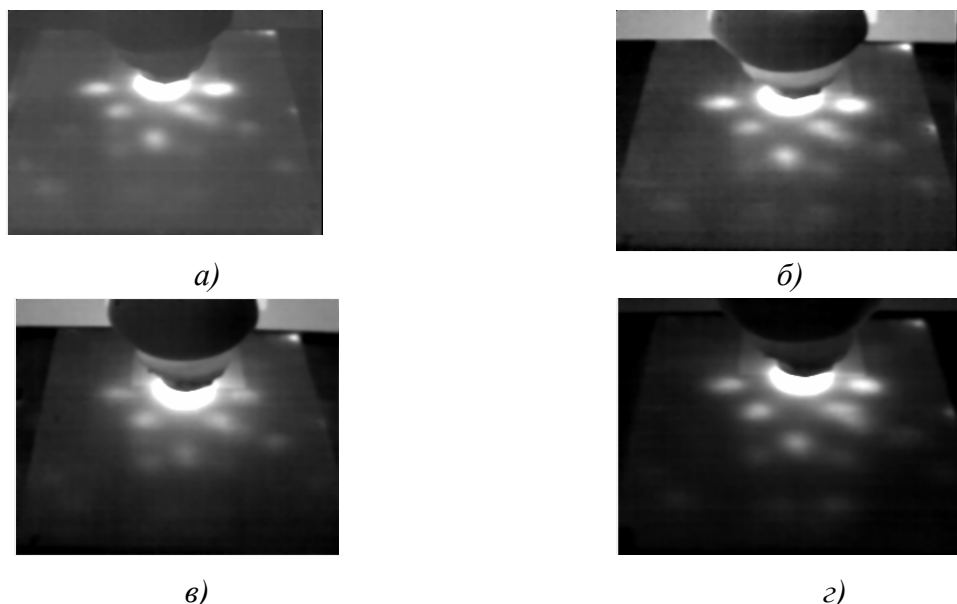


Рисунок 2.10 ИК термограммы образца из углерод-углеродного композита:
а – прокладка отсутствует (жесткое основание); *б* – расстояние между опорными профилями из алюминия 130 мм; *в* – расстояние между опорными профилями из алюминия 280 мм; *г* – прокладка из 5 мм вспененного полиэтилена.

Таблица 2.2 – Влияние типа опоры на дифференциальные температурные сигналы ΔT при УЗ ИК контроле углерод-углеродного композита

Дефект	Без прокладки	Вспененный полиэтилен	Алюминиевые угловые профили на расстоянии 280 мм	Алюминиевые угловые профили на расстоянии 130 мм
	$\Delta T, ^\circ\text{C}$			
1	1,7	3,3	2,9	1,6
4	1,6	3,4	1,4	1,6
9	2	4	1,9	1,5
12	3,4	5,6	3,5	1,8

Метод УЗ ИК термографии доказал свою высокую эффективность при обнаружении низкоэнергетических ударных повреждений в углерод-углеродном композите. При электрической мощности на инденторе до 1,5 кВт, частоте УЗ волн 22 кГц и длительности стимуляции до 5 секунд температурные сигналы в дефектных зонах достигают 4–12 °С на расстояниях до 200 мм.

В указанных экспериментах площадь контролируемой поверхности $S_{\text{нов.}} = \pi R^2 = 3,14 \times 0,04 \text{ м}^2 = 0,126 \text{ м}^2$. Общее время проведения эксперимента, включая процесс установки и закрепления образца на лабораторном макете, время УЗ стимуляции и процесс обработки

данных, составило 2,5 мин. Таким образом, производительность УЗ ИК термографического контроля достигает 3,02 м²/час.

Следует отметить, что амплитуда температурных сигналов максимальна при УЗ стимуляции отдельных волокон композита, проходящих через дефектные зоны (улучшение сигнала может достигать 30%), а также при размещении объекта контроля на эластичной подложке, например, из вспененного полиэтилена.

2.5.1 Спектральная характеристика УЗ ИК контроля

Одним из основных видов преобразователей, широко используемых для задач мощной УЗ ИК термографии, являются пьезоэлектрические преобразователи, применяемые в аппаратуре для УЗ сварки. Пьезоактивные компоненты ПЭП преобразуют электрические колебания в механические и затем передают сигнал пассивным резонансным элементам системы для дальнейшего усиления амплитуды до необходимого уровня и согласования акустической системы генератор - пьезопреобразователь с нагрузкой. В связи с этой особенностью, резонансные пьезопреобразователи имеют узкую полосу рабочих частот с небольшим отклонением от основного значения, поэтому их применение для исследования поведения материала в широком диапазоне частот невозможно [44]. Несмотря на это, геометрия построения резонансного ПЭП позволяет достигать высокого уровня акустической мощности на излучателе при работе на резонансной частоте и её гармониках, благодаря чему обеспечивается необходимый уровень температурного отклика дефекта, достаточный для его идентификации. Таким образом, за счет ввода мощного УЗ излучения в объект исследования, данный метод НК является информативным и экспрессным.

Как было отмечено выше, применение резонансных преобразователей для задач УЗ ИК термографии ограничено их специфической спектральной характеристикой, в связи с чем эффективность теплогенерации в дефектных зонах напрямую зависит от соответствия частоты подаваемого на излучатель акустического сигнала частоте его резонанса. Данный вопрос изучали на примере использования трех резонансных пьезопреобразователей с резонансными частотами 21,5 кГц, 26 кГц и 41 кГц для обнаружения дефектов в виде несквозных отверстий круглой формы в прямоугольных пластинах из алюминия толщиной 2,7 мм, склеенных со слоем измельченного пробкового дерева толщиной 1 мм. Полости круглых отверстий клеем не заполнялись, что способствовало активным вибрациям слоя пробкового дерева в этих зонах в ходе УЗ нагружения. Диаметр круглых отверстий составил 15 мм (D1 и D4), 8мм (D2 и D5) и 5 мм (D3 и D6) (Рисунок 2.11).

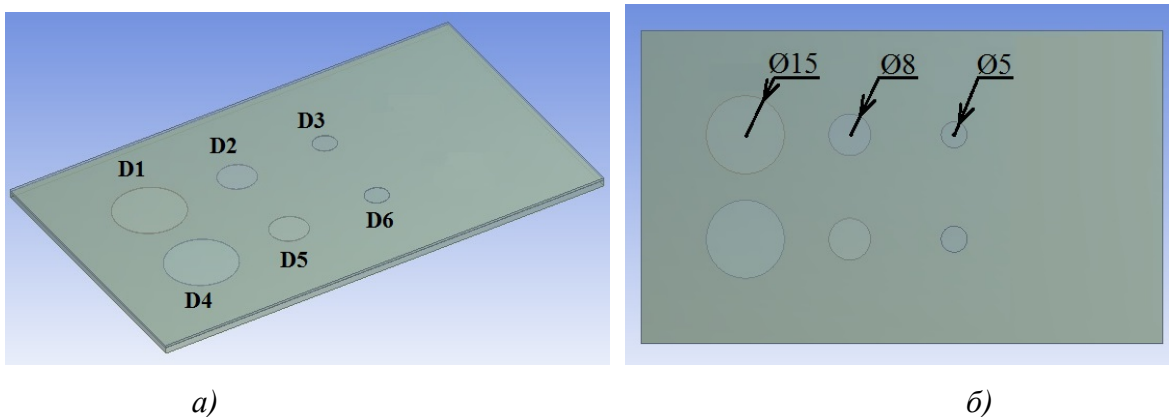


Рисунок 2.11 Конфигурация составного образца из алюминия и пробкового дерева, ослабленного отверстиями с плоским дном

Несмотря на низкие тепло- и звукопроводящие свойства пробкового дерева, точка ввода акустического сигнала была выбрана именно на этой поверхности образца. Получение теплового сигнала в результате УЗ нагружения предполагалось за счет активации локальных вибраций слоя пробкового дерева в области отверстия с плоским дном, а именно, благодаря механизмам растяжения и сжатия материала под действием вибраций.

Для проведения экспериментальных исследований использовали установку УЗ ИК термографии на базе РП, разработанную в Университете Бейхан (бывший Университет авиации), г. Пекин, Китай, (Рисунок 2.12). Данная установка включает в себя генератор акустических колебаний (диапазон частот 15–80 кГц), передающий сигнал на один из трех имеющихся пьезоэлектрических преобразователя (21,5 кГц, 26 кГц и 41 кГц) при номинальной мощности 50 Вт. В ходе акустического нагружения объекта исследования, производили контроль изменения температуры на поверхности материала со стороны пробкового дерева с помощью ИК камеры FLIR A325SC (спектральный диапазон 7,5–13 мкм, разрешение 100 мК, формат термограммы 320×240). Полученный набор ИК изображений обрабатывали на персональном компьютере с помощью оригинального программного обеспечения для цифровой обработки данных, также разработанного в Университете Бейхан (Рисунок 2.12).

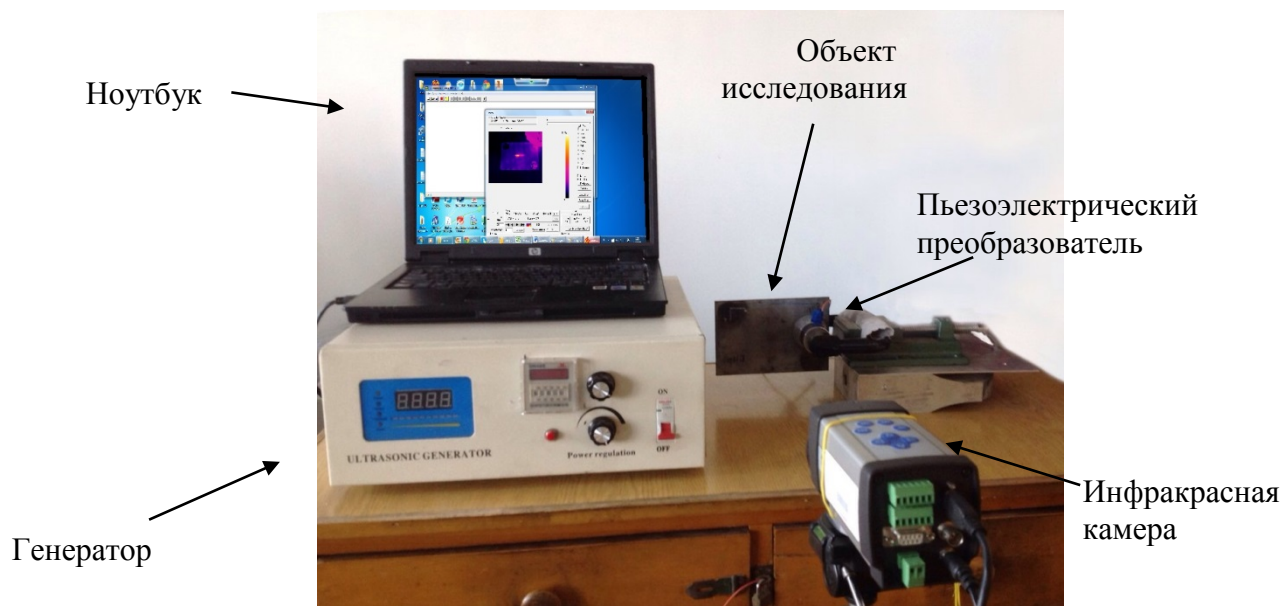


Рисунок 2.12 Экспериментальная установка для проведения УЗ ИК термографии с использованием пьезоэлектрического резонансного преобразователя (Университет Бейхан, Китай)

В результате УЗ нагружения пластины алюминиевого образца с пробковым покрытием в течение 10 секунд акустическим сигналом синусоидальной формы с поочередным использованием трех пьезопреобразователей в их допустимых диапазонах рабочих частот были оценены изменения температурного отклика в области круглых отверстий с плоским дном в зависимости от рабочей частоты излучателя при постоянном уровне электрической мощности сигнала, составившем 50 Вт (Таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Экспериментальные результаты по определению амплитуды УЗ ИК термографического сигнала при испытаниях алюминиевого образца с пробковым покрытием

Большой пьезопреобразователь, резонансная частота 21,5 кГц

$f, \text{кГц}$	17	18	19	20	21	21,5	22	23	23,5	24	25	26
$\Delta T_{D1}, ^\circ\text{C}$	-	-	0,63	0,81	2,14	4,28	4,3	2,48	0,98	1,07	0,77	-
$\Delta T_{D2}, ^\circ\text{C}$	-	-	-	-	2,71	6,32	6,38	2,06	0,47	-	-	-
$\Delta T_{D3}, ^\circ\text{C}$	0,5	0,74	1,2	2,8	2,19	2,64	1,96	0,93	0,37	-	-	-
$\Delta T_{D4}, ^\circ\text{C}$	-	-	0,51	0,79	4,01	8,52	9,06	3,61	1,59	0,65	-	-
$\Delta T_{D5}, ^\circ\text{C}$	-	-	-	-	1,69	3,21	3,47	0,73	-	-	-	-
$\Delta T_{D6}, ^\circ\text{C}$	-	-	0,52	1,25	1,76	2,48	2,21	0,39	-	-	-	-

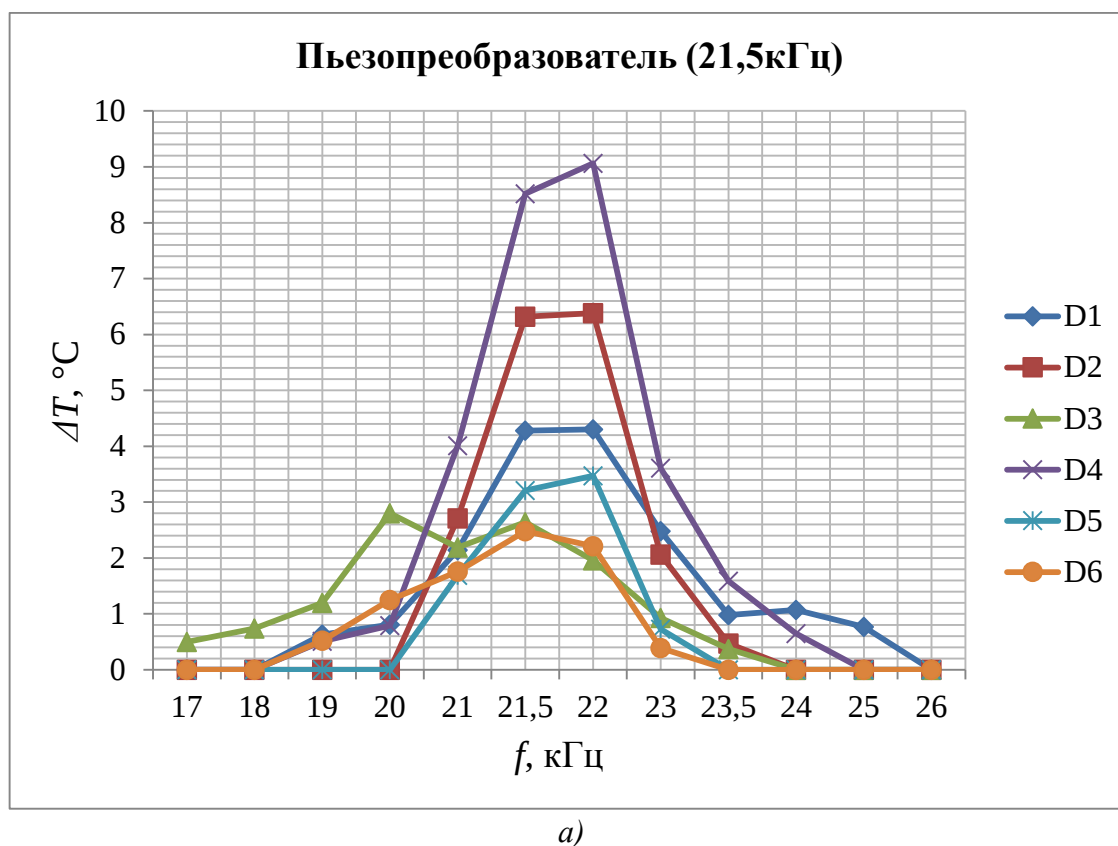
Средний пьезопреобразователь, резонансная частота 26 кГц

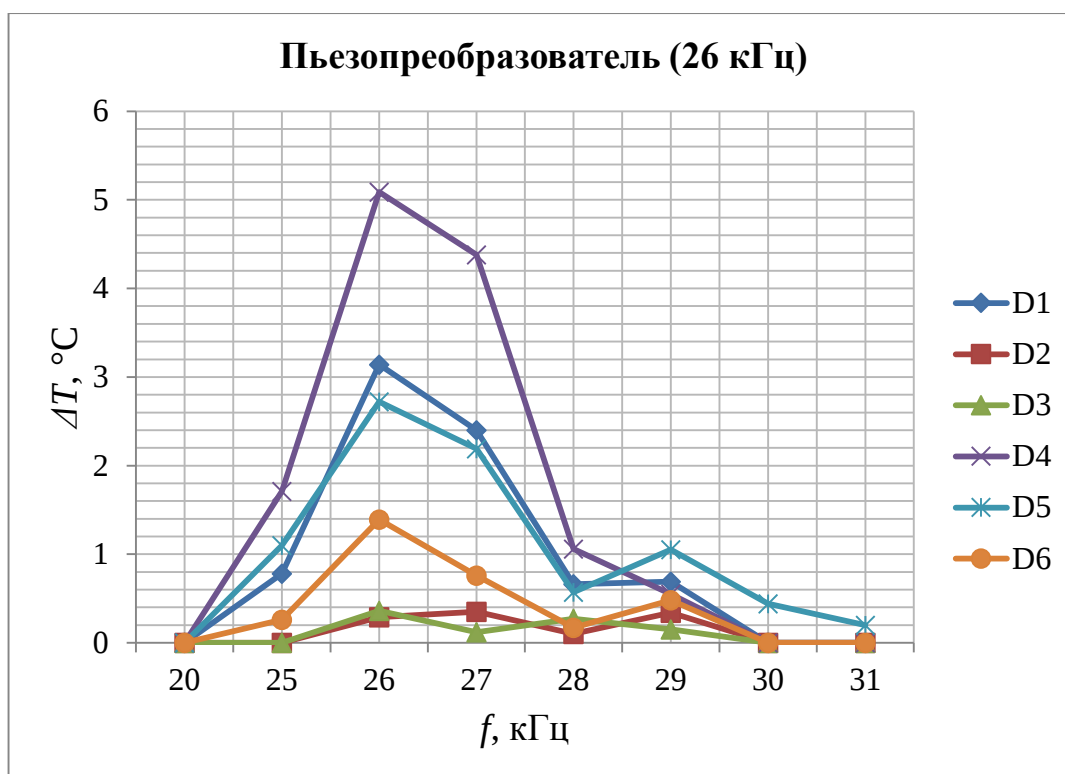
$f, \text{кГц}$	20	25	26	27	28	29	30	31
$\Delta T_{D1}, ^\circ\text{C}$	-	0,78	3,14	2,4	0,66	0,69	-	-
$\Delta T_{D2}, ^\circ\text{C}$	-	-	0,29	0,35	0,1	0,34	-	-
$\Delta T_{D3}, ^\circ\text{C}$	-	-	0,36	0,12	0,27	0,15	-	-
$\Delta T_{D4}, ^\circ\text{C}$	-	1,71	5,09	4,38	1,06	0,55	-	-
$\Delta T_{D5}, ^\circ\text{C}$	-	1,1	2,72	2,19	0,57	1,05	0,44	0,2
$\Delta T_{D6}, ^\circ\text{C}$	-	0,26	1,39	0,76	0,17	0,48	-	-

Малый пьезопреобразователь, резонансная частота 41 кГц

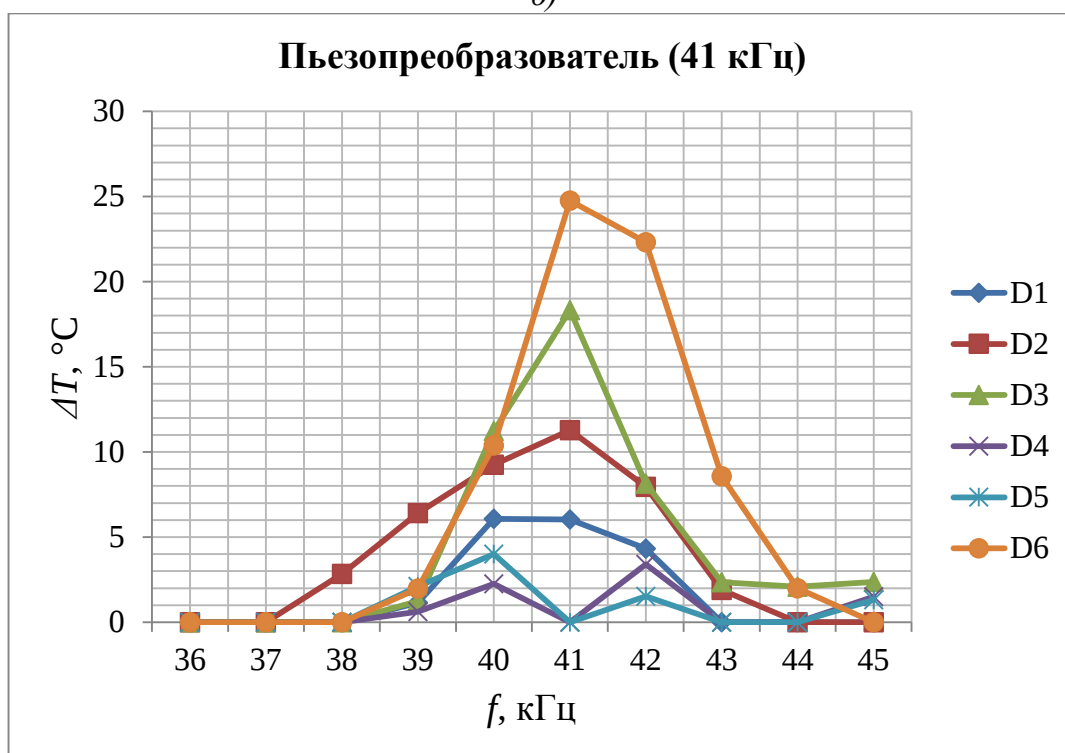
$f, \text{кГц}$	37	38	39	40	41	42	43	44	45
$\Delta T_{D1}, ^\circ\text{C}$	-	-	1,15	6,07	6,03	4,33	-	-	-
$\Delta T_{D2}, ^\circ\text{C}$	-	2,83	6,41	9,24	11,28	7,96	1,9	-	-
$\Delta T_{D3}, ^\circ\text{C}$	-	-	1,24	11,23	18,33	8,14	2,35	2,09	2,37
$\Delta T_{D4}, ^\circ\text{C}$	-	-	0,61	2,25	-	3,4	-	-	1,5
$\Delta T_{D5}, ^\circ\text{C}$	-	-	2,11	4,01	-	1,53	-	-	1,31
$\Delta T_{D6}, ^\circ\text{C}$	-	-	1,97	10,38	24,75	22,32	8,58	1,99	-

На Рисунке 2.13 приведены температурно-частотные спектры сигнала в области несквозных круглых отверстий в алюминиево-пробковом материале в процессе использования малого (в), среднего (б) и большого (а) пьезопреобразователей для УЗ нагружении при изменении частоты подаваемого на них акустического сигнала в допустимом диапазоне их рабочих частот.





б)



в)

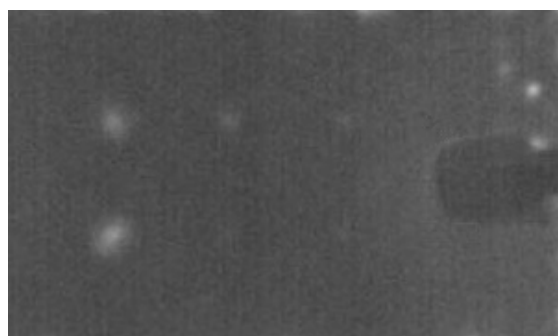
Рисунок 2.13 Температурно-частотные спектры сигнала в области круглых отверстий в пластине из алюминия и пробкового материала при использовании большого (а), среднего (б) и малого (в) пьезопреобразователей для УЗ нагружения

Из вышеприведенных графиков видно, что максимальный температурный сигнал в области круглых отверстий был зафиксирован при работе излучателя на собственной частоте

резонанса с отклонением ± 500 Гц. Также следует отметить, что вводимая в объект исследования частота акустических колебаний оказывает влияние на выявляемость дефектов различного размера. Как видно из результатов эксперимента, круглые отверстия, имеющие бóльший диаметр, лучше себя проявляли на более низкой частоте, а максимальный температурный сигнал в области отверстий меньшего диаметра наблюдался при использовании пьезоизлучателя с более высокой частотой резонанса. В результате этого следует вывод о том, что частота акустического сигнала оказывает значительное влияние на обнаружение дефектов разного размера, поэтому необходимо применять широкополосное возбуждение и исследовать материалы в широком диапазоне частот для повышения точности УЗ ИК контроля качества материалов и изделий. Сравнительные термограммы поверхности исследуемого образца (Рисунок 2.14), полученные при работе пьезоизлучателей на частоте собственного резонанса и вне резонанса, также подтверждают эффективность работы излучателей на резонансной частоте, на которой температурный сигнал в дефектных зонах достигает максимального значения.



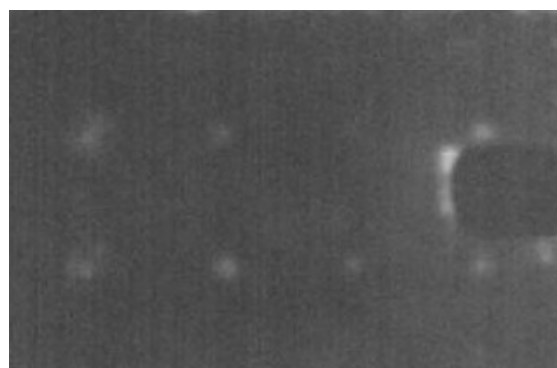
21500 Гц



23500 Гц



26000 Гц



29000 Гц

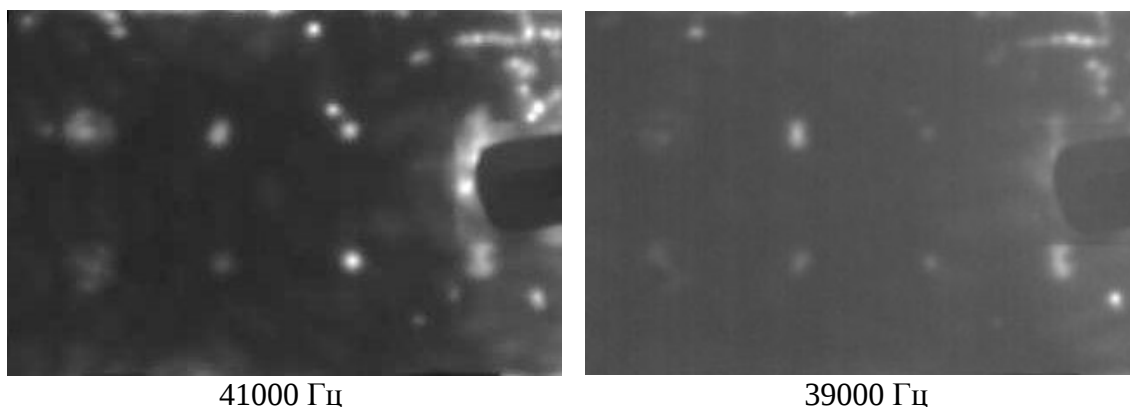


Рисунок 2.14 Термограммы поверхности пластины из алюминия и пробкового материала, полученные при работе пьезоэлектрических излучателей на резонансных частотах (21,5 Гц, 26 кГц, 41 кГц) и на частотах, не соответствующих их собственному резонансу (23,5 Гц, 29 кГц, 39 кГц)

2.6. Модификация компьютерной программы ThermoSource

С физической точки зрения УЗ ИК термография базируется на экспериментальных исследованиях и теоретических решениях термомеханических задач. Моделирование процессов теплогенерации в результате УЗ нагружения объектов позволяет исследовать механизм преобразования части акустической энергии, поступающей от излучателя, в тепловую энергию в структурных неоднородностях, а также определять пороговые параметры их обнаружения путем оценки генерируемой тепловой мощности дефектами разного размера на различных глубинах залегания.

Феноменологически, тонкие расслоения в композитах, подверженные УЗ возбуждению, можно рассматривать в процессе стимуляции в качестве локальных источников тепла. В этом случае, полная мощность, затрачиваемая на тепловыделение в зоне дефекта, зависит от свойств материала и механизмов выделения тепла. Оценка «мощности дефекта», выделяемой в процессе УЗ стимуляции, может быть выполнена путем решения задачи аналитической и численной термомеханической модели, что является предметом данного исследования.

Задача трехмерного моделирования процесса теплопередачи в композитном материале была решена с помощью программного обеспечения ThermoSource, разработанном в Томском политехническом университете. Математическая постановка решаемой задачи описывается следующими выражениями:

$$\frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_i^x \cdot \frac{\partial^2 T_i(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \alpha_i^y \cdot \frac{\partial^2 T_i(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \alpha_i^z \cdot \frac{\partial^2 T_i(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} + \frac{w(x, y, z, \tau)}{C\rho}; \quad (2.1)$$

$$T_i(\tau = 0) = T_{in} \quad (2.2)$$

$$K_1^z \cdot \frac{\partial T_1(x, y, z=0, \tau)}{\partial z} = h_F \cdot [T_1(x, y, z, \tau) - T_{amb}]; \quad (2.3)$$

$$K_3^z \cdot \frac{\partial T_3(x, y, z=L_z, \tau)}{\partial z} = -h_R \cdot [T_3(x, y, z, \tau) - T_{amb}]; \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial x} = 0 \quad \text{для } x=0, y=0 \div L_y; x=L_x, y=0 \div L_y; \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial y} = 0 \quad \text{для } y=0, x=0 \div L_x; y=L_y, x=0 \div L_x;$$

$$T_i(x, y, z, \tau) = T_{i\pm 1}(x, y, z, \tau) \quad \text{и} \quad K_i^{q_j} \cdot \frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial q_j} = K_{i\pm 1}^{q_j} \cdot \frac{\partial T_{i\pm 1}(x, y, z, \tau)}{\partial q_j} \quad (2.6)$$

Здесь T_i – температура в i -й области, отсчитанная от заданной начальной температуры (i – количество слоев и источников тепла, т.е. дефектов); T_{in} – начальная температура изделия; $\alpha_i^{q_j}$, $K_i^{q_j}$ – температуропроводность и теплопроводность в i -ой области по координате q_j ; x, y, z – декартовы координаты; q_j – одна из декартовых координат x, y или z ($j=1 \div 3$); τ – время; $w(x, y, \tau)$ – плотность мощности источников тепловыделения, расположенных в заданных прямоугольных областях (дефектах); C – теплоемкость; ρ – плотность; $Q(x, y, \tau)$ – плотность мощности внешнего потока нагрева; h_F, h_R – коэффициенты теплообмена на передней и задней поверхностях пластины; T_{amb} – температура окружающей среды; L_x, L_y, L_z размеры образца.

Выражение (2.1) представляет собой трехмерное уравнение теплопроводности параболического типа; формула (2.2) описывает начальные условия; выражение (2.3) описывает граничное смешанное условие теплообмена на поверхности (нагрев и охлаждение); выражение (2.4) – граничное условие на задней поверхности (только охлаждение); выражение (2.5) условие адиабатического теплообмена на боковых поверхностях по x и y ; формула (2.6) описывает условия неразрывности тепловых потоков и температур на границах слоев и источников тепла (дефектов).

Трехмерное моделирование производится для материалов и изделий с дефектными включениями в виде воздушных расслоений, размеры и физические параметры которых предварительно заносятся в программу оператором. Также предварительно определяется время процесса теплогенерации и УЗ нагружения. После выполнения циклических вычислений с помощью программного обеспечения определяются значения мощности, затраченной на тепловыделение каждым из заданных слоев дефекта, а также результирующий температурный сигнал для двух сторон материала, генерируемый в зоне дефекта в течение заданного времени.

Поскольку максимальная величина повышения температуры полностью определяется общей мощностью всех источников тепла, их размерами и глубиной расположения, для достижения высокой точности итогового результата, оператором производится подгонка экспериментальных и теоретических значений температурного отклика.

В принципе, вышеописанная задача решалась в диссертационной работе В.С. Хорева (Томский политехнический университет, 2012 г.). Основное отличие использования программы ThermoSource в настоящей работе от более ранних исследований состоит в следующем: 1) для решения дифференциальных уравнений использовали неявную численную схему (ранее применявшаяся явная схема не позволяла проанализировать реальные времена нагрева вследствие весьма малого временного шага расчета); 2) в данной работе рассмотрены дефекты сложной формы, в том числе ударные повреждения в слоистых углепластике.

2.6.1. Результаты моделирования термоакустического отклика дефектов в композиционных материалах (на примере углепластика)

В ходе проведения НК углепластикового композитного материала с помощью мощной УЗ установки на основе магнитострикционного излучателя исследовали эффективность выявления ударного повреждения в центре изделия. Для определения мощности, затрачиваемой на тепловыделение в зоне дефекта в процессе УЗ стимуляции, с помощью программного обеспечения ThermoSource моделировали изделие из углепластика, по своим размерам и физическим характеристикам максимально соответствующее экспериментальному образцу. Область дефекта композитного материала была представлена в виде набора расслоений заполненных воздухом, которые выступали в качестве источников тепла. В результате трехмерного моделирования, была оценена энергия, затрачиваемая на тепловыделение в процессе УЗ возбуждения во всей зоне повреждения материала и каждого отдельного сегмента дефекта, а затем проведено сравнение полученных в ходе моделирования результатов с экспериментальными величинами температурных сигналов.

Экспериментальные данные были получены на $100 \times 150 \times 4$ мм³ углепластикового композита с ударным повреждением энергией 16 Дж в центре пластины. Размер дефекта, измеренный при визуальном анализе и при анализе термограмм передней части образца, подверженной ударному повреждению, составил около 4×4 мм² (Рисунок 2.15,а). Зона дефекта задней поверхности пластины имеет форму двух близкорасположенных расширенных поврежденных областей, известных в научной литературе как «бабочка». Размер области дефекта, расположенной вблизи задней поверхности образца, составил около 48×16 мм² (Рисунок 2.15,б). На основе этих данных было предложено моделировать ударные

повреждения в углепластиковом композите в декартовых координатах в форме пирамиды, сечения которой представляют собой отдельные расслоения, генерирующие тепловую энергию под воздействием УЗ излучения. Следует отметить, что пьезоэлектрический преобразователь, изображенный на Рисунке 2.15,а не был использован в ходе измерений.

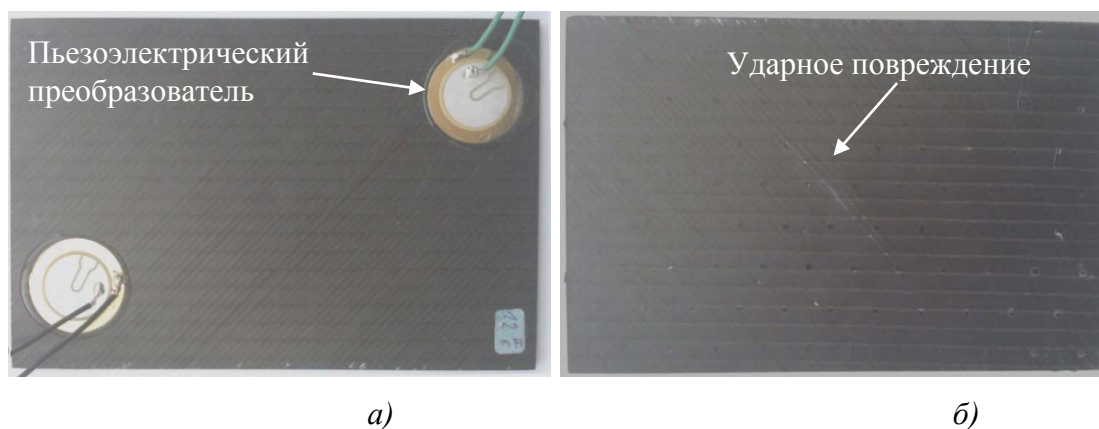


Рисунок 2.15 Фотография передней (а) и задней (б) поверхностей образца из углепластика с ударным повреждением энергией 16 Дж

Образец подвергали УЗ стимуляции с помощью мощной магнитострикционной УЗ установки, описанной в разделе 2.3.2 и в работе [5] (электрическая мощность до 1,5 кВт, частота 22 кГц, время стимуляции 5...10 с). Измерения проводили на обеих поверхностях образца, регистрируя последовательности ИК термограмм с помощью тепловизора NEC TH-9100 (Рисунок 2.16). Максимальная величина изменения температуры в области дефекта относительно температуры окружающей среды, полученное в ходе УЗ стимуляции в течение 10 секунд, составило 1,04°C на передней поверхности и 1,65°C – на задней. Стоит отметить, что на задней поверхности образца дефект имеет две составляющие в своей структуре, поэтому для слоев, близко расположенных к задней поверхности образца, необходимо задавать параметры повреждения с двумя независимыми источниками тепла (Рисунок 2.16).

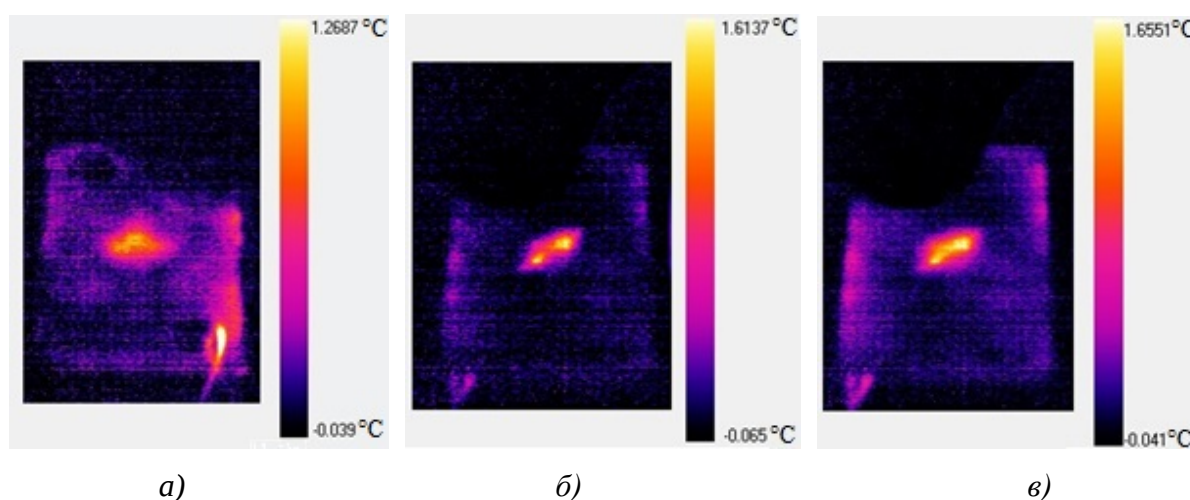


Рисунок 2.16 Термограммы передней (а) и задней (б, в) поверхностей образца при УЗ стимуляции в течение 10 с (а, в) и 5 с (б)

При моделировании процесса теплогенерации ударное повреждение в центре образца рассматривали как пирамидальный дефект, который состоит из девяти активных внутренних источников тепла, представляющих собой воздушные слои в форме параллелепипеда толщиной 0,4 мм каждый. Расстояние между слоями составило 0,2 мм, что соответствует одному слою композита. Два поверхностных слоя на задней стороне пластины состоят из двух секций, как показано на Рисунке 2.17. Параметры моделирования максимально соответствовали экспериментальным (толщина образца 4 мм, теплопроводность 0,8 Вт/(м·К), теплоемкость 760 Дж/(кг·К) и плотность 1560 кг/м³) [28, 29].

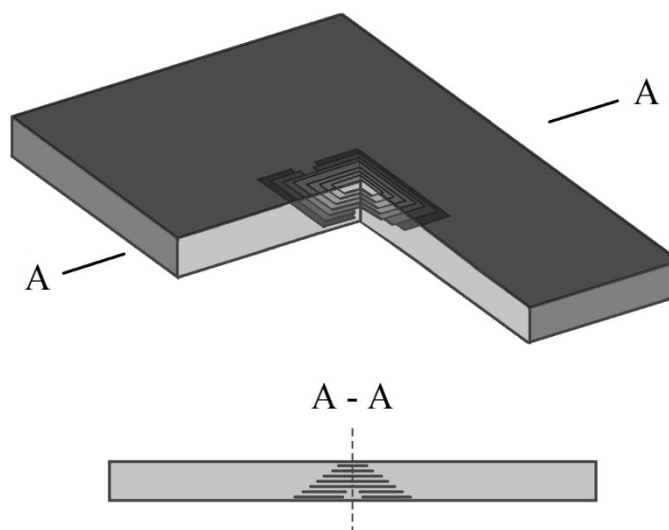


Рисунок 2.17 Моделирование ударного повреждения углепластикового композита в декартовых координатах в виде составного дефекта пирамидальной формы

С помощью программного анализа экспериментальных термограмм были получены графики изменения температуры во времени на всей поверхности исследуемого образца. Далее было выполнено моделирование температурно-временного распределения сигнала на поверхности углепластика путем суммирования температурного отклика отдельных слоев дефекта таким образом, чтобы полученные зависимости максимально соответствовали значениям экспериментально (использован известный в теории теплопередачи принцип линейной суперпозиции источников тепла). Задача трехмерного моделирования процесса теплопередачи в композитном материале была решена с помощью программного обеспечения ThermoSource, принцип работы которого описан в разделе 2.6.

При выполнении циклических вычислений, значения мощности, затраченной на тепловыделение каждым из 9 слоев дефекта, были оптимизированы таким образом, чтобы функция температурного сигнала, полученная при исследовании двух сторон пластины

программным путем, наилучшим образом (используя минимизацию среднеквадратичных отклонений) соответствовала значениям, полученным экспериментально.

Поскольку максимальная величина температурного сигнала полностью определяется общей мощностью всех источников тепла и может быть легко определена путем сравнения экспериментальных и теоретических значений, основная проблема решения состояла в сопоставлении между собой форм графиков температурного отклика, которые зависят от глубины расположения источника тепла. На Рисунке 2.18 представлены соответствующие аппроксимированные значения температурных сигналов.

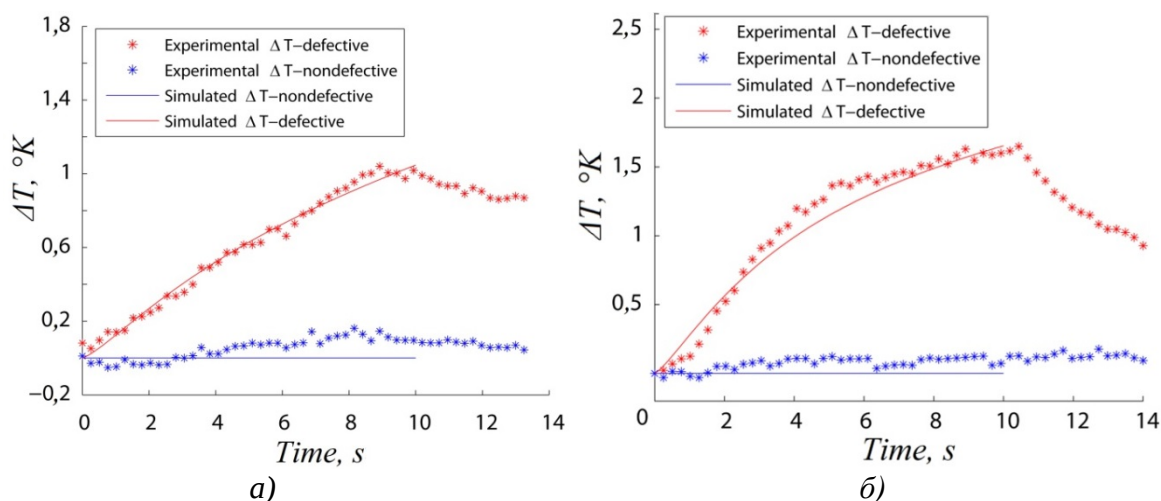


Рисунок 2.18 Аппроксимация экспериментальных кривых изменения температуры в зоне дефекта на передней (а) и задней (б) поверхностях углепластика с использованием модели, показанной на Рисунке 3 (время УЗ стимуляции 10 с)

Таблица 2.4 содержит объемы каждого сегмента дефекта (V), их глубины залегания (l), а также рассчитанные программным путем значения мощности, затраченной на тепловыделение (Q); комбинация указанных значений представляет собой «наилучшее» приближение теоретических и экспериментальных данных (Рисунке 2.18). Таким образом, в соответствии с оценками, полученными ранее, величина суммарной мощности сегментов дефекта, затраченной на тепловыделение, составила 152,9 мВт.

Таблица 2.4 – Параметры теплогенерации в зоне ударного повреждения углепластика с помощью программы ThermoSource (УЗ стимуляция в течение 10 секунд)

Дефект	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V, \times 10^{-9} \text{ м}^3$	6,4	24	42	64	120	104,4	111,4	133,5	119,8
$l, \text{ мм}$	0,1	0,6	1,1	1,6	2,1	2,7	2,7	3,3	3,3
$Q, \text{ мВт}$	2,75	8,88	12,6	17,28	26,4	20,88	22,28	22,03	19,8

На Рисунке 2.19 изображены графики изменения температуры при последовательном включении сегментов дефекта в процесс генерации тепла, начиная от слоев, расположенных вблизи контролируемой поверхности образца. Как видно из графиков, наиболее существенный вклад в процесс генерации тепла вносят три слоя, наиболее близко расположенные к той поверхности пластины, на которой регистрируют температуру.

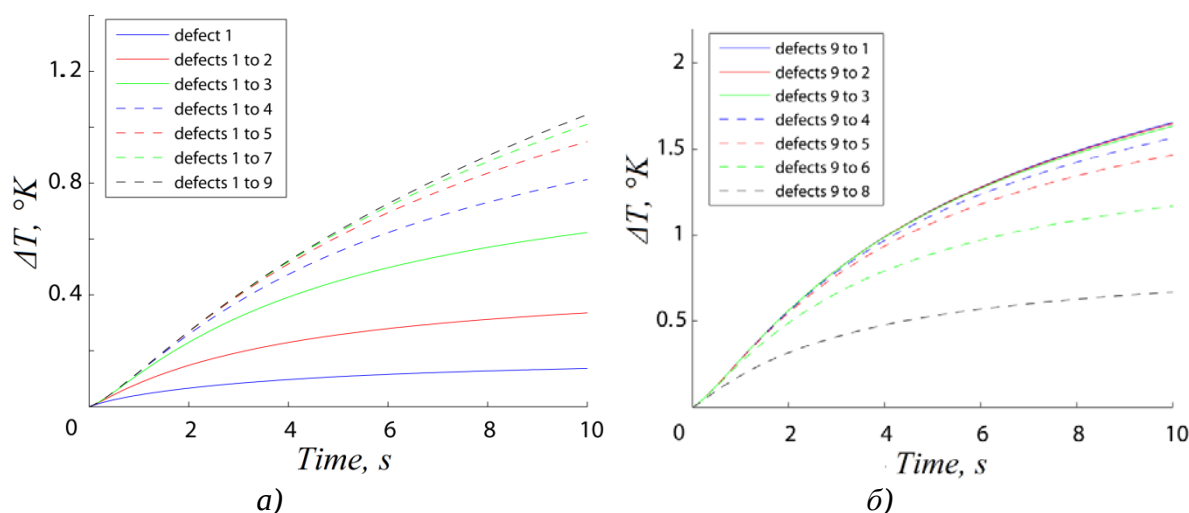


Рисунок 2.19 Температурные отклики, полученные путем последовательного включения подповерхностных слоев дефекта в процесс генерации тепла на передней (а) и задней (б) поверхностях образца из углепластика (время УЗ стимуляции 10 секунд)

Таким образом, предложена методика оценки эквивалентной тепловой мощности, генерируемой составными подповерхностными дефектами в процессе УЗ стимуляции. Путем оптимизации соответствующих величин мощности теплогенерации было установлено, что экспериментальные значения локального повышения температуры в области исследованного дефекта, составившие соответственно 1,04 $^{\circ}\text{C}$ и 1,65 $^{\circ}\text{C}$ для передней и задней поверхностей образца, эквивалентны 152,9 мВт выделившейся в этой зоне тепловой мощности. Таким образом, «мощность» дефекта ударного повреждения энергией 16 Дж при мощной УЗ стимуляции (электрическая мощность до 1,5 кВт, частота 22 кГц) в течение 10 секунд составила 152,9 мВт, что близко к ранее полученным оценкам. Также установлено, что основной вклад в повышение температуры обусловлен дефектами, расположенными на глубинах до 1,5 мм, если отсчет ведется от контролируемой поверхности.

Предложенный подход к оценке мощности, затрачиваемой на генерацию тепла в области дефекта в процессе УЗ стимуляции является полезным для анализа энергетического вклада различных дефектов.

2.6.2 Параметры дефектов (моделирование)

Исследование зависимости температурного отклика дефектов от их размеров и глубины залегания является одной из важных задач оценки степени повреждения материала. Благодаря использованию численного моделирования возможно произвести оценку температурных распределений на поверхности материала и расчет мощности тепловыделения в области дефектов в процессе УЗ нагружения материала.

В настоящем разделе приводятся результаты трехмерного моделирования температурного отклика тонких расслоений на примере пластины из композиционного материала размером $320 \times 360 \times 6$ мм³ в процессе мощного УЗ нагружения в течение 10 секунд. С помощью программы ThermoSource ударное повреждение в указанном изделии было смоделировано набором воздушных расслоений, являющихся источниками тепла. Расслоения имеют вид прямоугольных параллелепипедов толщиной 300 мкм и площадью оснований 1600 мм², 900 мм², 400 мм², 225 мм², 100 мм², 25 мм². Дефекты располагаются на глубине от 1 до 5 мм от контролируемой поверхности (Рисунок 2.20).

Теплофизические характеристики материала максимально соответствовали реальным значениям, приведенным в литературе [45, 46] (толщина образца 6 мм, теплопроводность 0,61 Вт/(м·К), теплоемкость 1500 Дж/(кг·К) и плотность 1560 кг/м³). Удельная мощность тепловыделения в дефектах составляла 100 000 Вт/м³. Толщины каждого расслоения и величины удельной тепловой мощности дефектов соответствовали среднему значению параметров, полученных в результате моделирования ударного повреждения в пластине углепластикового композита с энергией 14 Дж, описанного в разделе 2.7. Поэтому данные величины были выбраны в качестве типовых при моделировании дефектов в виде параллелепипедов.

В результате расчета были получены величины максимальных температурных сигналов в области расслоений на контролируемой поверхности углепластикового композита, приведенные в Таблице 2.5. Амплитуда температурного отклика дефектов одинакового размера обозначена как $\Delta T_{\partial 1} - \Delta T_{\partial 6}$ и приведена для различных значений глубины залегания расслоений (l) в диапазоне от 1 до 5 мм, ведя отсчет от контролируемой поверхности.

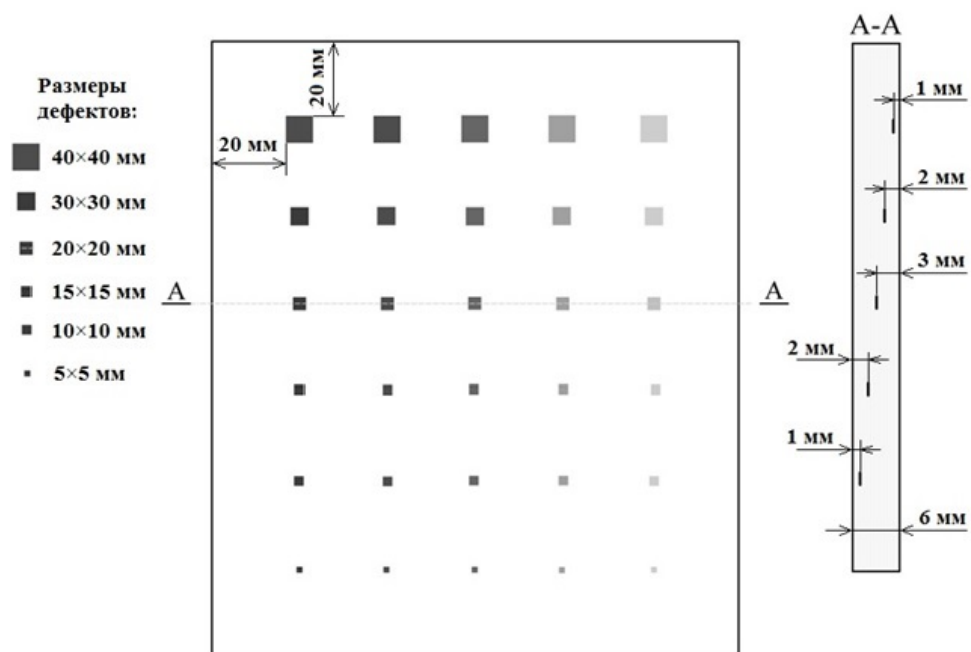


Рисунок 2.20 Схема расположения дефектов для моделирования

Таблица 2.5. – Амплитуды температурного отклика расслоений на поверхности исследуемой пластины углепластика (результаты моделирования)

ΔT $l, \text{мм}$	$\Delta T_{\partial 1}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\partial 2}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\partial 3}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\partial 4}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\partial 5}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\partial 6}, ^\circ\text{C}$
1	0,535	0,527	0,519	0,227	0,109	0,026
2	0,233	0,229	0,225	0,105	0,025	0,025
3	0,098	0,097	0,094	0,094	0,021	0,005
4	0,036	0,036	0,035	0,016	0,008	0,004
5	0,012	0,012	0,012	0,012	0,003	0,0006

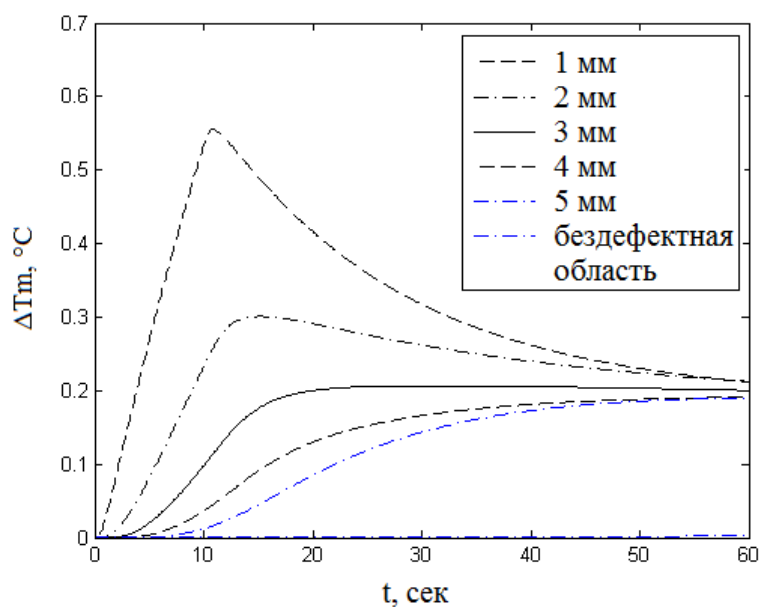


Рисунок 2.21 Изменение температурного сигнала в зависимости от глубины залегания дефекта 1

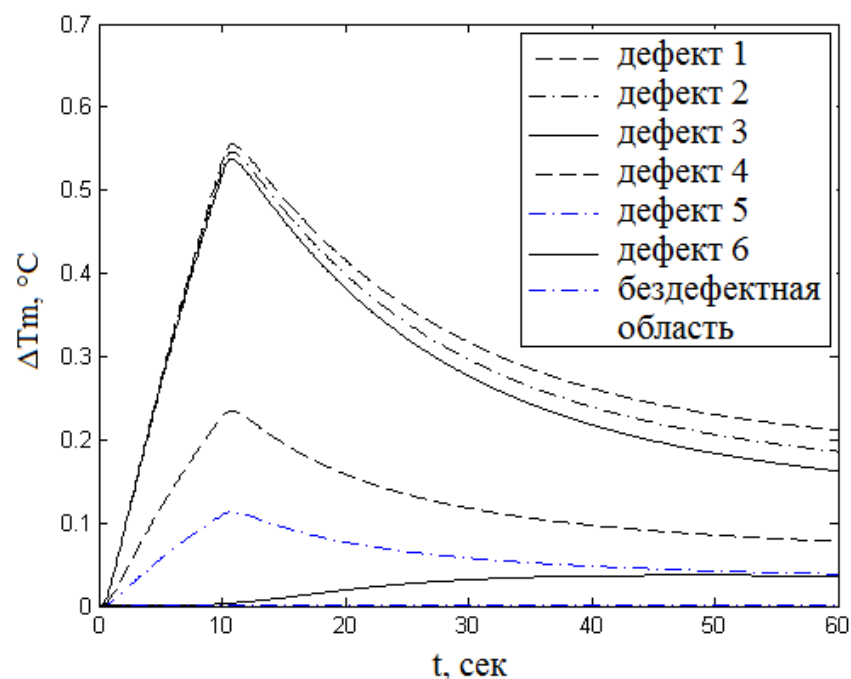


Рисунок 2.22 Изменение температурного сигнала в зависимости от размеров дефекта при глубине залегания дефекта 1мм

Как видно из графиков, построенных по результатам моделирования, амплитуда температурного сигнала в области расслоений увеличивается с уменьшением глубины их залегания относительно контролируемой поверхности (Рисунок 2.21) и увеличением размеров дефектов (Рисунок 2.22).

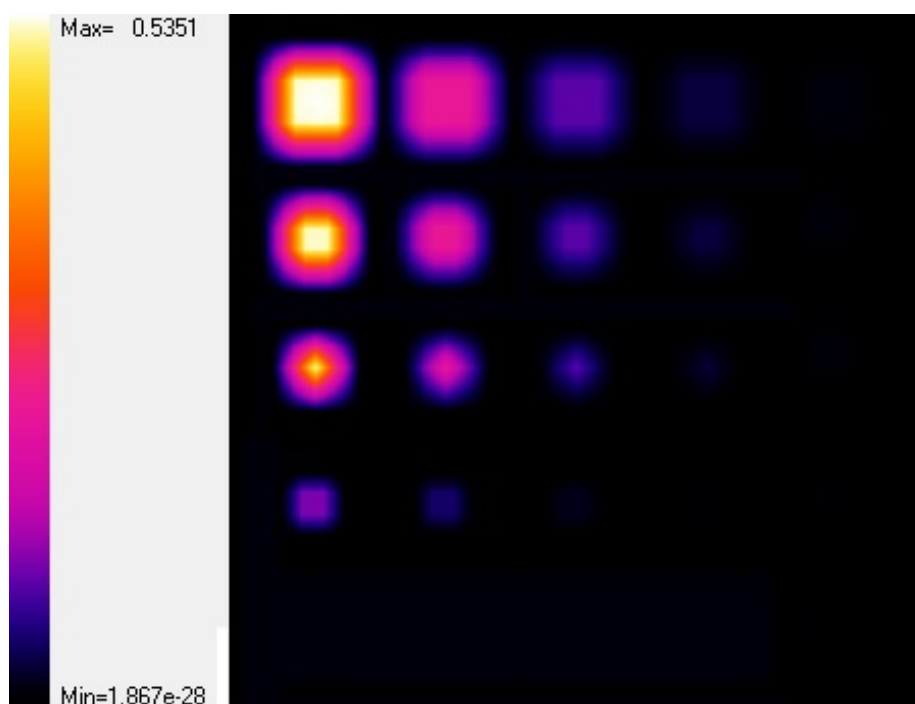


Рисунок 2.23 Термограмма пластины углепластикового композита, полученная в результате моделирования УЗ нагружения в течение 10 секунд

2.7. Преобразование акустической энергии в тепловую энергию

Эффективность проведения контроля качества материалов и изделий методом мощной УЗ ИК термографии зависит от электрической мощности системы, её электро-акустического коэффициента полезного действия (КПД) и эффективности преобразования акустической энергии в тепловую.

Анализ преобразования электрической мощности магнитострикционного преобразователя в акустическую проводили путем определения усредненной мощности, которая переносится акустической волной через поперечную площадку (S), расположенную перпендикулярно направлению её распространения (в области дефекта).

Из литературы [47] известно, что при распространении акустической волны в среде её частицы совершают колебательные движения, смещаясь относительно положения покоя. При этом зависимость смещения частицы (x) от времени (t) происходит соответственно закону:

$$x = A \times \sin 2\pi ft, \quad (2.7)$$

где A – максимальное смещение частиц среды, f – частота колебаний.

Максимальная амплитуда колебательной скорости указывает, с какой скоростью движутся колеблющиеся частицы. Выражение для определения колебательной скорости можно получить путем дифференцировании уравнения смещения частицы (2.7) по времени t :

$$v = \frac{dx}{dt} = 2\pi f A \cos 2\pi ft, \quad (2.8)$$

если $A = \text{const}$.

Из уравнения (2.8) видно, что максимальная скорость движения частицы увеличивается с ростом частоты колебаний. Амплитуда колебательной скорости (v_0) будет зависеть и от амплитуды смещения:

$$v_0 = 2\pi f A = \omega A \quad (2.9)$$

Физическая величина, которая определяет количество энергии, переносимое звуковой волной через перпендикулярную поперечную площадку, расположенную, называется силой звука и определяется как:

$$I = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \frac{dP}{dS} dt, \quad (2.10)$$

где T – время усреднения, dP – поток звуковой энергии, переносимый через площадку dS .

Мгновенное значение интенсивности звука представляет собой отношение мгновенного значения потока звуковой энергии к площади единичной площадки, расположенной перпендикулярно распространению звука:

$$I = \frac{dP(t)}{dS} \quad (2.11)$$

В свою очередь, поток звуковой энергии представляет собой разность между мгновенным и статическим давлением данной точки среды при прохождении через нее акустической волны. Амплитуда переменного акустического давления определяется как:

$$P = 2\pi f \rho c A = v_0 \times \rho c, \quad (2.12)$$

где ρ – плотность среды, c – скорость распространения звука в среде.

Для плоской синусоидальной бегущей волны мгновенное значение интенсивности звука определяется выражением [49]:

$$I = \frac{P \times v_0}{2} = \frac{P_0^2}{2\rho c} = \frac{v^2 \times \rho c}{2} \quad (2.13)$$

Таким образом, величина акустической мощности ($P_{\text{ак}}$) переносимой звуковой волной через перпендикулярную поперечную площадку (S) определяется выражением:

$$P_{\text{ак}} = \frac{v^2 \times \rho c}{2} \times S \quad (2.14)$$

Определение акустической мощности проводили путем анализа вибраций на поверхности исследуемого материала с помощью аппаратуры сканирующей лазерной виброметрии в ходе УЗ нагружения пластины углепластика. Схема лабораторной установки приведена на Рисунке 2.24 и включает в себя УЗ установку для непрерывной стимуляции на базе УЗ генератора УЗГТ-02/22 (1) и магнитострикционного преобразователя (2), принцип работы которого описан в разделе 2.3.1, сканирующий лазерный виброметр PSV-400-3D и одноканальный лазерный виброметр OFV-50x фирмы «Polytec» (Германия) с двумя блоками управления работы лазеров.

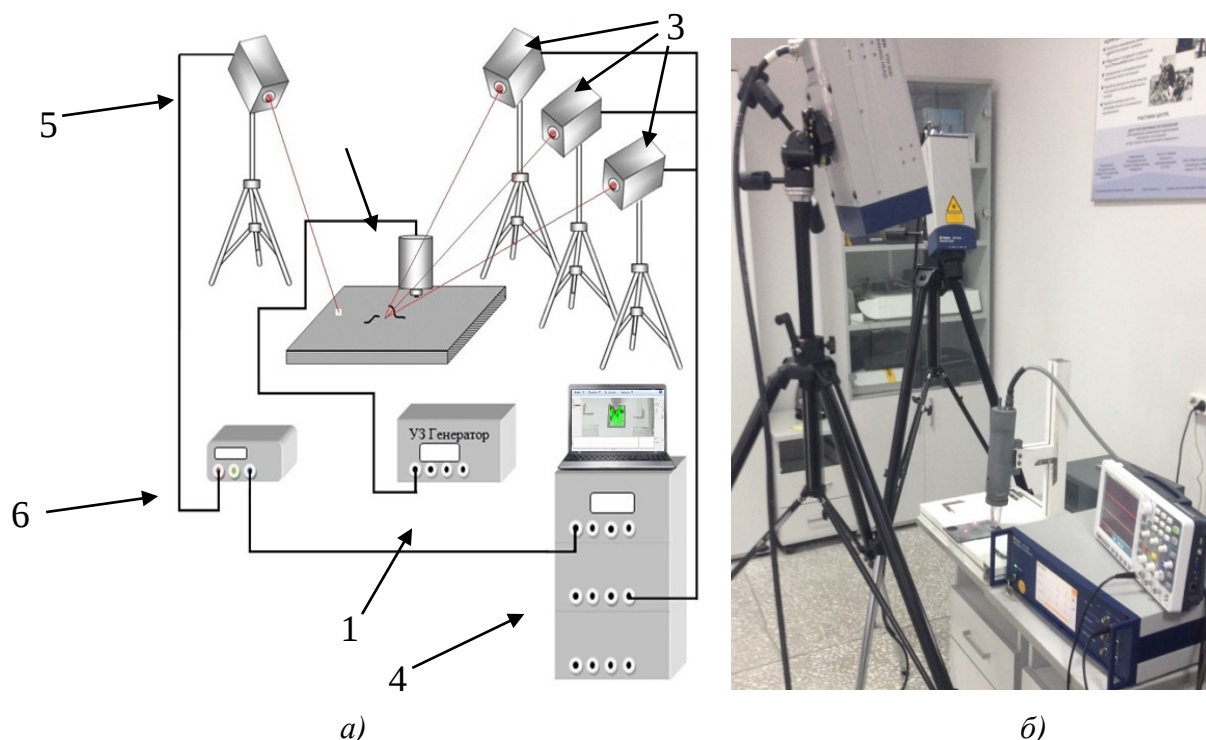


Рисунок 2.24 Схема (а) и фотография (б) лабораторной установки для анализа преобразования электрической мощности магнитостриктора в акустическую мощность

В ходе УЗ нагружения одноканальным лазером OFV-50x (5) на поверхности углепластика регистрировался опорный сигнал, относительно которого сканирующий лазерный вибромметр PSV-400-3D (3) производил сканирование вибраций на всей поверхности материала. Работа одноканального вибромметра (1) и сканирующего лазерного вибромметра (3) регулировалась оператором с использованием блоков управления лазерами (6) и (4) соответственно.

Как было отмечено выше, исследовали углепластиковый композит размером $100 \times 150 \times 3$ мм³, содержащий ударное повреждение энергией 14 Дж. В точке удара визуально отмечено поверхностное повреждение структуры углепластика размером около 5 мм (Рисунок 2.25,а). На противоположной поверхности пластины повреждение наблюдалось в виде двух вытянутых зон размером 37×6 мм² (форма «бабочки», Рисунок 2.25,б).

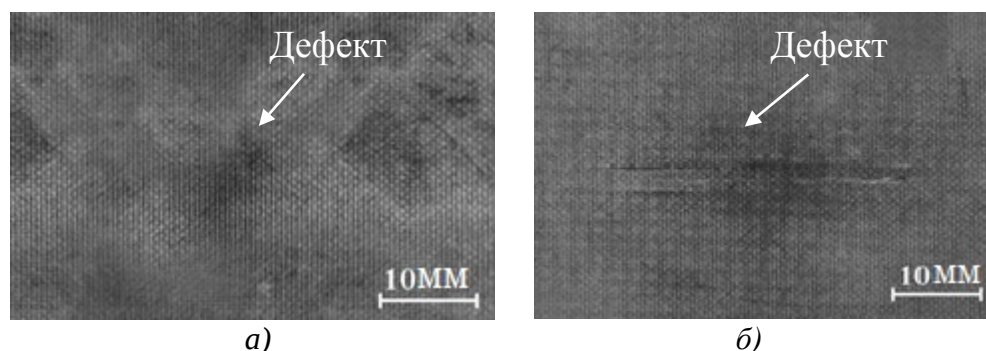


Рисунок 2.25 Фотографии ударного повреждения на передней (а) и задней (б) поверхностях изделия из углепластика

В результате лазерного сканирования были измерены амплитуды вибраций на поверхности углепластика при различном уровне электрической мощности, подаваемой на магнитострикционный преобразователь. Результаты измерений приведены в Таблице 2.6. Принято, что плотность углепластикового композита [46] составляет 1560 кг/м^3 ; площадь поперечного сечения пластины углепластика, расположенного перпендикулярно распространению акустической волны, равно $S = 100 \text{ мм} \times 3 \text{ мм} = 3 \times 10^{-4} \text{ м}^2$.

Скорость распространения звука в углепластике была определена путем сканирования вибраций на поверхности пластины с помощью аппаратуры сканирующей лазерной виброметрии в процессе акустического нагружения образца.

В ходе эксперимента на вход пьезоэлектрического преобразователя ДН-3 (Россия), плотно прижатого к пластине углепластика, с внутреннего генератора лазера через усилитель подавали электрический сигнал в виде меандра с частотой 120 Гц при напряжении 48 В. Амплитуду вибраций на поверхности композиционного материала регистрировали с помощью сканирующего лазерного виброметра в режиме сканирования «time», позволяющего осуществлять пространственно-временную обработку вибросигналов (Рисунок 2.26). Шаг сканирования равнялся 4 мкс.

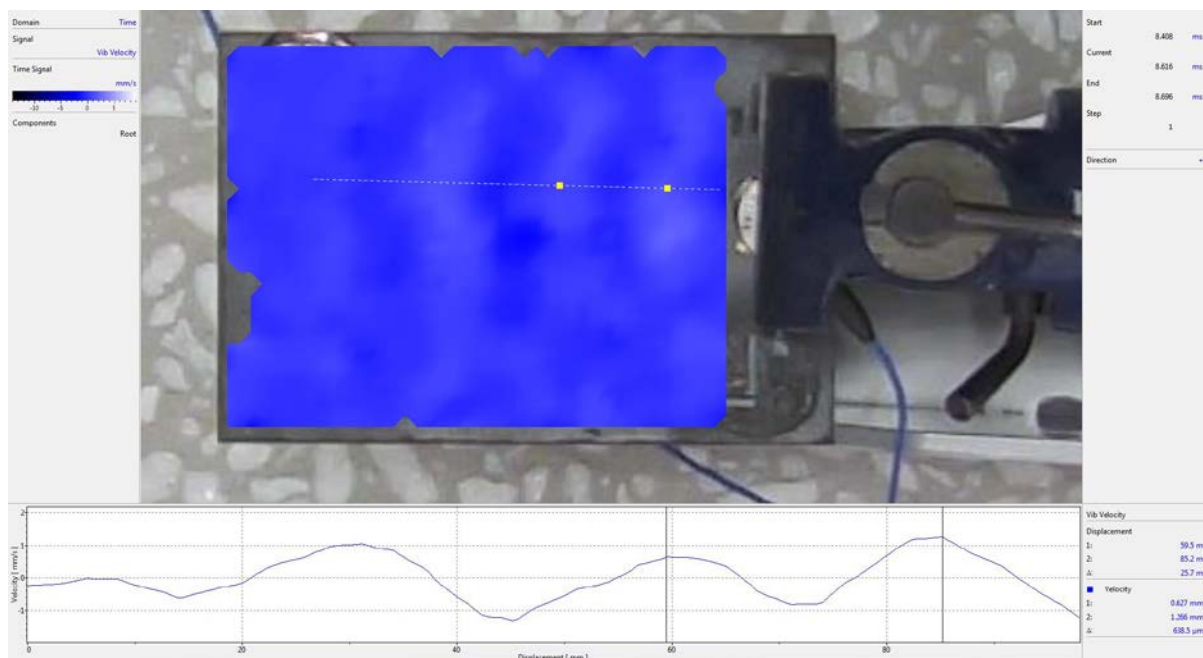


Рисунок 2.26 Измерение скорости распространения звука в углепластике

Длина бегущей акустической волны в ходе проведения эксперимента была определена как расстояние, на которое распространяется волна за время, равное одному периоду колебаний частиц среды. В результате лазерного сканирования пластины определено, что

длина УЗ волны составила 26,4 мм. Также была измерена частота повторения колебаний путем регистрации времени распространения гребня волны на расстояние, равное длине волны. Соответствующая величина составила 31250 Гц.

Воспользуемся выражением для расчета скорости распространения звука в среде, приведенным в [48], для оценки скорости распространения звука в исследуемой пластине углепластикового композита:

$$C = \lambda \times f, \quad (2.15)$$

где λ – длина волны, f – частота повторения колебаний.

Подставив значения длины волны и частоты колебаний, полученные в результате лазерного сканирования, в выражение (2.15), можно определить скорость распространения звука в углепластике:

Используя выражение (2.14), рассчитаем акустическую мощность излучения магнитостриктора ($P_{ак}$), которая переносится звуковой волной через поперечное сечение пластины углепластикового композита (S), расположенного перпендикулярно направлению распространения волны (в области дефекта) на расстоянии 50 мм от точки ввода ультразвука при 200 Вт электрической мощности на катушке магнитостриктора:

$$P_{ак} = \frac{(187,4 \text{ мм/с})^2 \times 1560 \text{ кг/м}^3 \times 825 \text{ м/с}}{2} \times 3 \times 10^{-4} \text{ м}^2 = 6,78 \text{ Вт}$$

Произведем расчет удельной акустической мощности излучения магнитостриктора ($P_{ак}$), которая приходится на единицу площади (S) поверхности сечения, находящегося в поперечном направлении распространения звуковой на расстоянии 50мм от индентора, при 200 Вт электрической мощности на катушке магнитостриктора:

$$\frac{P_{ак}}{S} = \frac{6.78 \text{ Вт}}{3 \times 10^{-4} \text{ м}^2} = 2,26 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$$

По аналогичной схеме был произведен расчет удельной акустической мощности при изменении электрической мощности на катушке магнитостриктора от 60 до 200 Вт. Результаты вычислений приведены в Таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Экспериментальные результаты измерения виброскорости колебаний частиц среды на поверхности образца из углепластика и данные расчета удельной акустической мощности магнитостриктора

Р_{эл}, Вт	60	70	80	90	100	140	170	200	300
v_0, мм/с	96,85	115,8	122,1	129,4	142	155	165,4	168	187,4
$\frac{P_{ак}}{S}$, $\frac{Вт}{см^2}$	0,6	0,86	0,96	1,08	1,3	1,55	1,76	1,82	2,26

Дальнейшее исследование процесса преобразования акустической энергии в тепловую в области дефекта было выполнено, анализируя процесс теплогенерации в углепластиковом композите в процессе УЗ нагружения с помощью компьютерного моделирования процесса теплогенерации и оценки выделяемой энергии в области дефекта (программное обеспечение ThermoSource). Применяя метод УЗ ИК термографии, были получены температурные распределения в углепластиковом композиционном материале. Для проведения практических исследований была использована аппаратура мощной УЗ ИК термографии на основе комплекса УЗ финишной обработки металлов на базе УЗ генератора УЗГТ-02/22, см раздел 2.3.1.

Таблица 2.7 – Амплитуды температурных сигналов в области ударного повреждения углепластикового композита при изменении электрической мощности магнитострикционного излучателя

Р_{эл}, Вт	60	70	80	90	100	140	170	200	300
ΔT_{front}, °C	1,81	1,95	2,1	2,31	1,8	2,15	2	2,13	2,11
ΔT_{back}, °C	11,43	13,05	15,35	17,53	22,76	26,92	32,23	38,95	44,82

Образец подвергали УЗ стимуляции в течение 10 секунд при различном уровне электрической мощности на катушке магнитострикционного преобразователя. Измерение температуры на поверхности изделия во время стимуляции и в течение 30 секунд после её окончания проводили с помощью ИК тепловизора NEC TH-9100 путем регистрации последовательности ИК изображений с частотой цифровой записи 60 Гц. Далее, с помощью специализированного программного обеспечения для обработки термограмм ThermoFit Pro, разработанного в Томском политехническом университете, был проведен анализ полученных данных. В Таблице 2.7 приведены величины максимальных изменений температурного сигнала в области ударного повреждения на лицевой (ΔT_{front}) и обратной (ΔT_{back}) поверхностях образца углепластикового композита, полученные при изменении

электрической мощности магнитострикционного излучателя в диапазоне от 60 до 200 Вт. Графики полученных зависимостей приведены на Рисунке 2.27.

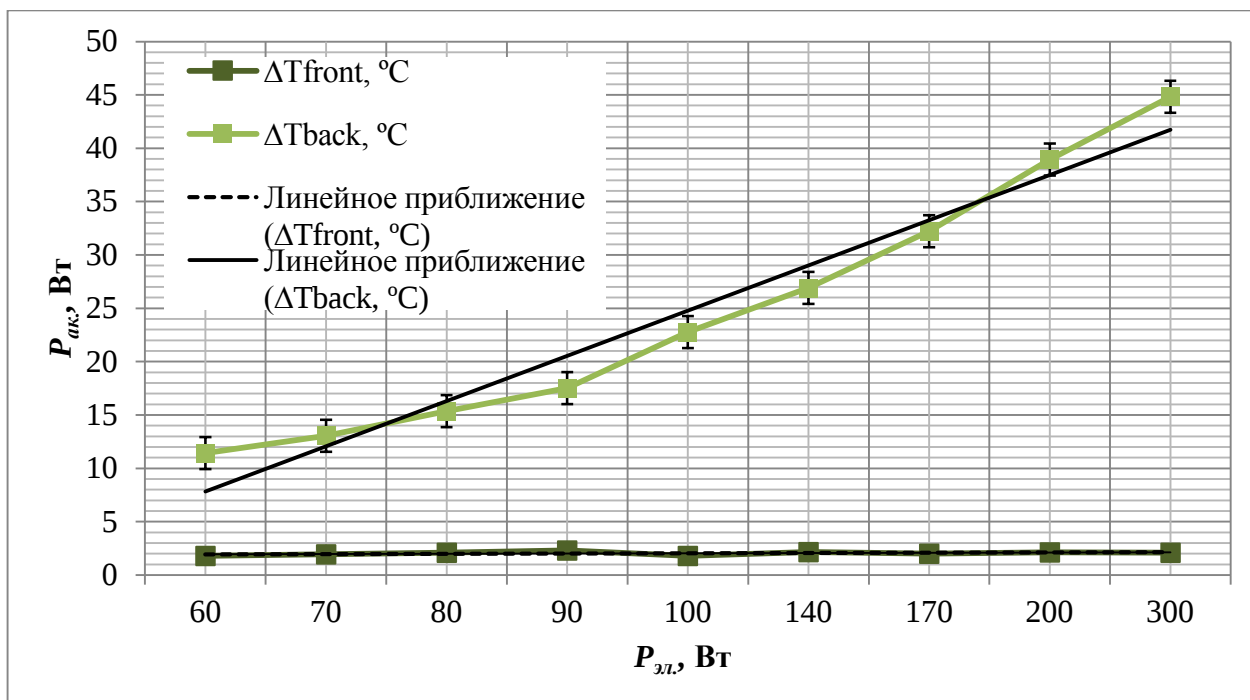


Рисунок 2.27 Зависимость амплитуды температурных сигналов в дефектной области в зависимости от электрической мощности магнитострикционного преобразователя

Полученные экспериментальные величины температурных сигналов были использованы для оценки энергии, затраченной на тепловыделение в зоне ударного повреждения в результате УЗ стимуляции. С помощью программы ThermoSource была оценена мощность теплогенерации каждым отдельным расслоением, а также суммарная тепловая мощность дефекта ($P_{тепл.}$), аналогично методике, описанной в разделе 2.6.1. В ходе моделирования, ударное повреждение рассматривали как пирамидальный дефект, состоящий из одиннадцати активных внутренних источников тепла, которые представляли собой воздушные области в форме параллелепипеда толщиной 0,31 мм каждый. Расстояние между слоями выбрано равным 0,1 мм. Теплофизические характеристики максимально соответствовали экспериментальным (толщина образца 4 мм, теплопроводность 0,61 Вт/(м $^\circ$ C), теплоемкость 1500 Дж/(кг $^\circ$ C) и плотность 1560 кг/м 3) [45, 46]. Результаты моделирования приведены в Таблице 2.8.

Используя значения электрической и акустической мощности магнитострикционного излучателя, полученные экспериментально (Таблица 2.6), рассчитаем коэффициент преобразования электрической мощности излучателя в акустическую ($\eta_{за}$) по формуле:

$$\eta_{\text{за}} = \frac{P_{\text{ак}}}{P_{\text{эл}}} \times 100\% \quad (2.16)$$

Выражение для определения коэффициента преобразования акустической мощности излучателя в тепловую мощность ($\eta_{\text{ат}}$), которая рассеивается дефектом, имеет вид:

$$\eta_{\text{ат}} = \frac{P_{\text{тепл}}}{P_{\text{ак}}} \times 100\% \quad (2.17)$$

Выражение для определения коэффициента преобразования электрической мощности излучателя в тепловую мощность ($\eta_{\text{эт}}$), которая рассеивается дефектом, имеет вид:

$$\eta_{\text{эт}} = \frac{P_{\text{тепл}}}{P_{\text{эл}}} \times 100\% \quad (2.18)$$

Расчетные величины $\eta_{\text{за}}$, $\eta_{\text{ат}}$ и $\eta_{\text{эт}}$ приведены в Табл. 2.8.

Таблица 2.8 – Расчетные и экспериментальные значения коэффициентов преобразования электрической энергии в акустическую энергию излучателя, а затем в тепловую энергию, выделяемую в дефекте

Р_{эл}, Вт	60	70	80	90	100	140	170	200	300
Р_{ак}, Вт	1,8	2,58	2,88	3,24	3,9	4,65	5,28	5,46	6,78
Р_{тепл}, Вт	0,44	0,49	0,56	0,63	0,78	0,92	1	1,2	1,42
η_{за}, %	3	4,07	3,6	3,6	3,9	3,32	3,11	2,73	2,26
η_{ат}, %	23,4	19	19,44	19,44	20	19,8	18,94	21,98	20,94
η_{эт}, %	0,73	0,7	0,7	0,7	0,78	0,66	0,59	0,65	0,47

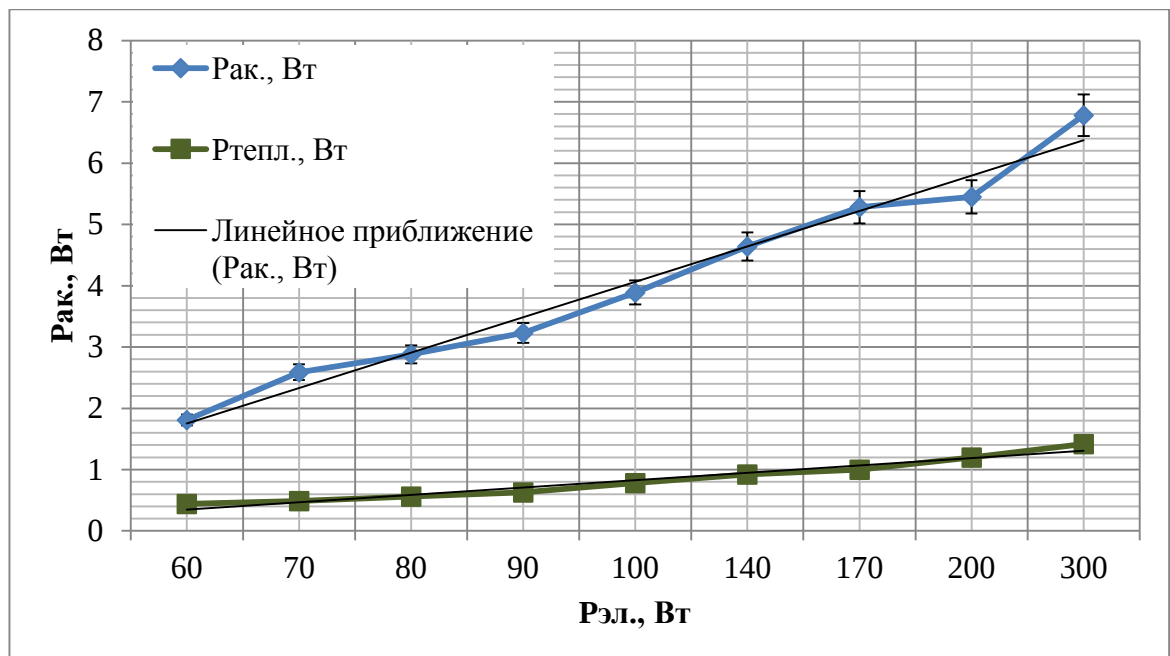


Рисунок 2.28 Изменение акустической мощности магнитостриктора и тепловой мощности, выделяемой в области дефекта в зависимости от уровня электрической мощности магнитострикционного преобразователя

Результаты компьютерного моделирования тепловой мощности, рассеиваемой в области дефекта, а также расчетные значения акустической и электрической мощности магнитострикционного излучателя (Рисунок 2.28), показали, что в процессе УЗ нагружения пластины эффективность преобразования электрической мощности в акустическую составляет от 3% до 4,1%. Соответственно, среднее значение коэффициента преобразования электрической мощности в акустическую ($\eta_{эа\text{ср}}$) составляет:

$$\eta_{эа\text{ср}} = \frac{3 + 4,07 + 3,6 + 3,6 + 3,9 + 3,32 + 3,11 + 2,73 + 2,26}{9} = 3,29\%$$

Коэффициент преобразования акустической энергии в тепловую для дефектной зоны варьируется от 19 до 22%. Среднее значение коэффициента преобразования электрической мощности в акустическую ($\eta_{ат\text{ср}}$) составляет:

$$\eta_{ат\text{ср}} = \frac{23,4 + 19 + 19,44 + 19,44 + 20 + 19,8 + 18,94 + 21,98 + 20,94}{9} = 20,37\%$$

Процент электрической мощности излучателя, преобразованной в тепловую энергию, в среднем составляет:

$$\eta_{эт\text{ср}} = \frac{0,73 + 0,7 + 0,7 + 0,7 + 0,78 + 0,66 + 0,59 + 0,65 + 0,47}{9} = 0,66\%$$

Таким образом, в процессе УЗ нагружения материала с использованием мощной УЗ аппаратуры в области дефекта выделяется тепловая мощность, эквивалентная 0,66% потребляемой электрической мощности магнитострикционного излучателя, что, свою очередь, составляет 20,4% от акустической мощности излучателя. В связи с этим, метод УЗ ИК термографии должен быть усовершенствован с точки зрения более эффективного преобразования электрической энергии в акустическую и тепловую (экономии энергоресурсов), например, используя явление механического резонанса.

2.8. Выводы по Главе 2

1. Возможности нового способа теплового неразрушающего контроля, названного УЗ ИК термографией, интенсивно исследовались в течение последнего десятилетия. Данный способ представляет интерес, как для промышленного применения, так и для академических исследователей, решающих термомеханические задачи. Существенное улучшение технических характеристик современных тепловизоров и применение эффективных алгоритмов обработки температурных данных повысило интерес к УЗ ИК термографии.

2. В данной главе был предложен подход к оценке эквивалентной тепловой мощности, генерируемой подповерхностными дефектами, которые облучаются механическими волнами УЗ диапазона. Для исследований был выбран углепластиковый композит, содержащий дефект в виде множественных расслоений, генерирующих тепло. В каждом из 9 сегментов дефекта была оптимизирована величина выделяемой тепловой мощности таким образом, чтобы расчетные температурно-временные зависимости наилучшим образом, т.е. с использованием метода наименьших квадратов, соответствовали экспериментальным результатам. Таким образом, эквивалентная «мощность» ударного повреждения энергией 16 Дж при мощной УЗ стимуляции (электрическая мощность до 1,5 кВт, частота 22 кГц) в течение 10 секунд составила 152,9 мВт, что по порядку величины соответствует опубликованным данным. Продemonстрировано, что основной вклад в повышение температуры вносят дефекты, расположенные на глубинах до 1,5 мм, считая от контролируемой поверхности. Основная сложность моделирования состояла в оптимизации расчетных температурно-временных функций в соответствии с экспериментальными значениями, учитывая глубины залегания каждого источника тепла.

3. Обычно используемые в УЗ ИК термографии резонансные пьезопреобразователи имеют узкую полосу рабочих частот, поэтому эффективность теплогенерации в области дефекта зависит от соответствия частоты подаваемого на излучатель акустического сигнала частоте его резонанса. Тем не менее, геометрия построения пьезопреобразователи позволяет достичь высокого уровня акустической мощности на излучателе, благодаря чему обеспечивается необходимый уровень температурных откликов дефектов на уровне, достаточном для их идентификации. Таким образом, за счет высокой вводимой мощности УЗ излучения, данный метод НК является экспрессным. Вместе с тем следует отметить, что частота акустического сигнала оказывает значительное влияние на выявляемость дефектов разного размера, вследствие чего необходимо использовать широкополосное возбуждение для повышения надежности контроля качества материалов и изделий.

4. Метод мощной УЗ ИК термографии доказал свою высокую эффективность при обнаружении низкоэнергетических ударных повреждений в углерод-углеродном композите. При электрической мощности на инденторе 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 между точкой ввода акустического сигнала и дефектом. Таким образом, площадь одновременно контролируемой поверхности составляет 0,283 м². При этом амплитуда температурных сигналов максимальна при УЗ стимуляции отдельных волокон композита, проходящих через дефектные зоны (рост сигнала может достигать 30%),

а также при размещении объекта контроля на эластичной подложке, например, из вспененного полиэтилена.

5. Результаты моделирования температурного отклика расслоений в углепластике показали, что амплитуда температурного сигнала в области расслоений увеличивается с ростом размеров и уменьшением глубины залегания дефектов относительно контролируемой поверхности.

6. Исследование преобразования электрической мощности магнитострикционного излучателя в акустическую, а затем в тепловую мощность, рассеиваемую в дефектных областях, показало, что с использованием мощной УЗ аппаратуры, в области дефекта выделяется тепловая мощность, по своей величине эквивалентная 0,71% потребляемой электрической мощности магнитострикционного излучателя, что, в свою очередь, составляет около 20% от акустической мощности излучателя. В связи с этим, метод УЗ ИК термографии должен быть усовершенствован с точки зрения более эффективного преобразования электрической энергии в акустическую и тепловую (экономии энергоресурсов), например, используя явление механического резонанса.

ГЛАВА 3. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КОМПОЗИТОВ ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СТИМУЛЯЦИИ (СИНТЕЗ ДАННЫХ)

3.1. «Классический» тепловой контроль при оптической стимуляции

Как отмечалось в Главе 1 (Раздел 1.7), в основе ТК лежит исследование поверхностной температуры объектов контроля, аномалии которой служат индикаторами скрытых дефектов. Информативными признаками дефектности являются: амплитуда, размер и форма температурных полей, а также особенности их изменения во времени. Напомним, что различают активный и пассивный, а также стационарный и нестационарный (динамический), способы ТК, характеризующиеся специфическим видом температурно-временной зависимости. При активном способе для стимуляции объекта используется дополнительный источник тепловой энергии, в то время как при пассивном способе испытаний исследуют температурное поле объекта, сформировавшееся в процессе его изготовления и функционирования. В соответствии с этими особенностями ТК выделяют пассивные и активные дефекты, которые, в свою очередь, выделяют или поглощают тепловую энергию, что определяет необходимость использования конкретного способа испытаний в соответствии с природой дефектов и их способностью без дополнительной стимуляции создавать информативный температурный сигнал.

Выше отмечалось, что при испытаниях композитов широко используют метод активного (нестационарного) ТК для обнаружения подповерхностных дефектов, оценки их размера, глубины залегания, а также ориентации волокон композиционных материалов, количество слоев в исследуемом образце, состава материала и его пористости [49].

Классический ТК, использующий, как правило, оптический нагрев, позволяет обнаруживать дефекты относительно большой площади (более 10 мм², если речь идет о композитах толщиной то нескольких миллиметров), создающие значительное тепловое сопротивление потоку нагрева. Однако применение данного метода ограничено толщиной исследуемого материала и глубиной залегания дефектов: предельное значение глубины обнаружения обычно составляет 3–5 мм от inspectируемой поверхности при проведении процедуры одностороннего контроля и 5–15 мм для дефектов малой площади в случае двухсторонней процедуры [50].

В ТК регистрируемой физической величиной является температура, однако предельные возможности метода связаны не с температурным разрешением ИК тепловизоров (до 10 мК в исследовательских приборах), а с оптимизацией отношения сигнал\шум, причем в качестве информативного сигнала чаще выступают фазовые и временные параметры. Зависимость

этих параметров от параметров дефектов неоднозначна, поэтому в последнее время исследуют связь дефектов и их теплофизических характеристик (ТФХ) [51]. В частности, в двухсторонней процедуре ТК определяют локальную температуропроводность материала, а при одностороннем контроле оценивают коэффициент тепловой активности и тепловую инерцию материала. Следует заметить, что в данном случае речь не идет об определении ТФХ как таковых, что является предметом особого раздела прикладной физики, а об использовании ИК термографии для составления карт ТФХ.

Недостатками оптического нагрева являются:

- низкая эффективность нагрева светлоокрашенных материалов, отражающих излучение нагрева видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазона;
- наличие мощного отраженного излучения после выключения источника, что существенно ухудшает эффективность ТК в односторонней процедуре.

Ряд недостатков ТК может быть преодолен путем комбинации способов активного ТК с вихретоковой или ультразвуковой стимуляцией.

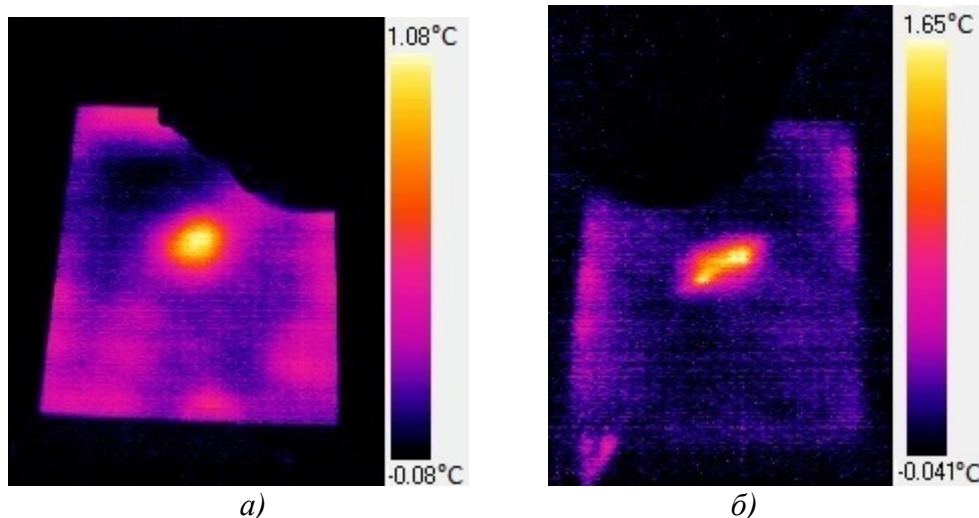
3.2. Исследуемые образцы

Рост объема применения композиционных материалов, прежде всего, в передовых отраслях промышленности, обусловлен тем, что по многим показателям они превосходят традиционные материалы (древесину, металлы и их сплавы). Важным преимуществом композитов является возможность проектирования материалов в соответствии с требованиями конкретных задач, поэтому адресный контроль структурных дефектов в процессе производства и эксплуатации важен для обеспечения необходимого качества и срока службы этих композиционных материалов и изделий.

В данной работе исследовали полимерные композиционные материалы, которые изготавливают из переплетенных нитей углеродного волокна, расположенных в матрице из полимерных смол (углепластик), а также углерод-углеродные композиты, состоящие из переплетенных нитей углеродного волокна, которые расположены в матрице из графита. Данные виды композиционных материалов, обладающие удельным весом ниже алюминия, имеют высокие механические характеристики: в частности, прочность нитей на разрыв сопоставима с прочностью легированной стали. Тем не менее, ударные повреждения с энергией от 5 до 400 Дж, которые могут появляться во время эксплуатации изделий из углепластика, снижая прочность конструкций (авиационных панелей), представляют серьезную научно-техническую проблему.

Типичной формой ударных повреждения в углепластиковых композитах являются две расширенные области, симметрично расположенные на задней поверхности материала вокруг точки удара близко друг к другу (Рисунок 3.1,б). В зарубежной научной литературе данный вид повреждений называют «бабочкой» (butterfly). На передней стороне пластины, где произошел удар, место повреждения имеет вид полусферы (Рисунок 3.1,а). В углерод-углеродных композитах картина ударных повреждений является более однородной вследствие тканевого типа компоновки волокна.

Контроль качества композиционных материалов с возможными ударными повреждениями производят с использованием как УЗ, так и оптического способов тепловой стимуляции. Однако, в связи со спецификой взаимного расположения ИК камеры и магнитострикционного излучателя, качество получаемых в ходе УЗ стимуляции ИК изображений уступает термограммам, полученным с применением оптической стимуляции. На Рисунке 3.1 приведены термограммы передней (а, в) и задней (б, г) поверхностей пластины углепластикового композита с ударным повреждением энергией 16 Дж, полученные с использованием УЗ (Рисунок 3.1,а, б) и оптического (Рисунок 3.1,в, г) способов стимуляции. Как видно из термограмм, в результате УЗ нагружения композита, ударное повреждение было идентифицировано с обеих сторон материала, в отличие от оптического контроля, с помощью которого удалось обнаружить ударное повреждение только на задней поверхности образца. Тем не менее, видно, что качество термограмм, полученных в результате проведения оптического контроля, превышает качество термограмм, полученных в результате УЗ стимуляции. Следовательно, для получения наиболее детальной информации о структуре дефекта и его расположении в материале целесообразно комбинировать УЗ и оптический методы неразрушающего контроля.



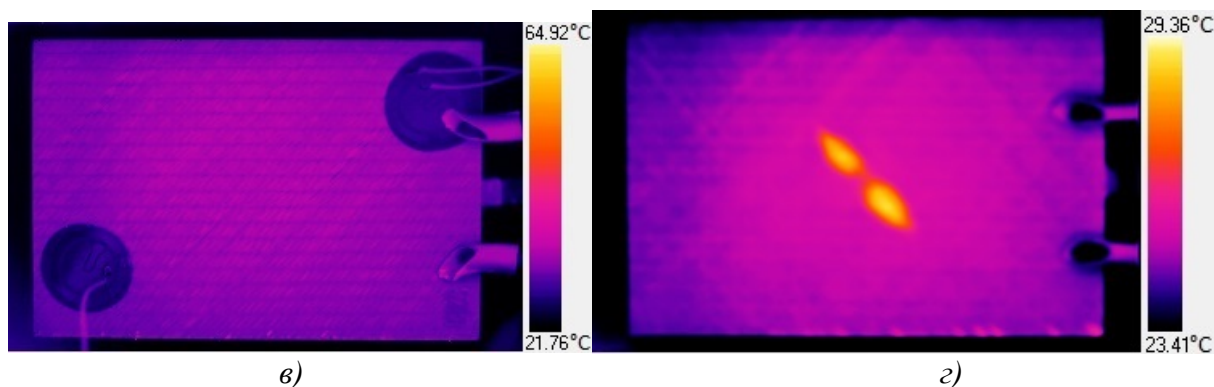


Рисунок 3.1 Термограммы передней (а) и задней (б) поверхностей образца из углепластикового композиционного материала с ударным повреждением энергией 16 Дж после УЗ стимуляции, а также оптического нагрева с помощью ксеноновой импульсной лампы (в, г)

3.3. Контроль ударных повреждений в углепластиковых композитах

В настоящей диссертации рассмотрен тепловой НК ударных повреждений в углеродных композитах толщиной несколько миллиметров, в основном, с помощью УЗ стимуляции, в то время как классический оптический нагрев был использован в качестве альтернативного метода НК.

Одной из главных задач при проведении неразрушающего контроля композитов с помощью УЗ стимуляции, является исследование термомеханической модели генерации тепла в процессе УЗ нагружения, учитывающей механические свойства композиционных материалов (модуль Юнга, коэффициент Пуассона и коэффициент трения), энергию стимуляции, тип закрепления образца, расстояние между дефектом и положение точки УЗ стимуляции. Данные зависимости были получены в результате экспериментальных исследований низкоэнергетических ударных повреждений (5–20 Дж) в углепластиковых композитах, описанных ниже.

Методика проведения активного ТК композиционных материалов заключается в повышении отношения сигнал/шум и оценке параметров дефектов в результате обработки набора ИК изображений, получаемых в ходе оптической стимуляции и в течение некоторого времени после её окончания, с учетом тепловых свойств материала. Оптимальные результаты контроля имеют место при использовании двухсторонней процедуры определения теплопроводности методом Паркера (импульсный метод). Данный метод обеспечивает высокую точность измерений, благодаря чему является преобладающим в зарубежных исследованиях при определении температуропроводности твердых тел. Надежность метода Паркера повышается за счет нескольких факторов: учета теплоотдачи на поверхности контролируемого объекта, строгого обоснования экспериментального выбора

момента регистрации температуры и учета конечных размеров объекта исследования. Данный метод позволяет определить также коэффициент теплопроводности, для чего, совместно с измерением толщины изделия, определяют величину поглощенной в процессе оптического нагрева энергии [49]. Далее по известным величинам коэффициента температуропроводности (α) и коэффициента теплопроводности (K), а также плотности материала (ρ), можно определить теплоемкость C :

$$C = \frac{K}{\rho \times \alpha} \quad (3.1)$$

В образец из углерод-углеродного композита размером 400×400×3.4 мм были внесены ударные повреждения с энергией от 5 до 20 Дж. В месте удара дефектные отметки практически отсутствовали, однако, на задней поверхности образца в месте расположения дефекта с энергий 20 Дж было отмечено видимое глазом отслоение. В дальнейшем данный образец был исследован с использованием УЗ и оптической стимуляции.

На Рисунке 3.2,а приведены ИК термограммы передней (слева) и задней (справа) поверхностей композита, полученные в результате УЗ нагружения в течение 5 секунд с использованием аппаратуры импульсной УЗ ИК термографии на основе магнитострикционного излучателя, принцип работы которой описан в разделе 2.3.1. Термограммы демонстрируют хорошую корреляцию между энергией удара и амплитудой регистрируемого температурного сигнала. Тем не менее, оценка степени повреждения материала данным методом НК затруднительна вследствие того, что амплитуда температурного сигнала и форма получаемого изображения дефектной области сильно зависят от расстояния между точкой стимуляции и дефектом. Расположение и ориентация волокон материала также могут играть важную роль в формировании температурного сигнала. Например, максимальная амплитуда температурного сигнала наблюдается при распространении акустических волн вдоль волокон непосредственно к поврежденной области (в случае углерод-углеродного композита с тканевой структурой компоновки волокна). Данные факторы негативно сказываются на информативности оценки степени повреждения материала и изделия в целом. Заметим, что в данном случае распределения температурных полей на inspectируемой поверхности, полученные в результате УЗ и оптической стимуляции, выглядит аналогичным образом, как это следует из Рисунка 3.2,а, что может быть объяснено сравнительно однородной структурой композита в направлении распространения дефекта в образце.

Применяя для нагрева одну импульсную ксеноновую лампу (энергия в импульсе 1,6 кДж), был проведен контроль зоны на поверхности изделия диаметром 180 мм (Рисунок 3.2,б) с целью обнаружения многократных ударных повреждений энергией 5, 10 и 20 Дж.

Лампу нагрева размещали вплотную к образцу, а ИК термограмму получали на противоположной поверхности. Исходная термограмма показана на левой части Рисунка 3.2,б. Дефекты с энергией повреждения 10 и 20 Дж видны в виде холодных областей на фоне теплового «кольца», обусловленного нагревом кольцеобразной ксеноновой лампы. Амплитуда температурного сигнала композиционного материала в зоне кольца составляла 6–7 °С, в то время как избыточный нагрев в других зонах составил около 2 °С.

Используя метод Паркера, последовательность полученных ИК изображений преобразовали в карту температуропроводности (изображение на Рисунке 3.2,б справа), в результате чего было установлено, что коэффициент температуропроводности в зоне дефекта ($\alpha = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и $2,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) хорошо коррелирует с энергией удара, в то время как бездефектная область характеризуется более высоким коэффициентом температуропроводности $\alpha = 5,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Также следует отметить, что, в соответствии с алгоритмом Паркера, результирующее изображение температуропроводности обеспечивает эффективное подавление неравномерного распределения температурного поля в процессе нагрева, что способствует улучшению выявляемости дефектов по сравнению с исходными термограммами.

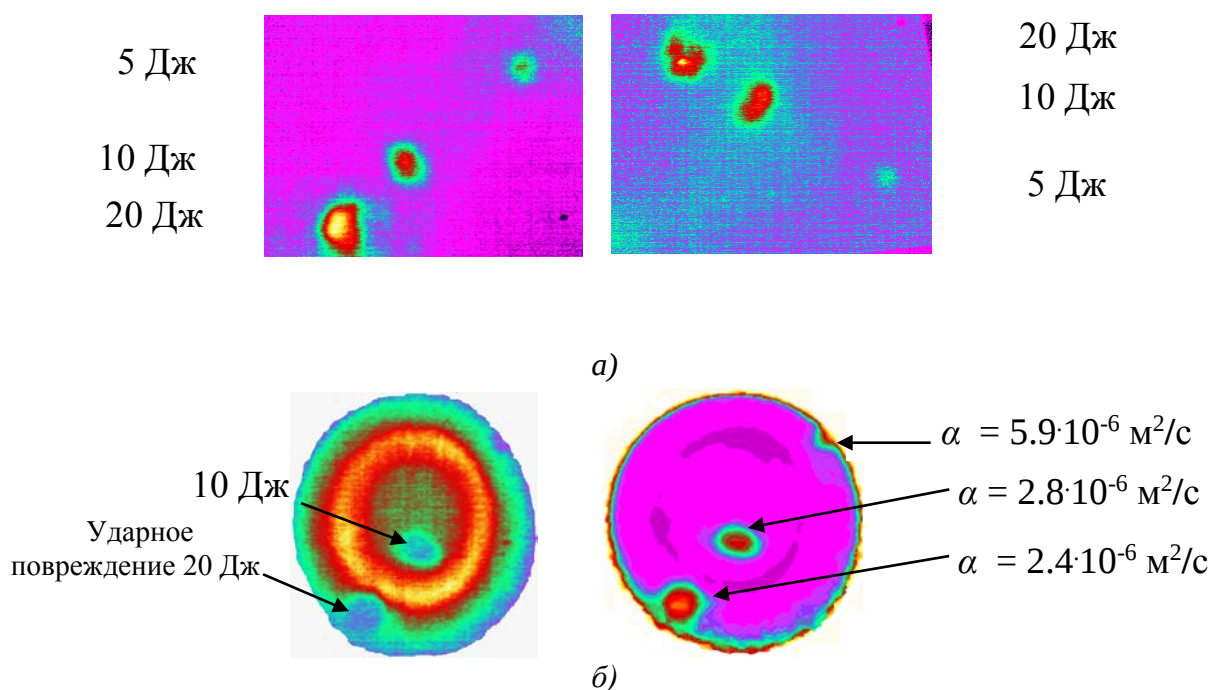


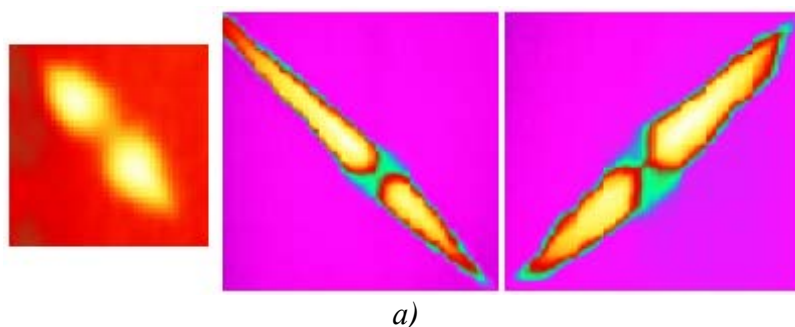
Рисунок 3.2 Термографические изображения поверхности углерод-углеродного композита толщиной 3,4 мм, полученные в результате УЗ (а) и оптической (б) стимуляции пластины

Известно, что ИК термографические изображения, полученные при контроле качества материалов и изделий с помощью УЗ и оптического методов, могут существенно различаться вследствие различий в механизмах образования температурных сигналов [52]. Кроме того,

температурный «паттерн» также зависит от структуры конкретного дефекта. Температурный сигнал при УЗ стимуляции возникает в результате выделения энергии, генерация которой, в свою очередь, обусловлена внутренним трением стенок дефектов и наличием интенсивных изгибных деформаций в областях материала, ослабленных дефектными включениями. Таким образом, даже весьма глубокие дефекты могут генерировать значительные температурные сигналы. Другой известной особенностью УЗ стимуляции является то, что данный метод НК может быть более эффективным, чем любой вид поверхностной стимуляции в случае обнаружения «слипнутых» (по-английски *kissing*, или «целующихся») дефектов, стенки которых находятся в контакте между собой, что производит к значительному трению в ходе акустического нагружения материала.

В случае оптического нагрева, тепловая энергия, распространяющаяся в глубь инспектируемого материала, аккумулируется в области термически резистивных дефектов, что значительно снижает эффективность контроля с ростом глубины залегания дефекта при проведении одностороннего НК. В этом случае, чем больше толщина дефекта, тем больше величина регистрируемого температурного сигнала. Вышеупомянутое явление в полной мере проявляется при обнаружении ударных повреждений в углепластиковых композиционных материалах. Примером служит ИК термограмма, приведенная на Рисунке 3.3 и иллюстрирующая распределение температурного поля на поверхности углепластика. Образец содержал ударные повреждения различной энергии (11, 19 и 64 Дж).

В случае ударного повреждения с энергией 18 Дж, основная часть дефекта, по-видимому, характеризуется значительным тепловым сопротивлением, что хорошо проявляется при оптическом нагреве (Рисунок 3.4, слева). Однако центральная часть дефекта представляет собой тонкий воздушный слой, между стенками которого возникает интенсивное трение в процессе УЗ стимуляции, что, в свою очередь, приводит к интенсивной локальной теплогенерации в области дефекта (Рисунок 3.4, в центре). Таким образом, совместное применение техники синтеза (*data fusion*) результатов оптического и УЗ НК позволяет получить более детальные сведения о характере повреждения материала (Рисунок 3.4, справа).



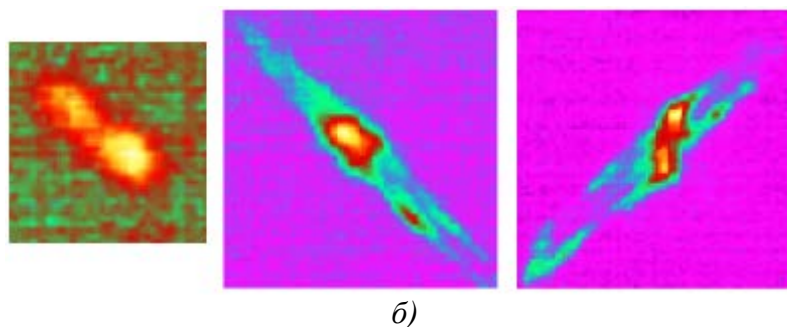


Рисунок 3.3 Оптическая (а) и УЗ (б) стимуляция ударных повреждений в образцах из углепластика (энергия ударных повреждений слева направо: 11, 19 и 64 Дж)

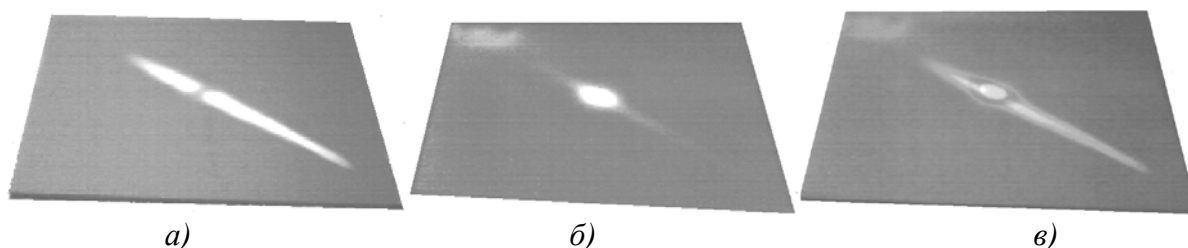


Рисунок 3.4 Синтез экспериментальных результатов УЗ (а) и оптического (б) контроля в обобщенное изображение (в) ударного повреждения энергией 18 Дж в образце из углепластика

3.5. Выводы по Главе 3

1. Механизмы генерации температурных сигналов при УЗ и оптической стимуляции в определенной степени различаются. При облучении дефектов механическими волнами звуковой и УЗ частоты основным механизмом теплогенерации является трение стенок дефектов, что приводит к парадоксальному феномену лучшего проявления «тонких» дефектов по сравнению с дефектами, имеющими большое раскрытие. Таким образом, дефект является локальным тепловым источником, а тепловая энергия распространяется «однократно» от заглубленного дефекта к поверхности. При оптическом нагреве тепловая «волна» от стимулируемой поверхности распространяется в глубь материала, встречает дефект, как правило, низкотеплопроводный, что приводит к локальной аккумуляции тепловой энергии над дефектом (иногда по аналогии с УЗ методом говорят об отражении тепловой волны от дефекта). При этом тепловая энергия проходит вдвое больший путь, чем в случае УЗ возбуждения.

2. Вследствие вышеуказанного, результаты применения классического оптического ТК и метода УЗ ИК термографии при обнаружении скрытых дефектов могут быть различными. В основном, это проявляется в различных формах температурных распределений.

3. Экспериментальные исследования проведены на углепластиковом и углерод-углеродном композитах с ударными повреждениями различных энергий. 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 «слипнутых» расслоений и микротрещин.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДА МАЛОМОЩНОЙ РЕЗОНАНСНОЙ СТИМУЛЯЦИИ КОМПОЗИТОВ С РЕГИСТРАЦИЕЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ МЕТОДОМ ИК ТЕРМОГРАФИИ

4.1. Резонансная ультразвуковая ИК термография

Метод маломощной резонансной УЗ дефектоскопии основан на исследовании резонансных частот дефектных областей твердых тел посредством регистрации вибраций контролируемой поверхности материала в широком диапазоне частот с помощью аппаратуры сканирующей лазерной виброметрии [53–55]. УЗ стимуляцию объектов исследования проводят акустическими сигналами различных форм (чаще всего в виде гармонической функции или меандра), модулированным по частоте в диапазоне от 1 до 200 кГц, что обусловлено необходимостью совпадения частоты резонанса дефекта с частотой акустических волн, вводимых в исследуемый материал, и исключения возможности возникновения стоячих волн, препятствующих обнаружению дефектов. Для экспериментального определения резонансных частот дефектов измеряют индивидуальный вклад частотного отклика каждой под-области образца в широком диапазоне частот. Затем на картине вибрации проверяют происхождение каждого максимума амплитуды сигнала вибрации во всем диапазоне частот для определения частоты резонанса дефекта при его наличии. Для этой цели УЗ нагружение объекта производят с использованием широкополосных пьезоэлектрических преобразователей совместно с лазерным сканированием вибраций на всей поверхности исследуемого материала.

Благодаря совпадению частоты резонанса вводимого в объект исследования акустического сигнала с частотой резонанса дефекта достигается максимальный уровень вибраций в этой области, что, как следствие, приводит к эффективной механической стимуляции дефектной зоны и получению температурного отклика за счет механизма внутреннего трения.

Ультразвуковая вибротермография с использованием локального резонанса дефекта требует существенно меньше акустической мощности (до нескольких мВт) для активации дефектов посредством возбуждения собственного резонанса дефектной зоны в сравнении с «традиционной» УЗ термографией, что обеспечивает возможность широкого исследования характеристик материалов и их дефектных включений, а также перехода на бесконтактный УЗ термографический контроль путем УЗ возбуждения через воздушную среду [56–60].

Экспериментально и теоретически эффект локального резонанса дефекта был предложен и исследован сотрудниками лаборатории неразрушающего контроля

Штуттгартского Университета (Германия) при испытаниях тонких стандартных образцов в виде пластин из полиметилметакрилата (ПММА), ослабленных круглыми отверстиями различных размеров. По результатам исследования было сделано заключение об эффективности данного подхода к определению качества материалов, в особенности, на наличие дефектов в виде ударных повреждений, расслоений и трещин.

В лаборатории теплового контроля Томского политехнического университета (ТПУ) совместно с Институтом физики прочности и материаловедения (ИФПМ) СО РАН были проведен ряд экспериментов по определению резонанса дефектов в композиционных и полимерных материалах, а также был выполнен теоретический расчет основной частоты резонанса дефектов, выполненных в виде прямоугольных и круглых отверстий в тонких пластинах из ПММА. Полученные результаты подтвердили предложенную германскими исследователями концепцию метода и внесли определенный вклад в определение резонансных частот дефектов.

4.2. Аппаратурная база метода

Специально для реализации режима высокоэффективной резонансной УЗ ИК вибротермографии создана уникальная экспериментальная установка, схематичное изображение которой показано на Рисунке 4.1. Система возбуждения выполнена на основе задающего генератора акустических колебаний, работающего в широком спектре рабочих частот от 1 до 180 кГц (1). Электрический сигнал от задающего генератора через буферный усилитель (2) поступает на пьезоэлектрический преобразователь (3). С целью обеспечения акустического контакта ПЭП закрепляется на объекте исследования (4) через иммерсионный слой. С помощью сканирующего лазерного виброметра (5) одновременно с акустическим нагружением объекта контроля определяют собственные резонансные частоты изделия и резонансные частоты колебаний его дефектных зон путем измерения вибраций на поверхности объекта контроля. Регулирование работы лазера осуществляют с помощью блока управления, включающего персональный компьютер и специализированное программное обеспечение для обработки данных (6). Для регистрации температурного поля на поверхности исследуемого материала используют ИК тепловизор (7), который соединен с персональным компьютером (8), обеспечивающим сбор и обработку цифровых данных, а также анализ изделия на наличие дефектов (9).

Генератор акустических колебаний позволяет работать как в одночастотном режиме, так и в режиме частотной модуляции акустического сигнала в рабочем диапазоне частот от

10 Гц до 120 кГц с шагом 10 Гц при одинаковом количестве циклов возбуждения каждой частоты.

Амплитуда напряжения возбуждения пьезоэлемента регулируется в диапазоне от 0 до 120 В. Вследствие наличия соответствующей регулировки, напряжение возбуждения не изменяется более чем на 10%, соответственно, мощность возбуждения поддерживается практически постоянной во всем диапазоне рабочих частот.

Встроенный программируемый таймер задает время одного цикла работы генератора в пределах 1–60 секунд или в непрерывном режиме.

Потребляемая генератором электрическая мощность не превышает 12 Вт, при этом выходная электрическая мощность изменяется до 2,5 Вт и ограничена встроенным балластным сопротивлением.

В задачах маломощной УЗ ИК вибротермографии используют широкополосные пьезоэлектрические преобразователи, работающие в режиме меняющейся частоты акустического сигнала, благодаря чему исследуют механические свойства материала и дефектов в широком диапазоне частот. Подаваемый в нагрузку электрический сигнал, в свою очередь, может быть гармоническим или в форме меандра, модулированным по частоте и амплитуде, как отмечалось выше, а также непрерывным или импульсным. Соответственно различают стационарный и импульсный режимы работы.

Амплитуду вибраций на поверхности объекта исследования регистрируют с помощью сканирующего лазерного виброметра PSV-500-3D фирмы «Polytec» (Германия) в диапазоне частот вибрации от 0 до 100 кГц. Результатом сканирования с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) каждой точки сканирования объекта. Количество спектральных линий настраивается оператором в зависимости от задач исследования. В большинстве экспериментов спектр строился из 1600 линий, что соответствует средней степени дискретизации спектра 62,5 Гц.

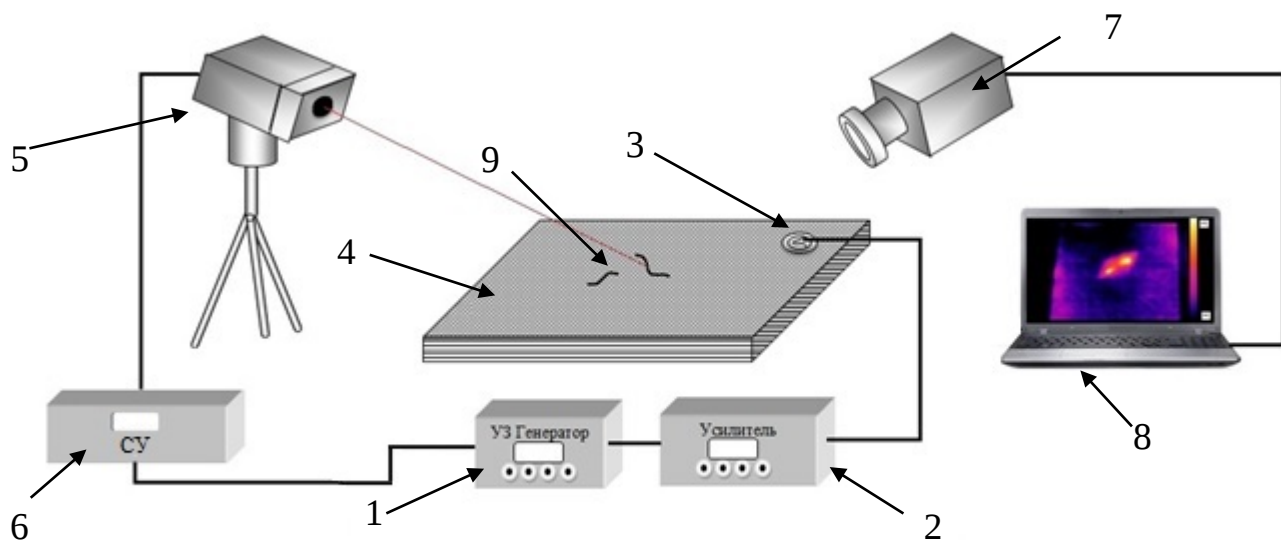


Рисунок 4.1 Структурная схема экспериментальной установки для резонансной УЗ ИК вибротермографии

Вводимые в объект исследования механические волны заставляют его вибрировать, причем наиболее интенсивные вибрации приходятся на области материала, ослабленные дефектными включениями. В связи с этим, а также благодаря явлению внутреннего трения, в зонах структурных неоднородностей акустическая энергия эффективно преобразуется в тепловую, вызывая локальный рост температурного сигнала, что регистрируется с помощью ИК камеры. Следует отметить, что интенсивность тепловыделения зависит от многих факторов, таких как условия УЗ стимуляции, физические свойства материала, тип и геометрия дефекта, и т.д.

4.3. Резонанс дефекта

Понятие резонанса дефекта основано на том, что дефектные включения приводят к локальному уменьшению жесткости материала в данной области, и это проявляется на определенной характерной частоте дефекта. В данной главе приводятся три подхода для определения частоты резонанса дефекта:

- теоретический расчет;
- экспериментальное определение за счет контроля вибраций на поверхности объекта с использованием аппаратуры сканирующей лазерной виброметрии;
- программное моделирование.

Теоретический расчет

Наличие дефектов в структуре материалов и изделий, как было отмечено выше, приводит к локальному уменьшению жесткости и изменению его физических свойств. При

этом происходит изменение резонансных свойств всей системы и возникновение дополнительных участков, имеющих свои характерные резонансные свойства.

Теоретические исследования явления резонанса дефекта проводили на основе анализа резонансных частот дефектов изотропных материалов, представляющих собой несквозные отверстия с плоским дном круглой и прямоугольной формы (Рисунки 4.2 и 4.3). Предполагалось, что прямоугольные отверстия в данном случае будут представлять собой прототип дефекта в виде трещины при большом значении соотношения сторон прямоугольника.

Пластина изотропного материала в области отверстия была принята в качестве резонатора, частицы которого совершают колебания под воздействием УЗ возбуждения. Ширина пластины в области отверстия (h) была принята намного меньше ширины пластины вне этой зоны (d): $h \ll d$, вследствие чего тонкая часть пластины в области отверстия с плоским дном была принята фиксированной по периметру.

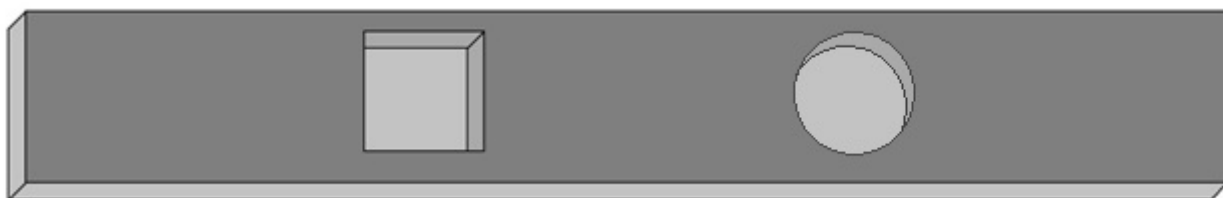


Рисунок 4.2 Общий вид пластины из ПММА, ослабленной круглым и квадратным несквозными отверстиями (схематично)

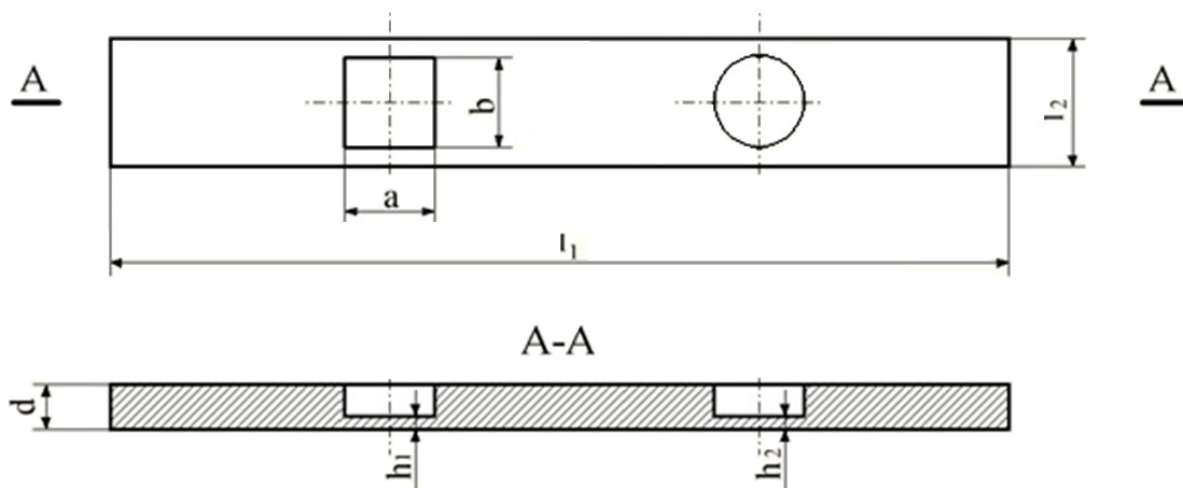


Рисунок 4.3 Геометрия задачи

Теоретически, основная частота резонанса дефекта может быть введена в качестве собственной частоты дефекта с эффективной жесткостью K_{eff} и эффективной массой M_{eff} :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{eff}}{M_{eff}}} \quad (4.1)$$

В этом случае для вывода выражения K_{eff} и M_{eff} необходимо оценить потенциальную и кинетическую энергии вибрации дефекта, что описано в Приложении 1 и Приложении 2.

В случае определения основной частоты резонанса круглого отверстия с плоским дном (радиуса R , толщиной пластины в области отверстия h) имеем (Приложение Б):

$$K_{eff} = \frac{192\pi D}{R^2}; M_{eff} = 1,8m, \quad (4.2)$$

где $D = \frac{E \times h^3}{12(1-\nu^2)}$ – это изгибная жесткость и m – масса пластины в области дефекта, E – модуль Юнга (модуль упругости), ν – коэффициент Пуассона, h – толщина пластины в области отверстия.

Подставив (4.2) в выражение (4.1), получим выражение для определения линейной частоты резонанса пластины в области круглого отверстия (Приложение Б):

$$f_{0 \text{ круг}} = \frac{1,6h}{R^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad (4.3)$$

где R – радиус круглого отверстия, ρ – плотность материала.

В случае прямоугольного отверстия, выражение для определения основной линейной частоты колебаний пластины в области отверстия, имеет вид (Приложение А):

$$f_{0 \text{ прямоугольн}} = \frac{1}{3a^2b^2} \sqrt{\frac{Eh^2(3a^4+3b^4+2a^2b^2)}{3\rho(1-\nu^2)}} \quad (4.4)$$

где a, b – длина сторон прямоугольного отверстия.

Для квадратного отверстия (при соотношении сторон $a = b$), формула для определения основной частоты резонанса имеет вид [Приложение А]:

$$f_{0 \text{ квадратн}} = \frac{2}{3a^2} \sqrt{\frac{2Eh^2}{3\rho(1-\nu^2)}} \quad (4.5)$$

Представленные подходы являются упрощенными, но позволяют уточнить физическую природу резонанса дефекта. Выражение (4.4), полученное выше, применимо к оценке основных резонансных частот дефектов, таких как отверстия с плоским дном, а также ламинарные дефекты листового проката металлов и расслоения в композитах. Проблема практического использования аналитического подхода связана с граничными условиями закрепления краев дефекта, которые приняты зажатými при выводе уравнения (4.4) и трудностью определения основной частоты резонанса дефектов сложной формы. Результаты теоретического определения основной частоты резонанса дефектов могут не совпадать с экспериментальными значениями вследствие неоднородности шероховатости поверхности дна отверстия и его толщины в этой области, возникших при его изготовлении. Также

следует отметить, что применение вышеприведенного подхода для расчета основной частоты резонанса глубоко залегающих дефектов пластин ограничено.

Лазерная виброметрия

Способ экспериментального определения частоты резонанса дефекта заключается в измерении вибраций на поверхности исследуемого материала в широком диапазоне частот в процессе его стимуляции широкополосным акустическим сигналом. Данная задача реализуется путем совместного использования техники маломощной акустической стимуляции объекта (генератора акустических сигналов и широкополосного пьезопреобразователя) с аппаратурой сканирующей лазерной виброметрии (сканирующий лазерный виброметр PSV-500-3D фирмы «Polytec», Германия), как показано на Рисунке 4.4. Совместное использование методов акустического и вибрационного контроля позволяет исследовать и определять все возможные резонансы в спектре колебаний каждой точки образца. Происхождение каждого максимума амплитуды скорости вибраций на АЧХ затем проверяют на наличие резонанса на соответствующей частоте акустического сигнала.

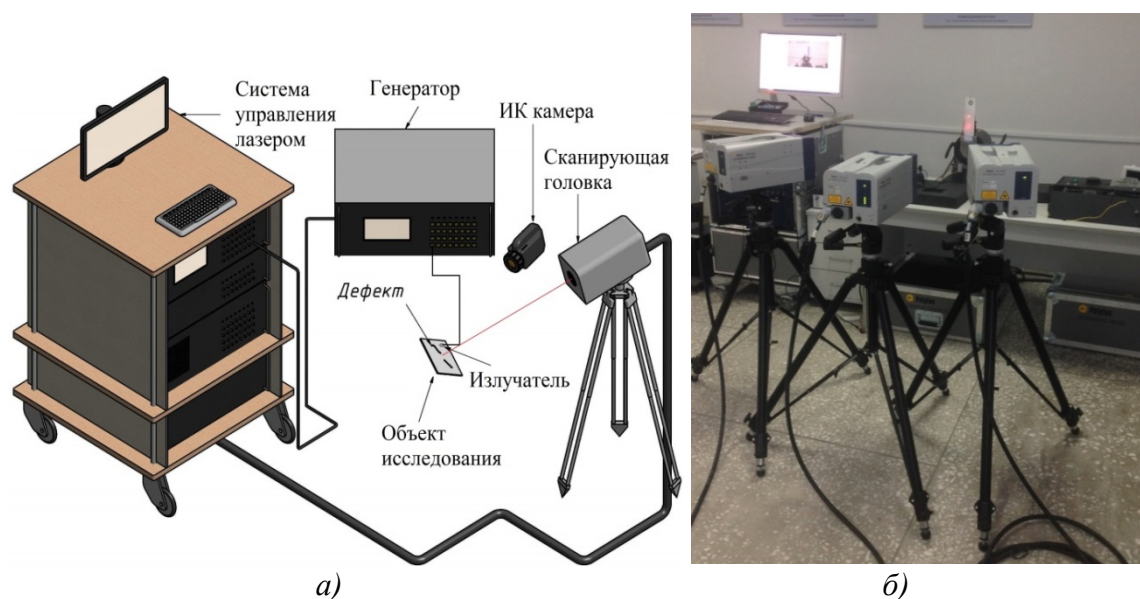


Рисунок 4.4 Структурная схема (а) и изображение (б) установки для проведения резонансной УЗ ИК термографии

На Рисунке 4.5 приведено графическое представление основной резонансной частоты (а) и картина вибрации (б), полученной в результате НК пластины из ПММА с круглым отверстием с плоским дном в центре. Значительное увеличение амплитуды вибраций наблюдается в области дефекта и определяется как локальный резонанс дефекта (Рисунок 4.5 а, б). Аналогичная методика была успешно применена для определения резонанса дефектов в различных материалах. Два примера определения резонанса дефектов, приведенные на Рисунке 4.5, в, г, демонстрируют усиленные вибрации в области расслоения, возникающие при распространении акустических волн в диапазоне частот от 0 до 120 кГц в исследуемом

объекте и проявляющиеся при контроле вибраций на их поверхностях. Частота резонанса расслоения пластины углепластикового композиционного материала составила 91160 Гц; частота резонанса ударного повреждения соответствовала 110000 Гц.

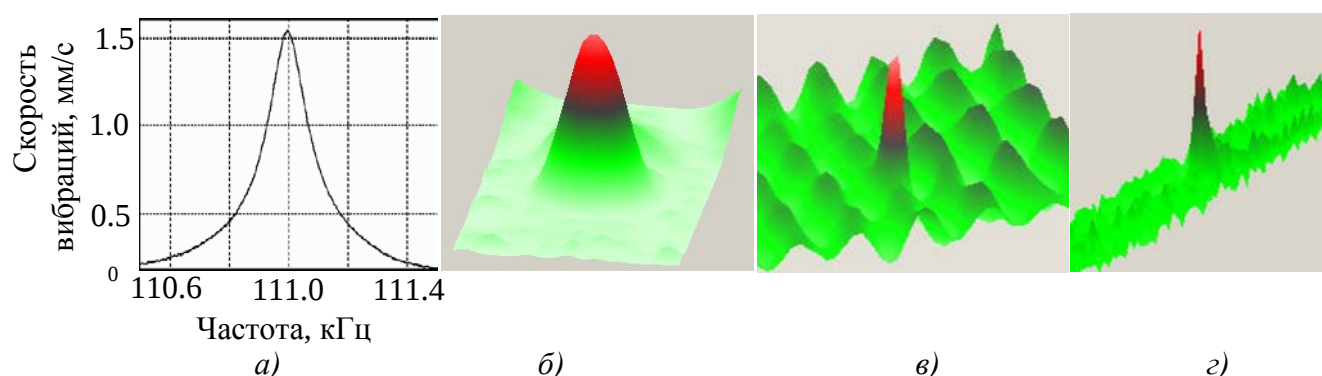


Рисунок 4.5 АЧХ (а) и картина вибраций в области несквозного круглого отверстия в пластине из ПММА (б); визуализация резонансных вибраций в области расслоения в углепластиковом композите на частоте 91160 Гц (в), вибрации на поверхности пластины углепластика (г) на резонансной частоте ударного повреждения (110 кГц)

Программное моделирование

Для оценки вибраций пластины из ПММА, ослабленной отверстием, и определения резонансных частот данного типа дефектов на платформе Comsol Multiphysics (“Structural dynamics,” “Eigen frequency analysis”) было произведено моделирование объектов исследования в процессе их УЗ стимуляции с помощью плоских цилиндрических пьезопреобразователей. При использовании метода анализа собственных частот были рассчитаны все возможные значения резонансных колебаний в пластине из ПММА (длина пластины $l_1 = 200$ мм, ширина $l_2 = 60$ мм, толщина $d = 3$ мм) с круглым несквозным отверстием в центре (радиус отверстия 10 мм, толщина пластины в области отверстия $d = 1$ мм). Количество резонансных частот, рассчитываемых в диапазоне от 0 до 200 кГц, составило не более 15. На Рисунке 4.6,а изображена картина вибраций на одной из собственных частот резонанса пластины, соответствующая частоте 1,5 кГц. На более высоких частотах резонансные явления наблюдаются в области круглых отверстий с плоским дном. Основная резонансная частота отверстия равна 7750 Гц (Рисунке 4.6,б), резонансная частота более высокого порядка наблюдается на частоте 16,2 кГц (Рисунке 4.6,в).

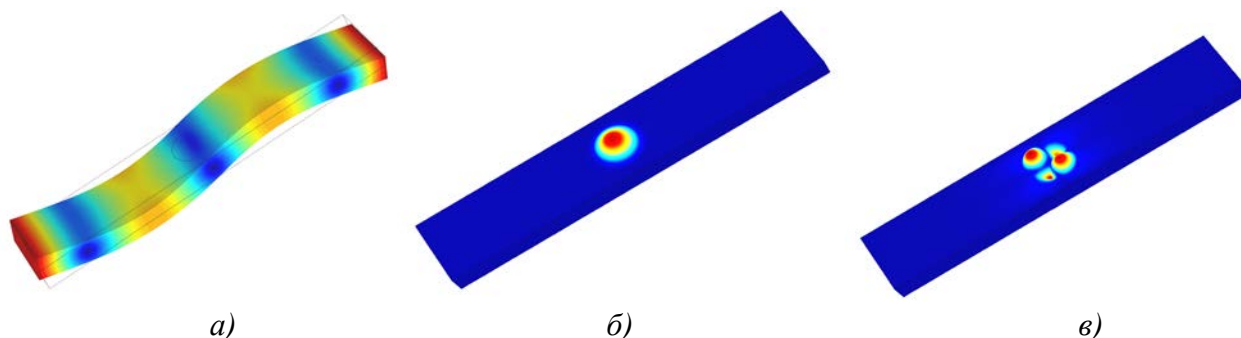


Рисунок 4.6 Результаты моделирования вибраций пластины из ПММА, ослабленной круглым отверстием с плоским дном (радиус 10 мм, толщина пластины в области отверстия 1 мм), в результате её нагружения акустическим сигналом: с частотой 1,5 кГц (а), на частоте основного резонанса отверстия (7,75 кГц) (б), на частоте резонанса высшего порядка (16,2 кГц) (в)

Произведем расчет теоретического значения частоты резонанса пластины в области несквозного круглого отверстия с использованием выражения (4.3). Модуль Юнга ПММА равен $2,6 \times 10^9$ Па, среднее значение коэффициента Пуассона составляет $\nu = 0,375$, плотность $\rho = 1100 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ [46].

Используя выражение (4.5), получим расчетное значение резонансной частоты колебаний пластины в области круглого отверстия:

$$f_{0 \text{ теор.}} = 7657 \text{ Гц.}$$

Экспериментальное значение частоты резонанса пластины в области круглого отверстия, полученное с использованием лазерной виброметрии (Рисунок 4.7), составило: $f_{0 \text{ практич.}} = 7688 \text{ Гц.}$

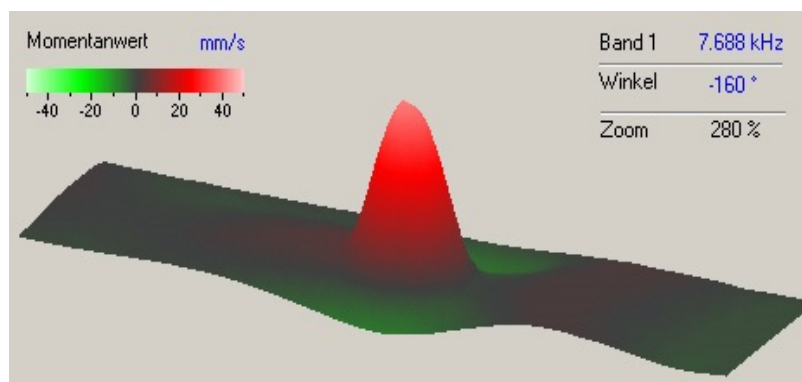


Рисунок 4.7 Изображение вибраций на поверхности пластины из ПММА, ослабленной круглым несквозным отверстием в центре, в процессе её нагружения акустическим сигналом на частоте резонанса круглого отверстия соответствующей 7688 Гц

Значения основной частоты собственных колебаний пластины из ПММА в области круглого отверстия, рассчитанные теоретически и полученные в ходе программного

моделирования, отличаются не более чем на 1% (относительная погрешность) от экспериментальных данных. Хорошая корреляция между теоретическими расчетами, экспериментальными данными и результатами программного моделирования свидетельствуют о высокой точности произведенных расчетов.

Аналогичное исследование соответствия теоретических величин резонансных частот дефектов, выполненных в виде квадратных отверстий, экспериментальным значениям и результатам моделирования, было также проведено на примере пластины из ПММА (Рисунок 4.8). Длина данной пластины составила $l_1 = 214$ мм, ширина $l_2 = 310$ мм, толщиной $d = 4$ мм. Стороны прямоугольного отверстия, расположенного в центре пластины, равны и составляют $a = b = 20$ мм. Толщина пластины в области отверстия: $h = 1,2$ мм.

Воспользовавшись выражением (4.5) для определения частоты резонанса пластины в области квадратного отверстия с учетом геометрии отверстия и физических характеристик материала, получим: $f_{0 R.PMMA1 \text{ теор}} = 8,508$ кГц.

С помощью программы Comsol MultiPhysics было проведено моделирование процесса акустического нагружения пластины из ПММА, ослабленной несквозным квадратным отверстием в центре. В результате этого была рассчитана основная частота резонанса пластины в области отверстия, а также получена картина деформации пластины из ПММА в процессе её акустического нагружения (Рисунок 4.8).

Значение основной частоты колебаний пластины в образце R.PMMA1 в области квадратного отверстия с плоским дном, полученное в ходе моделирования процесса УЗ возбуждения в программе Comsol MultiPhysics, составило: $f_{0 R.PMMA1 Comsol} = 8,255$ кГц.

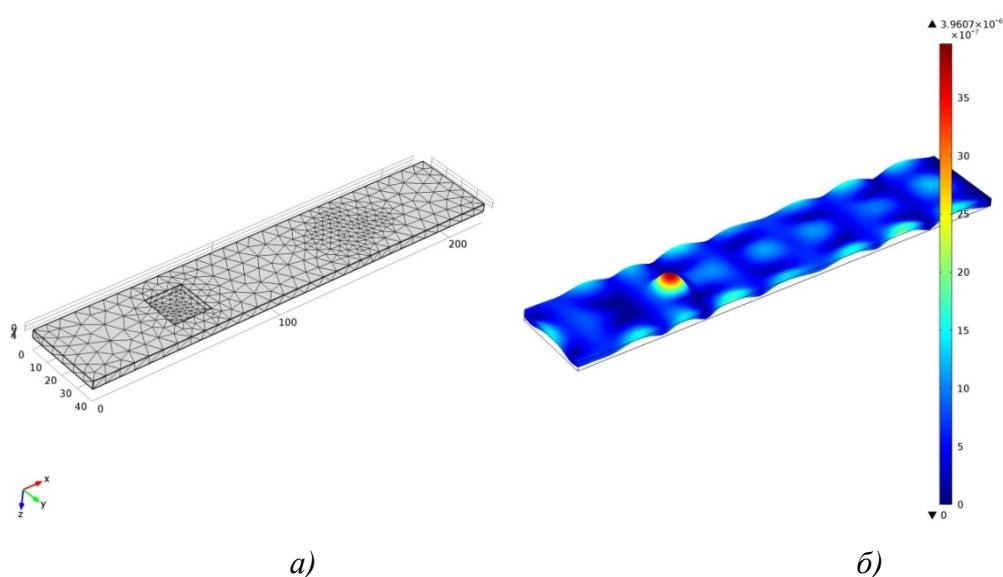


Рисунок 4.8 Общий вид пластины ПММА, ослабленной несквозным квадратным отверстием в центре (а) и картина деформации пластины в результате УЗ возбуждения (б), смоделированные с помощью программы Comsol MultiPhysics

Величина собственной частоты колебаний пластины из ПММА в области отверстия с плоским дном, полученная экспериментально, в результате сканирования поверхности исследуемой пластины с помощью аппаратуры сканирующей лазерной виброметрии (Рисунок 4.9), составила: $f_{0\text{ Р.ПММА1 практ.}} = 8,563 \text{ кГц}$.

Результат экспериментальных исследований основной частоты резонанса пластины в области квадратного отверстия совпадает с теоретическими расчетами и результатами моделирования процесса акустической стимуляции пластины из ПММА с помощью пакета Comsol MultiPhysics, с относительной погрешностью менее 1%.

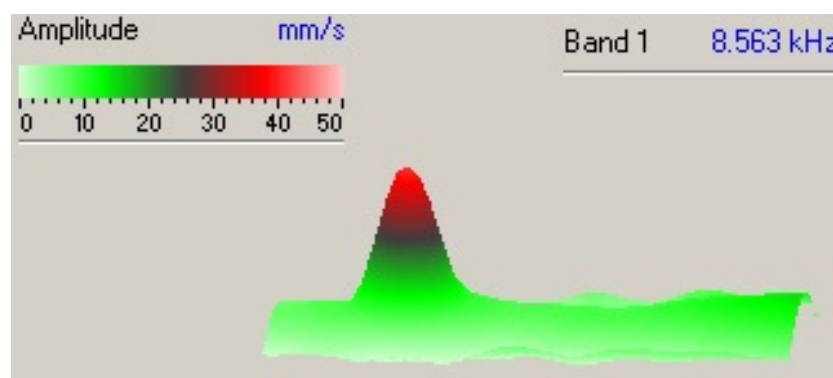


Рисунок 4.9 Картина вибраций на поверхности пластины из ПММА, ослабленной квадратным несквозным отверстием в центре, в процессе её нагружения акустическим сигналом на частоте резонанса круглого отверстия соответствующей 8563 Гц

4.4. Теплогенерация в результате резонансных вибраций дефектов

При УЗ стимуляции в области дефекта происходят изгибные деформации, деформации растяжения-сжатия и трение, что приводит к локальному увеличению УЗ потерь и локальному температурному нагреву материала, вызванному переходом части механической энергии в тепло, т.е. процессом её диссипации. Для описания дополнительных потерь вводят силу трения $f_{\text{тр}}$, которая пропорциональна скорости движущейся поверхности. При линейной связи внешних и внутренних сил трения, последние выражаются через первую степень скорости перемещений $\dot{q}$. Вынужденные колебания с линейными силами трения полностью определяются соответствием гармонического состава сил возбуждения и движения [61].

Мерой перемещения каждой точки тела являются относительные деформации. В связи с этим элементарные силы линейного внутреннего трения пропорциональны скоростям деформаций. Общее выражение для упруго-пластического (деформированного) напряженного состояния (по закону Гука) имеет вид [61]:

$$\sigma = E(\varepsilon + r_\sigma \dot{\varepsilon}); \quad \tau = G(\gamma + r_\tau \dot{\gamma}) \quad (4.6)$$

где ϵ – компонента напряжений при растяжении-сжатии, E – эластичность материала, ϵ – деформация растяжения-сжатия, $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации растяжения-сжатия, τ – компонента напряжений при кручении, γ – деформация кручения, $\dot{\gamma}$ – скорость деформации кручения, G – модуль сдвига, r_σ и r_τ – коэффициенты элементарного внутреннего трения.

При гармоническом характере движения уравнения деформации и компоненты напряжения имеют вид:

$$\epsilon = \epsilon_0 \sin \omega t; \epsilon = \epsilon_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (4.7)$$

Соотношения (4.6) графически отображаются петлей гистерезиса, которая ориентирована относительно прямой линии, описывающей закон Гука. Таким образом, силы трения «рассеивают» работу, пропорциональную площади эллипса ($S_{эл}$), которая находится интегрированием:

$$S_{эл} = 2 \int_{-\epsilon_0}^{\epsilon_0} \epsilon d\epsilon. \quad (4.8)$$

Площадь такого эллипса находится как [53, 61]:

$$S_{эл} = \pi \epsilon_0^2 E \eta. \quad (4.9)$$

Площадь эллипса эквивалентна удельным потерям энергии в объеме материала за один цикл колебаний. Тогда средняя тепловая мощность определяется как:

$$P_{тепл} = \frac{\Delta W}{\Delta t}, \quad (4.10)$$

где ΔW – потери энергии за один цикл, Δt – время одного цикла колебаний.

Время цикла колебаний определяется: $\Delta t = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$, где f – частота колебаний, ω – угловая частота.

Таким образом, мощность, затраченную на образование тепла в единице объема, можно найти как:

$$P_{тепл} = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \Delta W \times f = \frac{\pi \epsilon_0^2 E \eta \omega}{2\pi} = \frac{\epsilon_0^2 E \eta \omega}{2}, \quad (4.11)$$

где ϵ_0 – деформация пластины, E – модуль Юнга, η – коэффициент Пуассона.

$$P_{тепл} = \frac{\epsilon_0^2 E \eta \omega}{2} \quad (4.12)$$

Мощность, затраченная на образование тепла в объеме V , определяется:

$$P_{тепл} = \frac{\epsilon_0^2 E \eta \omega}{2} \times V \quad (4.13)$$

Исходя из выражения (4.13), генерируемая тепловая мощность пропорциональна частоте (ω) и квадрату амплитуды деформаций (ϵ_0) пластины, возникающих в результате вибраций. Поэтому, использование эффекта локального резонанса дефекта, который

способствует увеличению локальных вибраций в области дефектов, способствует повышению эффективности ИК термографии.

Определим температурный отклик материала в области дефекта, возникающий в результате УЗ нагружения объекта исследования в течение времени t .

Количество теплоты, выделяемое телом при нагреве:

$$Q = c_n m \Delta T, \quad (4.14)$$

где c_n – теплоемкость материала, m – масса материала, представляющая собой произведение плотности материала на его объем ($m = \rho \times V$).

Мощность, затраченная на нагрев, будет равна отношению количества выделяемого тепла ко времени ультразвуковой стимуляции:

$$P_{\text{тепл}} = \frac{Q}{t} = \frac{c_n \times m \times \Delta T}{t} = \frac{c_n \times \rho \times V \times \Delta T}{t} \quad (4.15)$$

Приравняв выражение (4.14) к выражению (4.15), получим:

$$\frac{c_n \times \rho \times V \times \Delta T}{t} = \frac{\epsilon_0^2 E \eta \omega}{2} \times V$$

Таким образом, изменение температурного сигнала описывается квадратичной зависимостью от амплитуды деформации:

$$\Delta T = \frac{\epsilon_0^2 \times E \eta \times \omega \times t}{2 c_n \times \rho} \quad (4.16)$$

Оценим температурный отклик дефекта на примере квадратного несквозного отверстия с плоским дном.

Вибрации на поверхности пластины нелинейно зависят от величины прогиба пластинки (Z) в области отверстия [62]:

$$\epsilon_0 = \frac{d}{2} \times \frac{d^2 Z}{dx^2}, \quad (4.17)$$

где d – толщина пластинки в зоне дефекта.

Распределение прогиба пластинки в квадратном отверстии с плоским дном при динамическом возбуждении, для основного резонанса, при собственных колебаниях пластины [63]:

$$Z = Z_m \times \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a}\right) \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right), \quad (4.18)$$

где Z_m – максимальное смещение центральной частицы пластинки из положения равновесия во время её колебательного движения, вызванного возбуждением частиц среды (амплитуда колебаний в центре пластинки); a, b – длины сторон прямоугольной пластинки.

Рассмотрим распределение колебаний пластины относительно оси x :

$$\frac{dZ}{dx} = Z_m \times \frac{2\pi}{a} \sin \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right)$$

$$\frac{d^2 Z}{dx^2} = Z_m \times \frac{4\pi^2}{a^2} \cos \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right)$$

Максимальное значение деформации пластины ε_0 в центре дефекта:

$$\varepsilon_0 = \frac{d}{2} \times \frac{d^2 Z}{dx^2} = \frac{d}{2} \times Z_0 \times \frac{4\pi^2}{a^2} \cos \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right) \quad (4.19)$$

Скорость ультразвуковой волны в зоне дефекта:

$$V_{LDR} = \omega \times Z_m, \quad (4.20)$$

где Z_m – максимальное смещение частиц среды относительно положения равновесия.

Тогда выражение для определения максимального смещения будет иметь вид:

$$Z_m = \frac{V_{LDR}}{\omega} = \frac{V_{LDR}}{2\pi f}, \quad (4.21)$$

где V_{LDR} – амплитуда виброскорости частиц материала в области дефекта.

Подставив Z_m в выражение для расчета деформации пластины ε_0 (4.19), получим:

$$\varepsilon_0 = \frac{d}{2} \times \frac{V_{LDR}}{2\pi f} \times \frac{4\pi^2}{a^2} \cos \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right). \quad (4.22)$$

Введем коэффициент K_{LDR} , характеризующий отношение амплитуд виброскорости частиц среды в области дефекта (V_{LDR}) и в бездефектной зоне (V_{input}):

$$K_{LDR} = \frac{V_{LDR}}{V_{input}}. \quad (4.23)$$

Тогда амплитуда виброскорости частиц среды в области дефекта определяется как:

$$V_{LDR} = K_{LDR} \times V_{input} \quad (4.24)$$

Подставив выражение (4.24) в формулу для расчета деформации пластины (4.19), получим:

$$\varepsilon_0 = \frac{d}{2} \times \frac{K_{LDR} \times V_{input}}{2\pi f} \times \frac{4\pi^2}{a^2} \cos \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right).$$

Возведем последнюю функцию в квадрат:

$$\varepsilon_0^2 = \frac{d^2 K_{LDR}^2 \times V_{input}^2 \times \pi^2}{f^2 \times a^4} \times \cos^2 \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right)^2 \quad (4.25)$$

Выражение для определения акустической мощности, переносимой звуковой волной через поперечную площадку (S), расположенную перпендикулярно распространению звука, полученное в Главе 2, имеет вид:

$$P_{ак} = \frac{\rho \times V_{input}^2 \times c \times S}{2}, \quad (4.26)$$

где ρ – плотность материала, V_{input} – амплитуда виброскорости колебания частиц среды в бездефектной зоне, c – скорость распространения акустической волны, S – площадь поперечного сечения, расположенного перпендикулярно направлению распространения звука.

Выразим из приведенной выше формулы V_{input}^2 :

$$V_{input}^2 = P_{ак} \frac{2}{\rho \times c \times S} \quad (4.27)$$

Подставим полученное выражение в формулу (4.25), получим:

$$\varepsilon_0^2 = \frac{2d^2 K_{LDR}^2 \times P_{ак} \times \pi^2}{f^2 \times a^4 \times \rho \times c \times S} \times \cos^2 \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right)^2. \quad (4.28)$$

Подставив выражение ε_0^2 в формулу для нахождения изменения температурного сигнала (4.16), получим:

$$\Delta T = \frac{2E \times \eta \times t \times d^2 \times K_{LDR}^2 \times P_{ак} \times \pi^3}{f \times c_n \times a^4 \times \rho^2 \times c \times S} \times \cos^2 \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right)^2 \quad (4.29)$$

Для нахождения теоретической величины изменения температурного отклика дефектной зоны воспользуемся выражением (4.16) для определения ΔT в области квадратного отверстия образца ПММА (R.ПММА), полученным выше:

$$\Delta T_{R.ПММА1} = \frac{2 \times 3 \times 10^9 \text{ Па} \times (0.02 \div 0.04) \times 1.44 \times 10^{-6} \text{ м}^2 \times \frac{40.93 \times 10^{-3} \text{ мм} \cdot \text{с}}{11.37 \times 10^{-3} \text{ мм} \cdot \text{с}} \times 17.9 \times 10^{-3} \text{ Вт} \times 30.96}{1500 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \times \text{К}} \times 121 \times 10^4 \text{ кг}^2 \cdot \text{м}^6 \times 8.56 \times 10^3 \text{ Гц} \times 16 \times 10^{-8} \text{ м}^4 \times 222.6 \text{ м} \cdot \text{с} \times 1.24 \times 10^{-4} \text{ м}^2} \times \cos^2 \frac{2\pi a}{2a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi b}{2b}\right)^2 ;$$

$$\Delta T_{R.ПММА1 \text{ теор}} = (0,025 \div 0,05)^\circ \text{К}.$$

Произведем проверку единиц измерения:

$$[\Delta T_{R.ПММА1}] = \frac{\text{м}^2 \times \text{Па} \times \text{с} \times \text{Вт}}{\text{Гц} \times \text{м}^4 \times \frac{\text{кг}^2}{\text{м}^6} \times \frac{\text{м}}{\text{с}} \times \text{м}^2 \times \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \times \text{К}}} = \frac{\text{К} \times \text{Н} \times \text{с}^2}{\text{кг} \times \text{м}} = \text{К}$$

В программе MathCad был произведен расчет колебаний тонкой прямоугольной пластинки в области квадратного отверстия ($15 \times 15 \text{ мм}^2$) с использованием выражений (4.17) и (4.18). Относительно координатных осей x и y , определяющих размера сторон отверстия в мм, эти колебания имеют вид:

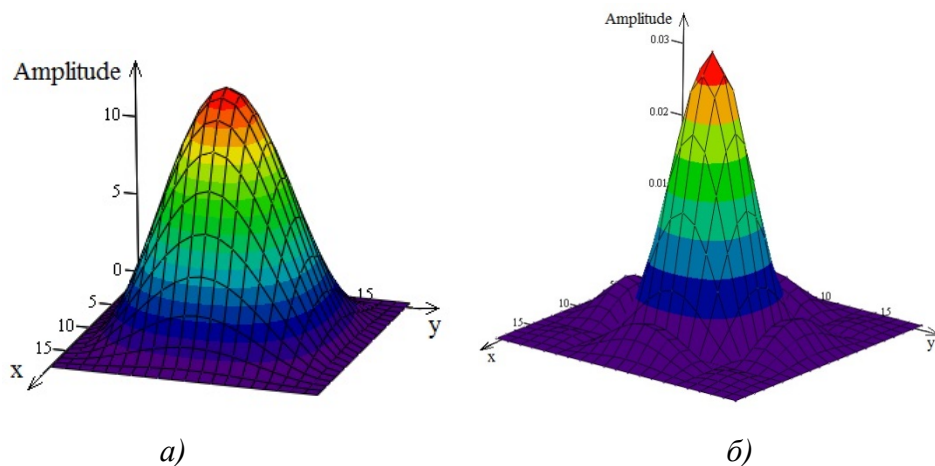


Рисунок 4.10 Распределения прогиба (а) и температурного отклика (б) пластины в области квадратного отверстия с плоским дном при динамическом возбуждении, для основной частоты резонанса отверстия, полученные в программе MathCad

Полученное выражение для определения температурного отклика дефекта (4.16) было применено для анализа температурного сигнала пластины из ПММА в области несквозного квадратного отверстия с плоским дном. Размеры пластины (R.PMMA1): длина $l_1 = 214$ мм, ширина $l_2 = 310$ мм, толщина $d = 4$ мм. Толщина пластины в области квадратного отверстия, расположенного в центре, составляет $h = 1,2$ мм, стороны квадратного отверстия равны и имеют длину 20 мм каждая.

Физические параметры ПММА заимствованы из работы [64]: коэффициент Пуассона $\eta = 0,02 - 0,04$, модуль Юнга $E = 3 \times 10^9$ Па, плотность $\rho = 1100 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, теплоемкость $c_n = 1500 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Экспериментальная величина основной частоты колебаний пластины из ПММА в области тонкой квадратного отверстия, измеренная с помощью лазерного вибromетра при УЗ стимуляции пластины широкополосным сигналом, составило $f_{0 \text{ эксп}} = 8,563$ кГц (Рисунок 4.11,а).

В результате проведения УЗ ИК термографии пластина из ПММА была подвергнута УЗ стимуляции на частоте основного резонанса квадратного отверстия в течение 10 секунд при уровне входного напряжения на пьезоизлучателе $U = 80$ В. Амплитуда температурного сигнала в области квадратного отверстия составила $\Delta T_{\text{эксп}} = 0,06$ °С (Рисунок 4.11,б).

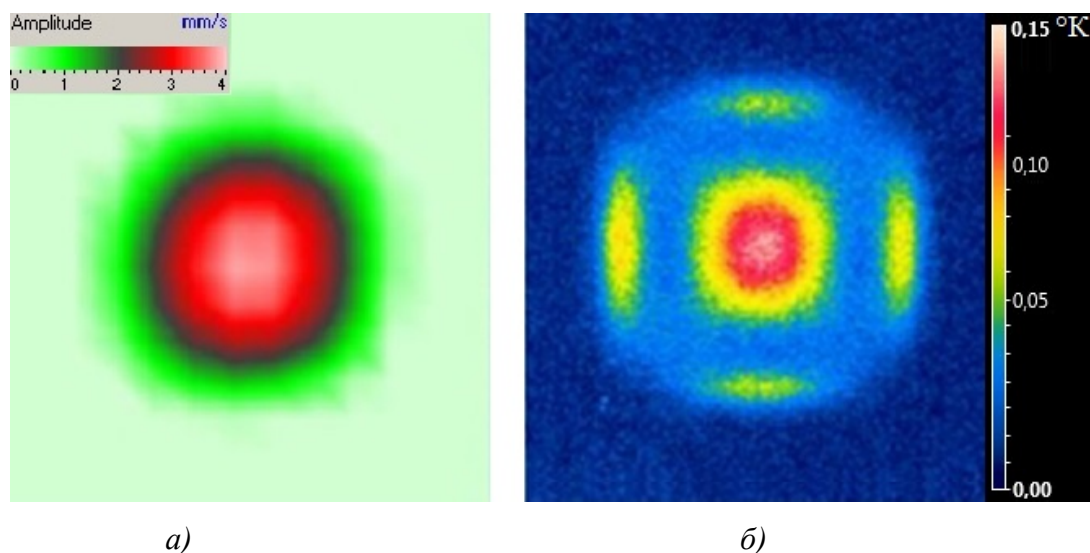


Рисунок 4.11 Картина вибраций (а) и термограмма (б) пластины из ПММА в области несквозного квадратного отверстия (20×20 мм²), полученные в результате нагружения пластины акустическим сигналом с частотой соответствующей частоте резонанса отверстия (8,563 кГц)

С помощью программы Comsol MultiPhysics был смоделирован процесс нагружения пластины R.PMMA1 акустическим сигналом с использованием пьезоэлектрического

преобразователя, причем все параметры были максимально приближены к реальным размерам образца пластины из ПММА и её физическим свойствам (Рисунок 4.12,а). Частота основного резонанса пластины в области квадратного отверстия, определенная программным путем, составила 8,225 кГц (Рисунок 4.12,б).

В результате моделирования процесса стимуляции пластины акустическим сигналом с частотой, соответствующей резонансу квадратного отверстия, было получено распределение температурного поля на поверхности пластины из ПММА и рассчитана амплитуда изменения температуры в области квадратного отверстия с плоским дном $\Delta T_{R.PMMA1 Comsol}$ (Рисунок 4.12,б): $\Delta T_{R.PMMA1 Comsol} = 0,04$ К.

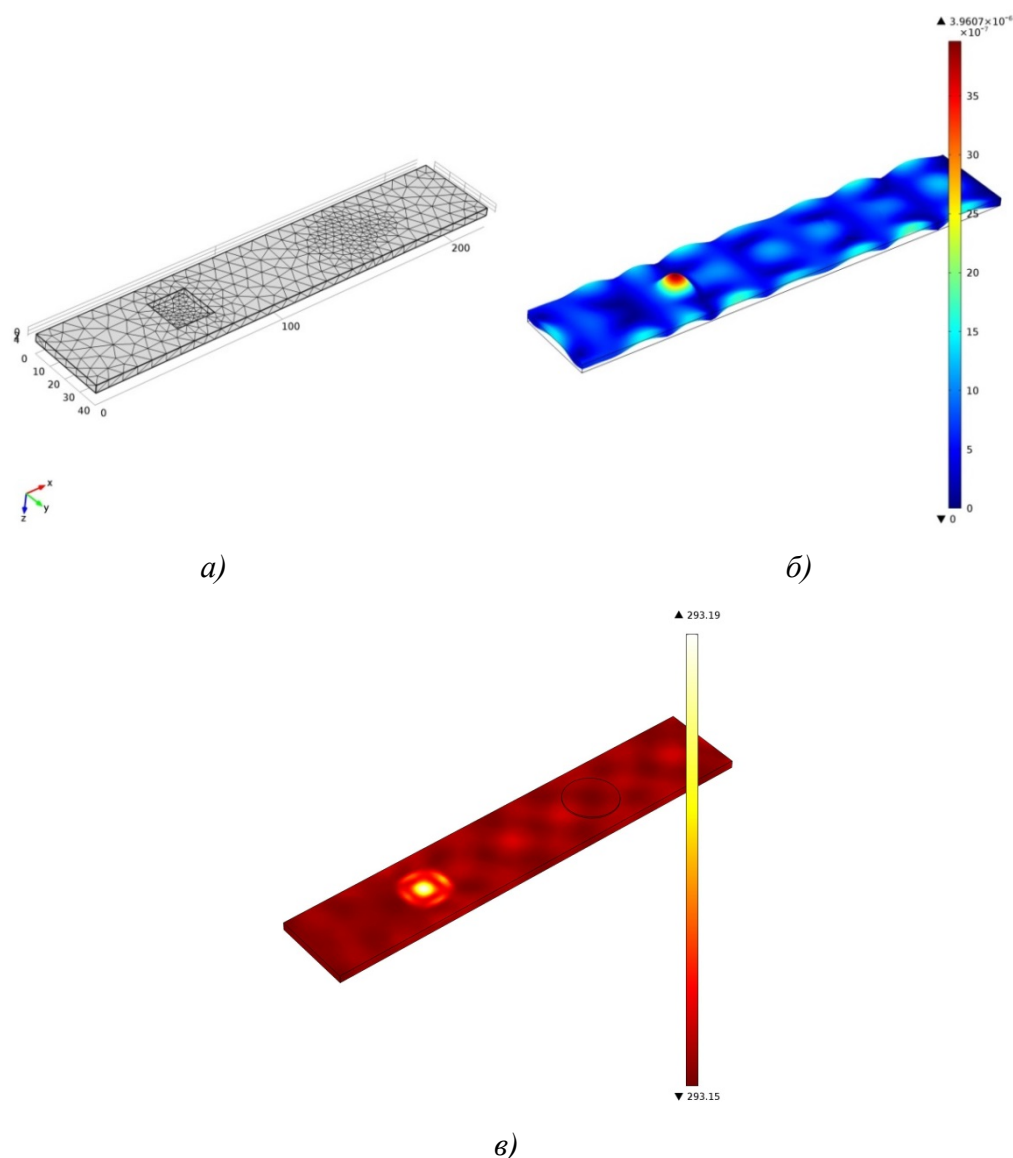


Рисунок 4.12 Изображение (а), картина деформации пластины (б) и термограмма (в) пластины R.PMMA1, полученные в результате моделирования температурного отклика образца R.PMMA1 при её акустической стимуляции на частоте резонанса (8,255 кГц) квадратного отверстия (программа Comsol MultiPhysic)

Экспериментальная величина изменения температуры образца в зоне дефекта ($\Delta T_{\text{эксп}} = 0,06 \text{ }^{\circ}\text{C}$) приблизительно совпадает с областью допустимых амплитуд температурного сигнала, рассчитанных теоретически ($\Delta T_{R.PMMA1 \text{ теор}} = (0,025 \div 0,05) \text{ }^{\circ}\text{C}$), и полученных с помощью моделирования процесса акустического нагружения пластины в программе Comsol MultiPhysics ($\Delta T_{R.PMMA1 \text{ Comsol}} = 0,04 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Результаты проведенных исследований свидетельствуют о хорошей корреляции экспериментальных данных с расчетными значениями и результатами моделирования.

Тепловыделение в области дефекта в зависимости от порядка резонансных гармоник

Резонансные вибрации, возникающие в области дефекта, вызывают значительные изгибные деформации, что приводит к локальному увеличению амплитуды температурного сигнала в этой области. Однако следует отметить, что тепловой сигнал дефекта, регистрируемый при акустическом нагружении объекта исследования с частотой, соответствующей частоте основного резонанса дефекта, многократно превосходит величину теплового сигнала, полученного при акустическом нагружении материала с частотой соответствующей частоте высших резонансных гармоник дефекта. Это не позволяет определить величину изменения температуры в области дефекта в последнем случае. Причиной данного явления является снижение интенсивности вибраций с увеличением порядка резонансных частот дефекта. Несмотря на это, использование высокочувствительной аппаратуры для регистрации теплового сигнала и программного обеспечения для обработки данных позволило получить фазовые изображения изменения температурного поля в области дефекта. Данный факт подтверждается экспериментальным исследованием вибраций на поверхности материала в области дефекта.

Как известно из [65], картины резонансных вибраций тонких пластин впервые были получены немецким музыкантом Хладни, который исследовал их с помощью сухого песка. В результате «прозвучивания» акустическим сигналом поверхности упругой пластины, покрытой тонким слоем песка, на поверхности исследуемого образца наблюдались накопления песка вблизи узловых линий, не подверженных вибрациям. Данные фигуры были систематизированы по количеству узловых колец (m) и пересекаемых линий (n) и получили название «фигур Хладни».

Ниже приведены результаты исследования вибраций и температурного отклика, регистрируемых на поверхности пластины из ПММА, ослабленной несквозным круглым отверстием диаметром 20 мм, при её последовательном нагружении акустическим сигналом с частотами, соответствующими резонансным частотам круглого отверстия в течение 10 секунд (Рисунок 4.13).

С помощью аппаратуры лазерной виброметрии были определены резонансные частоты вибраций пластины из ПММА в области отверстия: основная частота резонанса соответствовала 5,75 кГц, вибрации высших резонансных гармоник наблюдались на частотах 12,53 кГц (Рисунок 4.13,б); 19,19 кГц (Рисунок 4.13,в) и 27,88 кГц (Рисунок 4.13,г).

Благодаря использованию высокочувствительной ИК камеры IRCAM Equus 327 K (Германия), имеющую чувствительность 15 мК, и специализированного программного обеспечения для обработки данных, в результате эксперимента были получены фазовые изображения температурных градиентов в области круглого сквозного отверстия радиусом 10 мм при толщине пластины в области отверстия равной 1 мм.

Картинки вибраций и ИК термограммы пластины в области круглого отверстия, полученные экспериментально, были сравнены с классическими изображениями вибраций Хладни (Рисунок 4.13, и–м).

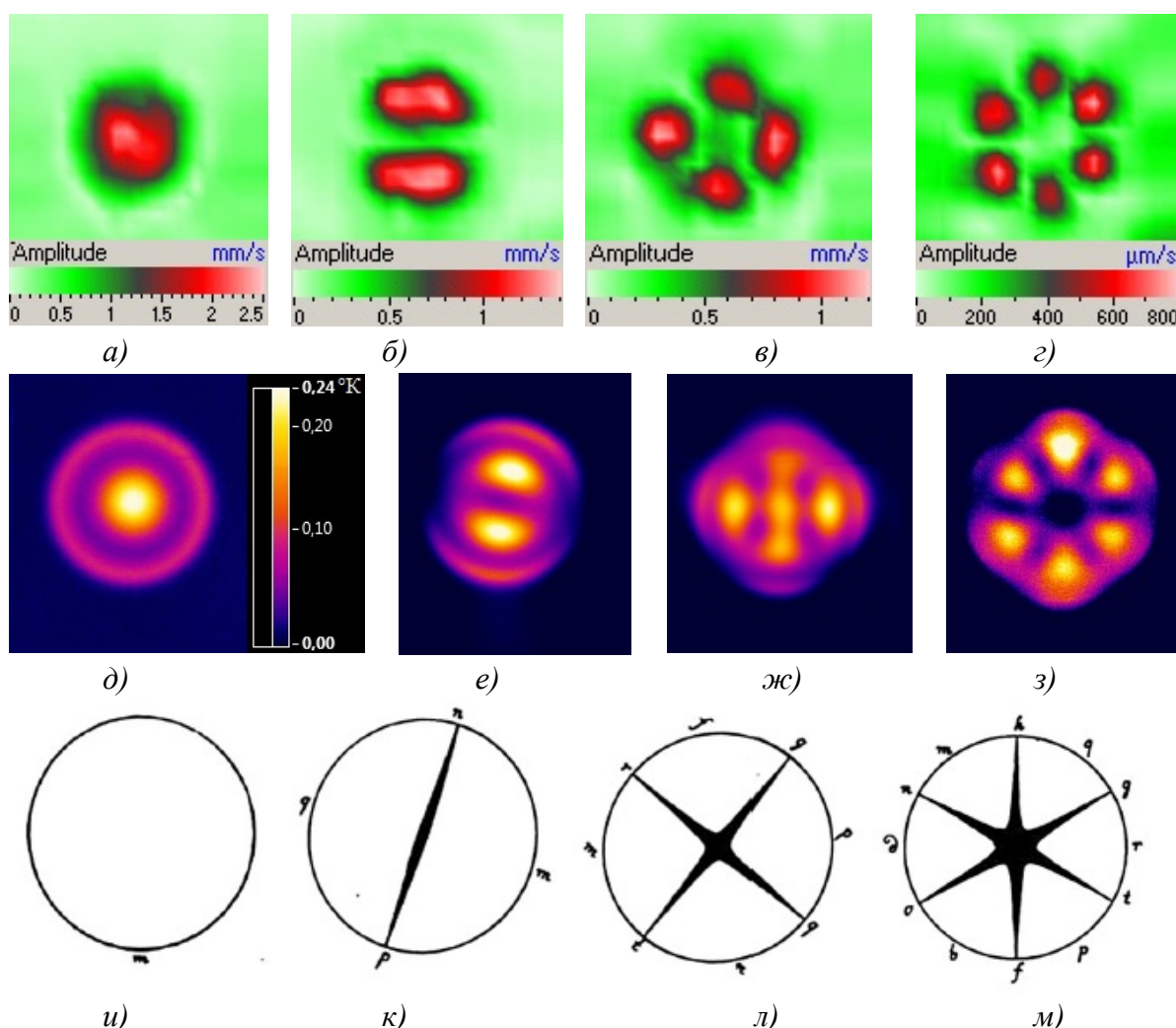


Рисунок 4.13 Картины вибраций (а–г), термограмма (д) и фазовые изображения (е–з) пластины ПММА в области сквозного круглого отверстия, полученные при её нагружении акустическим сигналом с частотой основного резонанса отверстия (5,75 кГц (а, д)) и его высших резонансных гармоник (12,53 кГц (б, е); 19,19 кГц (в, ж); 27,88 кГц (з, з). Сравнительные картины вибраций Хладни: (и–м)

Следует отметить, что фигуры Хладни цилиндрических резонаторов сопоставимы с картинами вибраций и тепловыми изображениями, полученными для пластины из ПММА в области круглого отверстия. Однако тепловые изображения имеют отличие от вибрационных картин, заключающееся в увеличении количества узловых колец на единицу ($m+1$) при количестве колец аналогичной частоты резонансной вибрации равном (m). При количестве пересекаемых линий (n) является одинаковым для картины вибраций и теплового изображения одной и той же резонансной частоты. Данный факт приводит к образованию дополнительных узловых линий и тепловых колец вблизи границ отверстия, которые из-за деформации растяжения-сжатия обеспечивают достаточно сильный нагрев и четкое изображение границ дефекта (Рисунок 4.13,б–з).

В отличие от изображений, полученных с помощью лазерной виброметрии, ИК термограммы, полученные при нагружении объекта акустическим сигналом с частотой его основного резонанса дефекта, позволяют визуализировать контуры дефектов и, следовательно, применимы для определения их реальных размеров. Однако многие исследователи полагают, что для получения полной информации о расположении и форме дефектов, ИК термограммы и картины вибраций, полученные для различных резонансных частот дефекта, должны быть суммированы между собой.

Следуя данной концепции, была исследована пластина из углепластикового композита (CFRP) толщиной 5 мм с заложенной тонкой металлической четырехугольной призмой малой толщины (размеры основания $27 \times 27 \text{ мм}^2$) (Рисунок 4.15,а). Картины вибраций пластины CFRP в области заложенного дефекта, возникающие при нагружении синусоидальным акустическим сигналом с частотой основного резонанса дефекта (8,56 кГц) (Рисунок 4.14,а) и его высших порядков (11,91 кГц; 15,38 кГц; 22,41кГц) приведены на Рисунке 4.14,б–г.

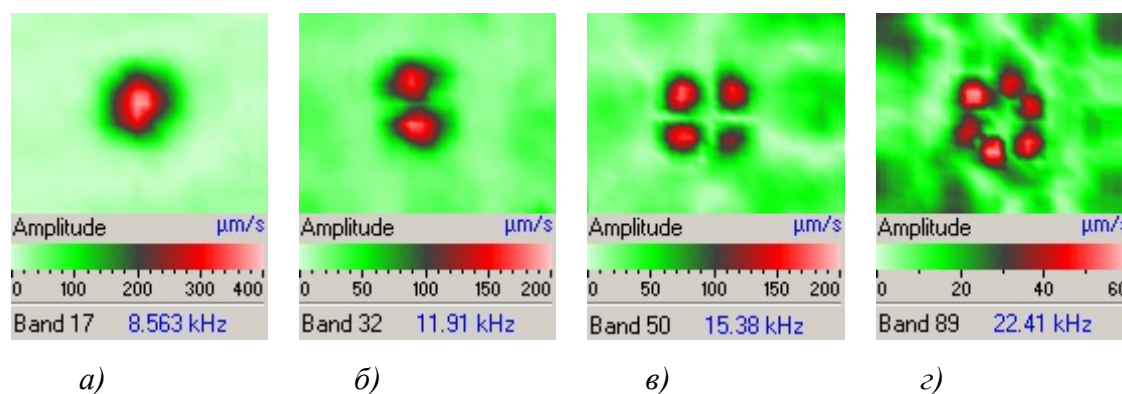


Рисунок 4.14 Изображения резонансных вибраций на поверхности углепластикового композита в области закладного дефекта в виде металлической правильной четырехугольной призмы малой толщины

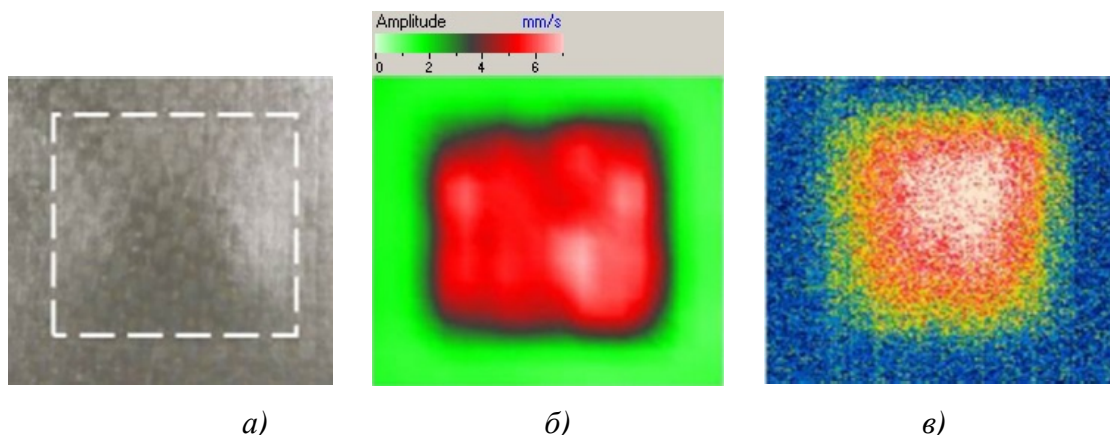


Рисунок 4.15 Изображение(а), результирующая картина вибраций (б) и фазовое изображение пластины CFRP материала в области заложенного дефекта при её нагружении широкополосным акустическим сигналом, модулированным по частоте в диапазоне от 1 до 200 кГц

В ходе нагружения пластины углепластикового композита акустическим сигналом, модулированным по частоте в диапазоне от 1 до 200 кГц при уровне выходного напряжения с генератора акустических сигналов равным 30 В, были получены результирующая картина вибраций и фазовое изображение температурного градиента в области заложенного дефекта (Рисунок 4.15, б, в). Данные результаты подтверждают необходимость использования широкополосного акустического сигнала для воспроизведения полной формы и размеров дефектов. Тем не менее, следует отметить проблему поддержания высокого уровня выходного сигнала с генератора (более 70 В) в режиме меняющейся частоты сигнала, поступающего на вход пьезопреобразователя, что обусловлено ограничениями технической аппаратуры и сложностью инженерной реализации данной задачи. Данная особенность приводит к слабой интенсивности вибраций, возникающих в области дефекта. В связи с этим, регистрируемые ИК изображения также будут характеризоваться низким отношением сигнал/шум, что приводит к необходимости извлечения фазового изображения из набора термограмм за счет применения преобразования Фурье. В данном направлении целесообразны дальнейшие исследования.

4.5. Эффективность резонансной УЗ ИК вибротермографии

Согласно выражению (4.16), с целью повышения эффективности вибротермографии, следует увеличить локальное напряжение ε_0 в плоскости дефекта. Традиционным способом решения данной задачи является повышение акустической мощности устройств, используемых для стимуляции объектов исследования с помощью аппаратуры мощной УЗ

ИК термографии. В то же время, в процессе резонансной вибротермографии, увеличение ϵ_0 происходит благодаря локальному резонансу в области дефектов с использованием сравнительно небольшой акустической мощности $P_{ак}$, вводимой в объект исследования.

Выполним исследование эффективности преобразования акустической мощности излучателей в тепловую мощность, рассеиваемую в области дефекта на примере тонкой пластины из ПММА, имеющей круглое несквозное отверстие в центре (Рисунок 4.2).

Для количественной оценки эффективности локального резонанса дефекта и оценки реальных значений $P_{ак}$, необходимых для получения достаточного уровня теплового сигнала дефекта, введем коэффициент усиления амплитуды резонанса дефекта $K = \frac{U_{LDR}}{U_{IN}}$, представляющий собой отношение амплитуды колебаний в области дефекта (U_{LDR}) и в бездефектной зоне (U_{IN}).

С физической точки зрения ясно, что в общем случае увеличение резонансных вибраций U_{LDR} (или K) приводит к интенсификации деформаций изгиба и растяжения-сжатия внутри области дефекта и, следовательно, активной теплогенерации в этой зоне.

Экспериментально было изучено влияние локального резонанса дефектов на эффективность теплогенерации в этих зонах для четырех пластин из ПММА, ослабленных круглыми несквозными отверстиями. Геометрические параметры образцов приведены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1–Геометрические параметры пластин ПММА материала, ослабленных несквозными отверстиями круглой формы

Плотность ρ , кг/м ³	Длина образца L, м	Ширина образца, м	Толщина образца, м	Толщина образца в зоне отверстия, мм	Площадь поперечного сечения S, м ²	Теплоемкость ПММА (с), Дж/(кг×К).
1100	0,282	0,04	0,004	0,95–1,15	0,00012	1500

В качестве излучателей акустического сигнала были использованы дискообразные пьезокерамические преобразователи (ПЭП) FT-27T (Германия), приклеенные к поверхности образца эпоксидной смолой. Входное напряжение амплитуды до 50 В от функционального генератора HP 33120A через усилитель напряжения HVA 3/450 было приложено к ПЭП для возбуждения изгибных волн в диапазоне частот от 1 до 150 кГц. Для оценки величины акустической мощности, вводимой в образцы, был использован сканирующий лазерный виброметр, с помощью которого проводили измерения в режиме оценки виброскорости

частиц среды. Тепловое поле на поверхности пластин регистрировали с помощью ИК камеры (IRCAM Equus 327K, температурное разрешение ≈ 15 мК).

В результате лазерного сканирования для каждого исследуемого образца были определены колебательные скорости частиц ПММА в области несквозных отверстий (V_{LDR}) и в бездефектной зоне (V_{input}), а также найдена частота резонанса пластины в области дефекта (f_{LDR}) и измерена длина акустической волны, распространяющейся в материале (λ). По результатам вибросканирования были рассчитаны коэффициенты усиления амплитуды резонансных вибраций дефектов (K_{LDR}) для каждого образца из ПММА материала в области отверстия. Подставив физические свойства ПММА материала, приведенные выше, в выражение (4.26) для определения акустической мощности ПЭП, переносимой акустической волной через пластину в области отверстия, и в выражение (4.13) для определения тепловой мощности, выделившейся в процессе акустического нагружения объектов исследования, были определены значения $P_{ак}$ и $P_{тепл}$. Для количественной оценки эффективности преобразования акустической мощности ($P_{ак}$) в тепловую ($P_{тепл}$) нами введен коэффициент $N = \frac{P_{тепл}}{P_{ак}} \times 100\%$.

В результате проведения УЗ ИК термографии была определена амплитуда температурного сигнала в области несквозного отверстия (ΔT) при амплитудном значении входного напряжения на пьезоизлучателе равном 50 В. Результаты экспериментальных исследований и расчетные значения приведены в Таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Экспериментальные результаты УЗ ИК термографического контроля и вибросканирования четырех образцов из ПММА материала, ослабленных несквозными отверстиями круглой формы

№ образца	f_{LDR} , Гц	V_{LDR} , мм/с	V_{input} , м/с	λ , м	ΔT , °C	K_{LDR}	$P_{ак}$, мВт	$P_{тепл}$, мВт	N
ПММА 1	11000	60,6	9	0,04	0,52	6,7	52,5	2,4	4,6
ПММА 2	12480	53,0	2,73	0,036	0,145	19,4	4,3	0,8	18,6
ПММА 3	7672	41,0	2,0	0,034	0,12	20,5	1,8	0,5	27,8
ПММА 4	14780	26,2	3,46	0,045	0,045	7,6	10,7	0,2	1,9

Согласно Таблицы 4.2, наиболее эффективное преобразование акустической мощности ПЭП в тепловую в области дефекта наблюдается в образце ПММА 3, имевшем самый высокий коэффициент усиления амплитуды резонанса дефекта в области отверстия $K = 20,5$. Повышение температуры составило 0,12 °C при 1,8 мВт вводимой акустической мощности, из чего следует, что в этом образце преобразование акустической

мощности в тепловую более эффективно, чем в образце ПММА 1. Результаты исследований, приведенные в Таблице 4.2, подтверждают целесообразность применения аппаратуры маломощной УЗ резонансной вибротермографии для получения необходимого уровня теплового отклика дефектов исследуемых материалов.

Рисунок 4.16 демонстрирует динамику теплового отклика в области круглого отверстия с плоским дном в образце ПММА1: амплитуда изменения температурного сигнала в области круглого отверстия линейно зависит от уровня входной акустической мощности ПЭП. Полученные результаты также демонстрируют высокую эффективность вибротермографии: при акустической мощности преобразователя около 200 мВт изменение температуры в центральной части круглого отверстия в течение 15 секунд УЗ нагружения составило около 3 °С.

Основной вклад локального резонанса дефекта в процесс генерации тепла был определен путем определения зависимости температурного сигнала в области дефекта от частоты вводимого акустического сигнала (Рисунок 4.17). Даже незначительное (2–3 %) отклонение частоты акустического сигнала от частоты резонанса дефекта приводит к уменьшению амплитуды температурного сигнала в этой области до критично низкого уровня 10–20 мК, что сопоставимо с уровнем шума, а также приводит к снижению эффективности преобразования акустической мощности в тепловую более чем на 2 порядка. Сильная зависимость температурного отклика от частоты акустического сигнала является следствием наличия квадратичной нелинейности в акустико-тепловом преобразовании (выражение (4.13)). Данный факт проиллюстрирован на Рисунке 4.16 совпадением АЧХ круглого отверстия с плоским дном (приведенного на Рисунке 4.5,а) и его измеренного теплового отклика.

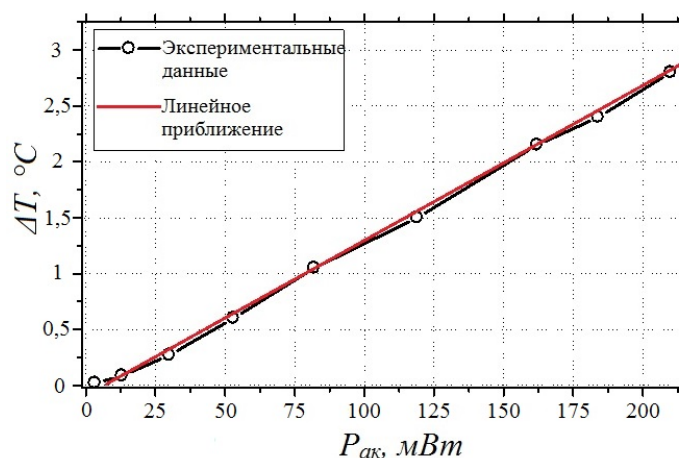


Рисунок 4.16 Зависимость амплитуды температурного сигнала пластины ПММА1 в области круглого отверстия (частота резонанса 11 кГц) от уровня акустической мощности излучателя

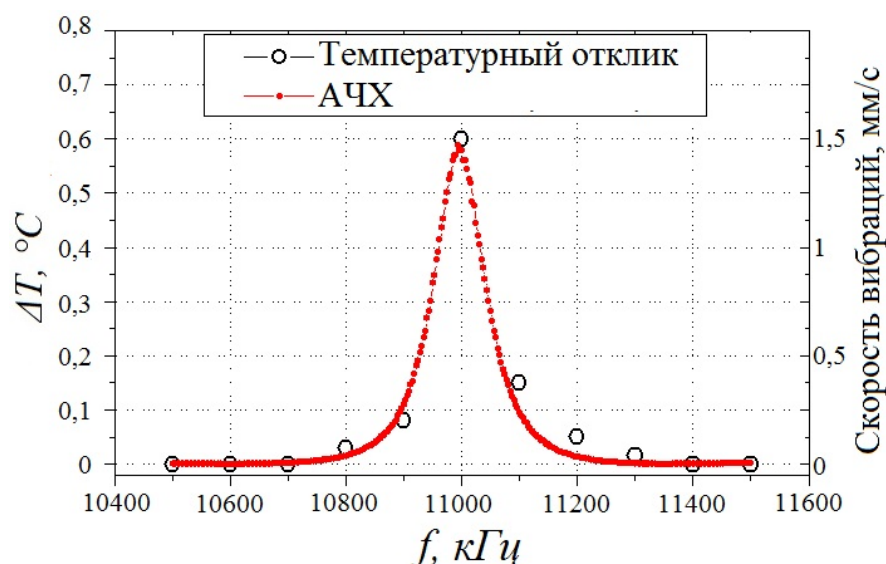


Рисунок 4.17 Изменение амплитуды теплового отклика образца ПММА 1 в области круглого отверстия в зависимости от частоты акустического сигнала

4.6. Перспективные направления исследований

Исследование сложных ударных повреждений в композиционных материалах.

Применение УЗ спектроскопии для определения резонансных частот дефектов при УЗ нагружении объекта контроля в широком диапазоне частот с последующим сканированием с помощью лазерного виброметра обусловлено необходимостью обеспечить совпадение частоты резонанса дефекта с частотой акустических волн, вводимых в исследуемый материал, что, в свою очередь, необходимо для достижения максимальной деформации в дефектной области и исключения появления стоячих волн.

Данный метод был применен для контроля качества пластины из углепластикового композита с ударным повреждением энергией 16 Дж (Рисунок 4. 21,а). Используя ПЭП для УЗ стимуляции композита в диапазоне от 0 до 100 кГц с последующим контролем вибраций на всей поверхности материала, были получены АЧХ в каждой точке сканирования образца. Сетка сканирования составила 100×100 точек при размерах пластины 150×100 мм². На Рисунке 4.18 приведены вибрации поверхности материала на различных частотах, измеренные с помощью трехкомпонентного сканирующего лазерного виброметра PSV-500-3D. Полученные изображения подтверждают, что дефект поддается идентификации только в случае соответствия его резонансной частоты частоте стимулирующих УЗ волн. В частности, в исследуемом образце пластические деформации наблюдались в широком частотном диапазоне, начиная от 1 и 5,88 кГц (Рисунок 4.18,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 4.18,в, г).

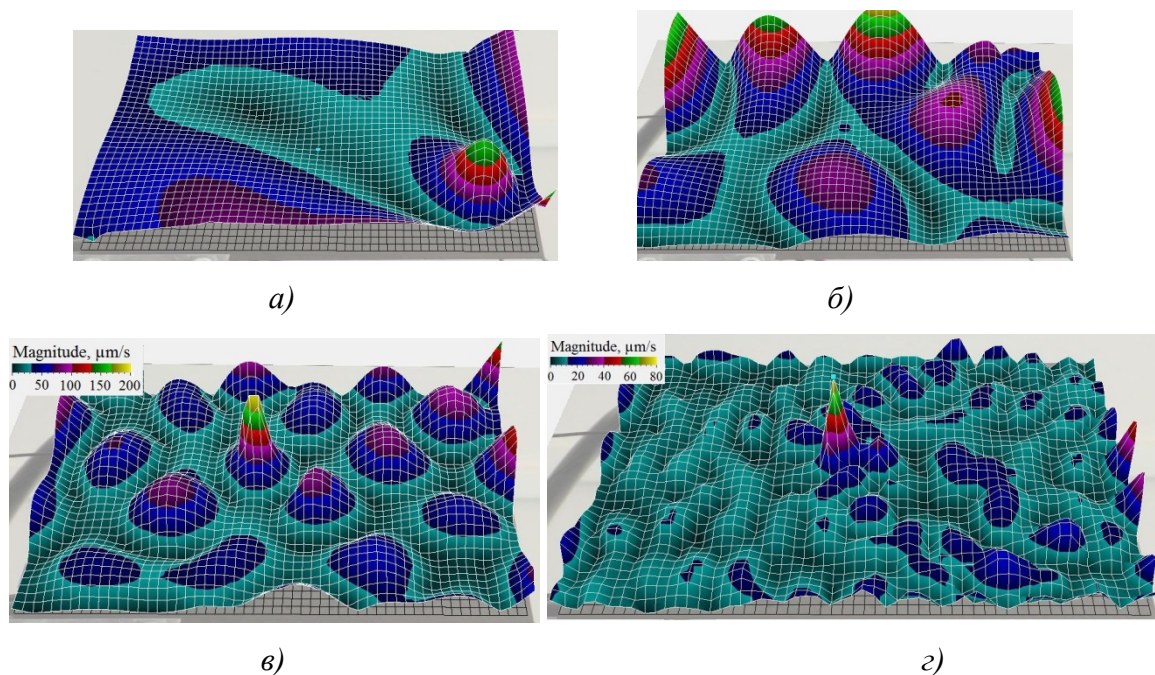


Рисунок 4.18 Изображения вибраций поверхности образца из углепластикового композита на частотах 1 кГц (а) и 5,88 кГц (б) без проявления дефекта и на резонансных частотах 16,75 кГц (в) и 50,75 кГц (г)

Вследствие неоднородной структуры композитов энергия удара также распределяется в материале неравномерно, при этом картины деформации и разрушения зависят от ориентации волокон. В большинстве случаев это приводит к образованию многослойных расслоений в композитах, которые являются самостоятельными резонаторами с набором характерных резонансных частот в широком диапазоне. Исследованный образец наглядно иллюстрирует эту особенность ударных повреждений, что отражено на АЧХ (Рисунок 4.19). На графике приведены амплитудные значения скорости вибраций (v_0 , мкм/с) в области локальных резонансов сложного дефекта (V_{LDR}) и в бездефектных зонах (V_{input}).

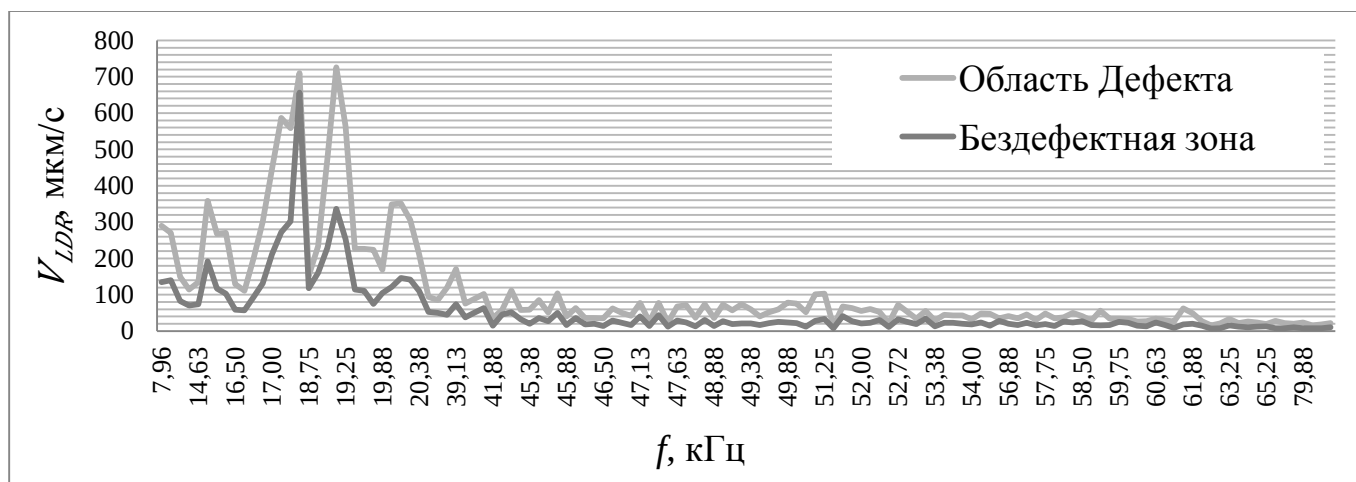


Рисунок 4.19 АЧХ пластины из углепластикового композита CFRP в области ударного повреждения (область дефекта) и в бездефектной зоне, полученные с помощью аппаратуры сканирующей лазерной виброметрии

График изменения коэффициента поглощения акустической энергии (дБ) в области ударного повреждения на резонансных частотах дефекта приведен ниже (Рисунок 4.20).

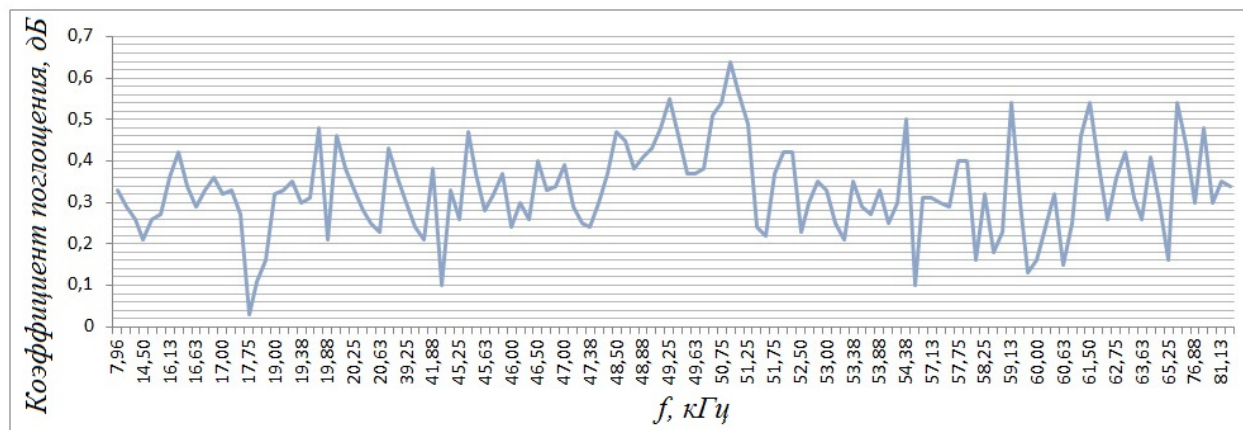
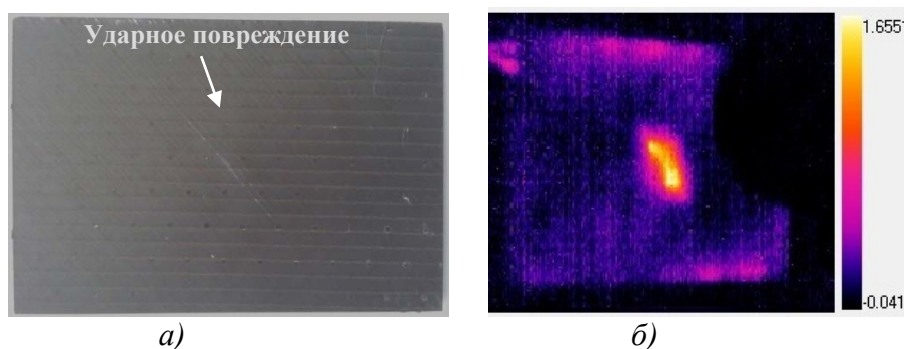


Рисунок 4.20 Коэффициент поглощения УЗ волн в области ударного повреждения углепластика на резонансных частотах дефекта

Поскольку ударное повреждение представляет собой конгломерат более «простых» дефектов – микротрещин, объединенных в макротрещины и расслоения – полная картина повреждения при первичной обработке данных может быть получена в результате сканирования путем сложения вибрационных картин, полученных на отдельных частотах. На Рисунке 4.21,а приведена фотография исследованного образца углепластикового композита; результирующая картина вибраций представлена на Рисунке 4.21,б. Видно, что вибрационный «отпечаток» ударного повреждения по форме напоминает «бабочку», что соответствует визуальному и, в особенности, УЗ ИК термографическому изображению данного дефекта (Рисунок 4.21,в, г).



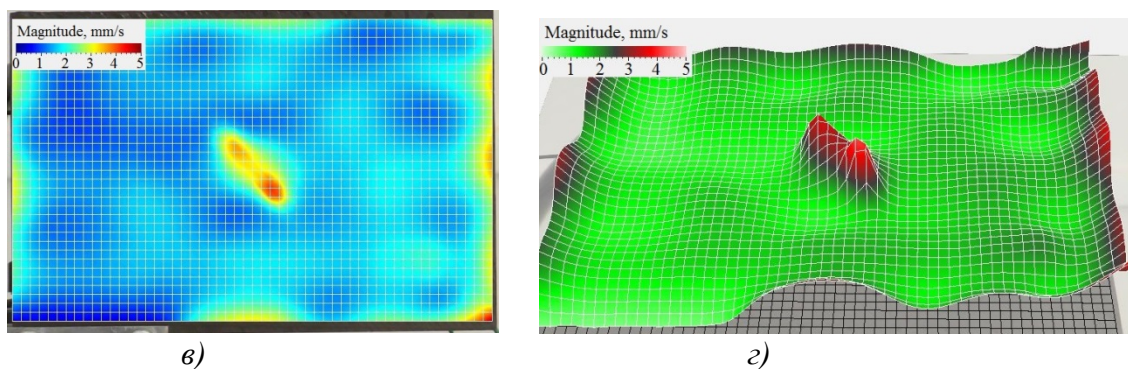


Рисунок 4.21 Изображение образца углепластикового композита (а), ИК термограмма композита при его УЗ нагружении с использованием мощной УЗ установки на основе магнитостриктора (б), двумерная (в) и трехмерная (г) суммарные картины вибраций в режиме широкополосного сканирования в диапазоне частот от 0 до 100 кГц

Детальное исследование дефектной зоны было выполнено путем более тщательного анализа резонансных частот, определенных ранее. В ходе повторного нагружения изделия на резонансной частоте дефекта, с помощью лазерного сканирования в режиме быстрого преобразования Фурье, благодаря активации вибраций высших резонансных гармоник, была определена максимально достоверная картина расположения структуры дефекта. Из Рисунка 4.22 видно, что вибрационное изображение дефектной зоны является более детальным по сравнению с ИК термограммой.

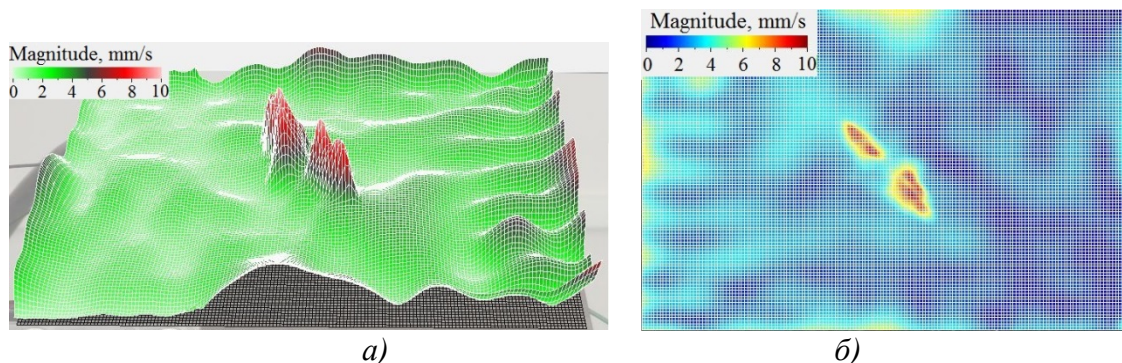


Рисунок 4.22 Двухмерная (а) и трехмерная (б) суммарные картины вибраций в режиме быстрого преобразования Фурье на частоте резонанса дефекта 7,96 кГц

Другой пример применения резонансной УЗ ИК вибротермографии для обнаружения локальных ударных повреждений в композиционных материалах приведен на Рисунке 4.23 на примере пластины из углепластика размером (270×40×1 мм³).

Путем исследования образца с помощью сканирующей лазерной виброметрии путем широкополосного возбуждения посредством УЗ пьезоэлектрического преобразователя, была определена частота резонанса дефекта, которая составила 109,3 кГц (Рисунок 4.23,б).

Акустический частотный отклик дефекта приведен на Рисунке 4.24,а. В отличие от гладкой АЧХ пластины из ПММА в области несквозного круглого отверстия (Рисунок 4.5,а),

резонансная кривая для ударных повреждений не настолько четкая, что связано с резонансами слабо связанных частей дефекта. Данный эффект также проявляется на тепловой АЧХ (Рисунок 4.24,б), отображающей зависимость амплитуды изменения температурного сигнала в области дефекта ($\Delta T, K$) от частоты подаваемого акустического сигнала (f) при акустической мощности пьезопреобразователя, равной ~ 100 мВт.

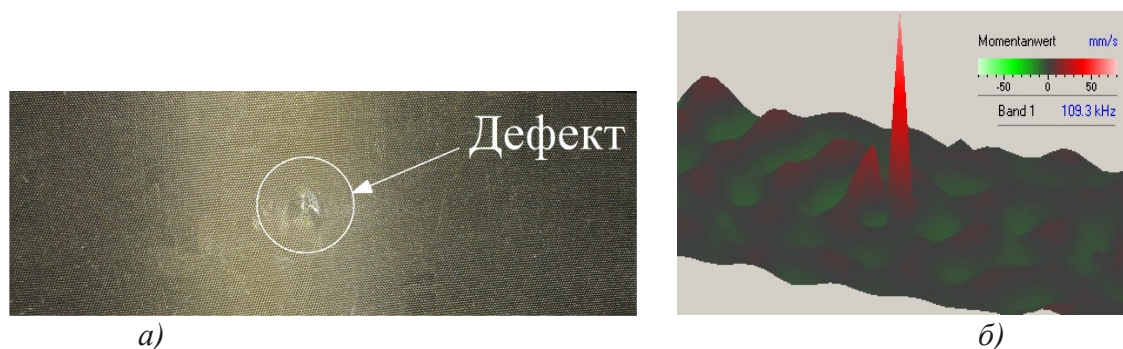


Рисунок 4.23 Фотография дефекта (а) и картина вибраций (б) поверхности пластины из углепластика CFRP с ударным повреждением в центре

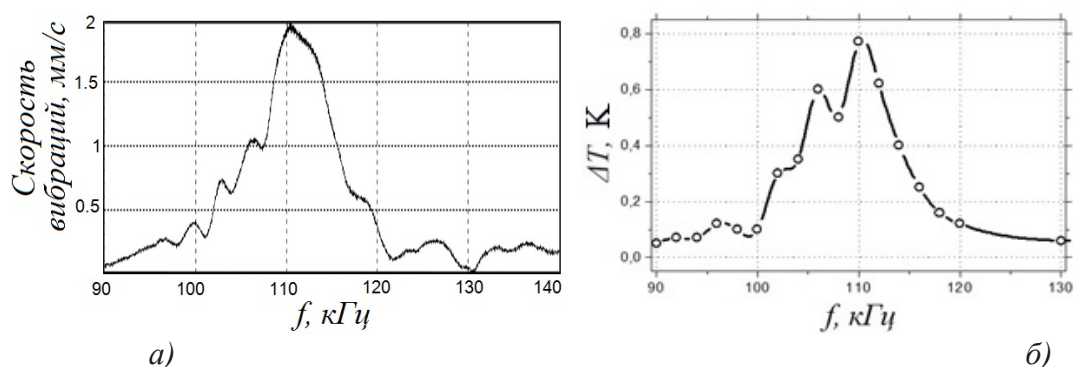


Рисунок 4.24 Изменение амплитуды скорости вибраций (а) и температурного отклика (б) в области дефекта пластины углепластикового композита в зависимости от частоты акустического сигнала

Температурный отклик дефекта, приведенный на Рисунке 4.25, демонстрирует высокую эффективность преобразования вводимой акустической мощности ~ 175 мВт в тепловой сигнал $\Delta T = 1,4$ °С, благодаря чему становится возможным получение ИК изображения поверхности образца с высоким контрастом бездефектной зоны и области ударного повреждения (Рисунок 4.25).

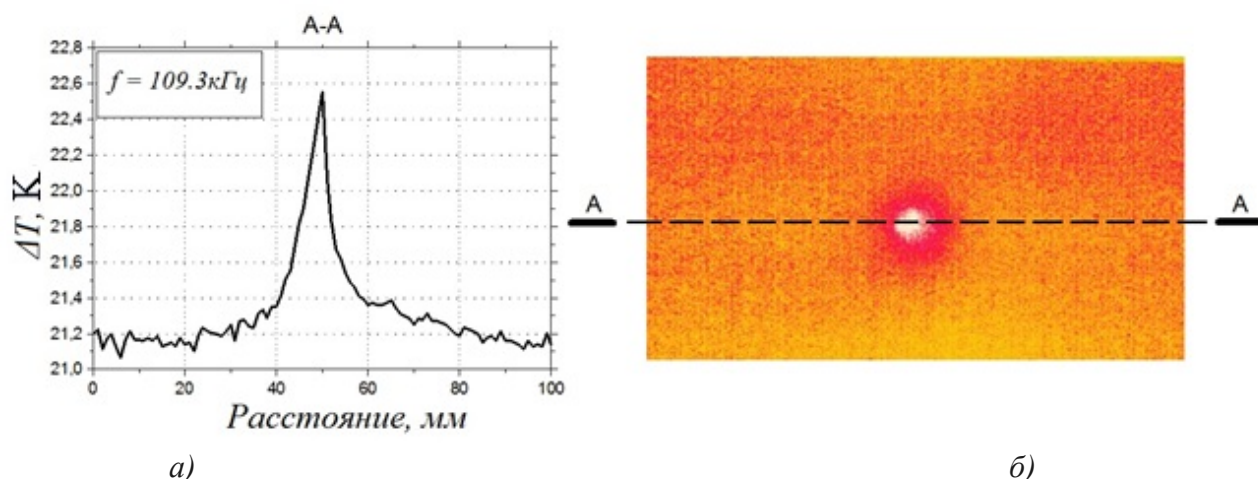


Рисунок 4.25 Температурный сигнал на поверхности пластины из углепластика (а) и ИК изображение поверхности образца с ударным повреждением размером (5×5 мм²) в центре (б)

Из полученных результатов следует, что значительный локальный рост температуры в области дефектов за счет явления резонанса повышает отношение сигнал/шум в результирующих ИК термограммах, что впоследствии может быть улучшено путем использования модулированного по амплитуде и частоте импульсного сигнала и специализированного программного обеспечения.

Бесконтактная резонансная УЗ ИК термография

Использование концепции локального резонанса дефекта позволяет использовать УЗ излучатели для ввода акустических сигналов через воздух (ACU) и проведения бесконтактной УЗ ИК термографии. В этих исследованиях нами были использованы воздушно-связанные резонансные излучатели (Ultran ACU, США), работающие на частоте собственного резонанса ($\sim 50 \text{ кГц}$ и $\sim 70 \text{ кГц}$), которые также соответствовали заранее определенной частоте резонанса исследуемых дефектов. Датчики были размещены в нескольких сантиметрах от зоны дефекта, в то время как ИК камера регистрировала тепловой сигнал с противоположной стороны объекта (Рисунок 4.26,а).

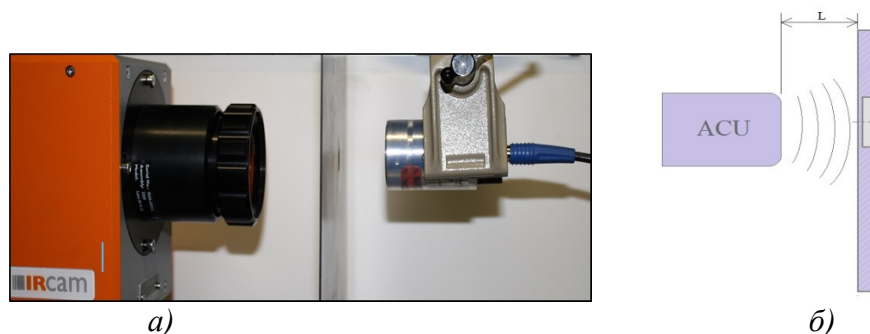


Рисунок 4.26 Фотография (а) и схема (б) установки для проведения бесконтактной УЗ ИК термографии

Возможность использования бесконтактных УЗ излучателей для проведения резонансной УЗ ИК термографии была продемонстрировано на пластине из ПММА, ослабленной круглым несквозным отверстием в центре (как показано на Рисунке 4.26,б). Предварительно, в результате нагружения пластины широкополосным акустическим сигналом (от 1 Гц до 100 кГц) с помощью пьезопреобразователя и сканирования поверхности материала лазерным виброметром, была определена частота локального резонанса пластины из ПММА в области круглого отверстия: $f = 50$ кГц. Картина вибраций пластины в области отверстия на частоте резонанса дефекта приведена на Рисунке 4.27.

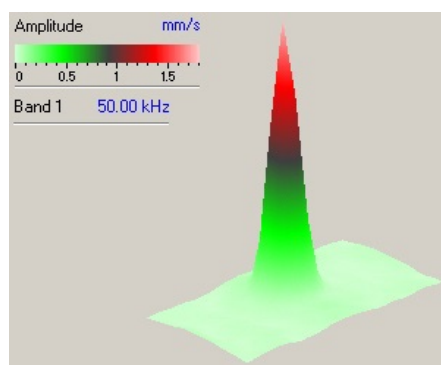


Рисунок 4.27 Картина вибраций пластины из ПММА в области несквозного круглого отверстия при стимуляции акустическим сигналом с частотой резонанса отверстия, равной 50 кГц

В результате контроля вибраций на поверхности пластины из ПММА в процессе её нагружения акустическим сигналом с частотой резонанса круглого отверстия с помощью воздушного УЗ преобразователя (ACU), как показано на Рисунке 4.26,б, была получена зависимость максимальной амплитуды вибраций пластины в зоне дефекта (Amplitude LDR) от расстояния между излучателем и пластиной (L) Рисунке 4.28. Результаты измерения приведены в Таблице 4.3.

Таблица 4.3 Зависимость скорости вибрации локального резонанса дефекта от расстояния между излучателем и пластиной

L, мм	10	0	30	40	50	60	70
Скорость вибраций, мм/с	3,84	2	1,57	1,52	0,9	0,35	0,06

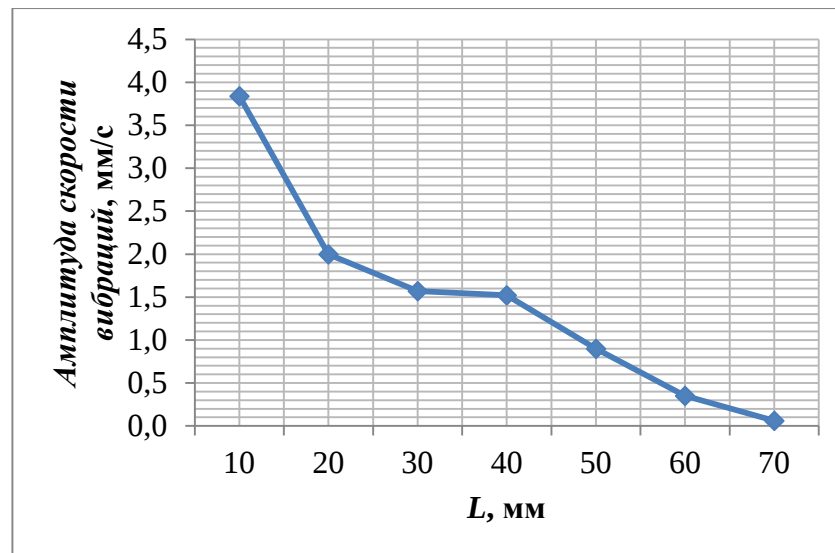


Рисунок 4.28 Зависимость амплитуды вибрации пластины из ПММА в области круглого отверстия от расстояния между воздушным УЗ излучателем и дефектом

Как видно из полученных данных, амплитуда колебания пластины в области отверстия возрастает с уменьшением расстояния между излучателем и пластиной. При дальнейших исследованиях пластины из ПММА было принято оптимальное расстояние $L = 10 \text{ мм}$.

Для определения акустической мощности воздушного УЗ преобразователя, воспользуемся радиометром, как показано на Рисунке 4.29. Схема устройства представляет собой фольгированную пластину массой m , подвешенную на тонкой нити длиной 100 мм к устойчивой опоре. Расстояние между пластиной и воздушным УЗ преобразователем равно L .

При включении преобразователя, под действием ультразвука, фольгированная пластинка отклоняется на угол α .

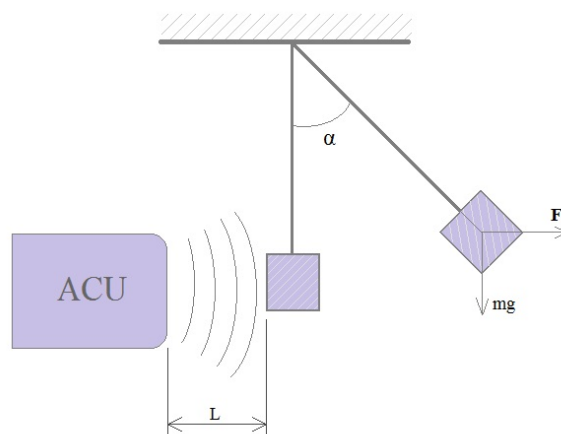


Рисунок 4.29 Схема определения акустической мощности воздушного УЗ преобразователя с помощью радиометра

Выражение для определения акустической мощности воздушного преобразователя имеет вид:

$$P_{\text{ак}} = \frac{F_0 \times c}{2}, \quad (4.30)$$

где $c = 331$ м/с – скорость звука в воздухе; F_0 – сила, действующая на пластину;

$$F_0 = m \times g \times \tan \alpha, \quad (4.31)$$

где $m = 36 \times 10^{-6}$ кг – масса фольгированной пластины.

Определим угол отклонения на радиометре при различном уровне входного напряжения, прикладываемого к излучателю. Расстояние между излучателем и фольгированной пластинкой $L = 10$ мм. Рассчитаем акустическую мощность преобразователя при напряжении $U = 100$ В. Угол отклонения радиометра в ходе эксперимента составил $\alpha = 5^\circ$. В этом случае, сила, действующая на пластинку, равна:

$$F = 3.5 \times 10^{-4} \times 7.9 \times 10^{-2} = 2.765 \times 10^{-6} \text{ Н};$$

$$F_{100\text{В}} = (2.6 \pm 0.1) \times 10^{-5} \text{ Н}.$$

Акустическая мощность воздушно-связанного преобразователя:

$$P_{\text{ак}100\text{В}} = \frac{(2.6 \pm 0.1) \times 10^{-5} \times 331 \text{ м/с}}{2} = (4.3 \pm 0.16) \times 10^{-3} \text{ Вт}.$$

По аналогичной методике была определена акустическая мощность воздушно-связанного преобразователя при изменении уровня входного напряжения, прикладываемого к УЗ преобразователю, в диапазоне от 10 до 90 В. Результаты приведены в Таблице 4.4.

С помощью ИК тепловизора экспериментально была получена зависимость изменения температуры в области круглого отверстия в пластине ПММА, от уровня входного напряжения при воздействии на образец сигналом УЗ частоты (50 кГц) с помощью воздушно-связанного преобразователя в течение 10 секунд при каждом измерении. Данные эксперимента приведены ниже, в Таблице 4.4.

Таблица 4.4 Изменение температуры в области отверстия с плоским дном от изменения уровня входного напряжения, измеренное с помощью ИК камеры

U, В	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\Delta T_{\text{эксперимент}},$ К	0,02	0,06	0,11	0,19	0,31	0,44	0,57	0,70	0,85
Рак, мВт	0,043	0,17	0,69	1,18	1,55	2,11	2,75	3,48	3,95

График изменения температурного сигнала, зарегистрированного в области круглого отверстия с плоским дном в пластине из ПММА, в зависимости от уровня акустической мощности воздушно-связанного УЗ пьезокерамического преобразователя (Рисунок 4.30) демонстрирует повышение температуры в области отверстия на $0,85$ °С, что доказывает возможность обнаружения дефектов с помощью данного вида излучателей совместно с техникой локального резонанса дефекта и при акустической мощности излучателей всего в несколько мВт.

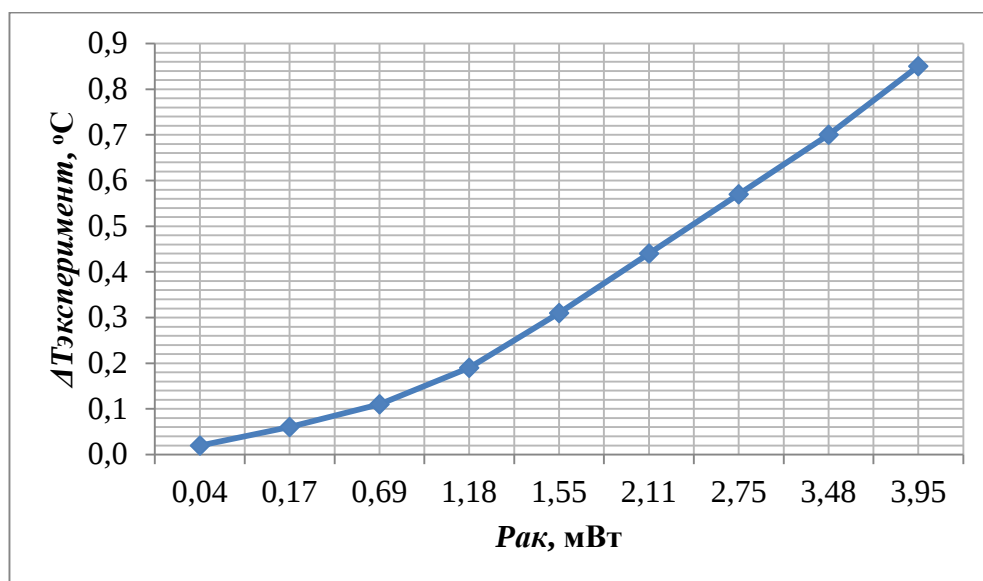


Рисунок 4.30 Зависимость изменения температуры в области отверстия с плоским дном от уровня акустической мощности воздушно-связанного УЗ излучателя

Другой пример применения резонансной УЗ ИК вибротермографии с использованием воздушно-связанного пьезокерамического излучателя для обнаружения локальных ударных повреждений в композиционных материалах рассмотрен ниже на примере пластины из углепластика размером (270×40×1 мм³), показанной на Рисунке 4.31.

С помощью сканирующей лазерной виброметрии при возбуждении образца посредством УЗ воздушно-связанного пьезопреобразователя, работавшего на резонансной частоте 120 кГц, была определена частота резонанса дефекта, которая составила 113,3 кГц (Рисунок 4.31). Данные результаты имеют незначительное расхождение с полученными ранее значениями резонансной частоты ударного повреждения (109,3 кГц), полученными при вибросканировании пластины CFRP в процессе её широкополосного нагружения с помощью контактного пьезоизлучателя.

Путем лазерного сканирования пластины при УЗ стимуляции материала акустическим сигналом с частотой резонанса дефекта были получены следующие результаты: амплитуда скорости вибраций в области ударного повреждения $V_{LDR} = 6,19$ мм/с, амплитуда скорости вибраций в бездефектной зоне $V_{input} = 867$ мкм/с, длина распространяющейся в пластине акустической волны $\lambda = 0,01$ м, скорость распространения ультразвука $c = \lambda \times f$, $c = 1133$ м/с.

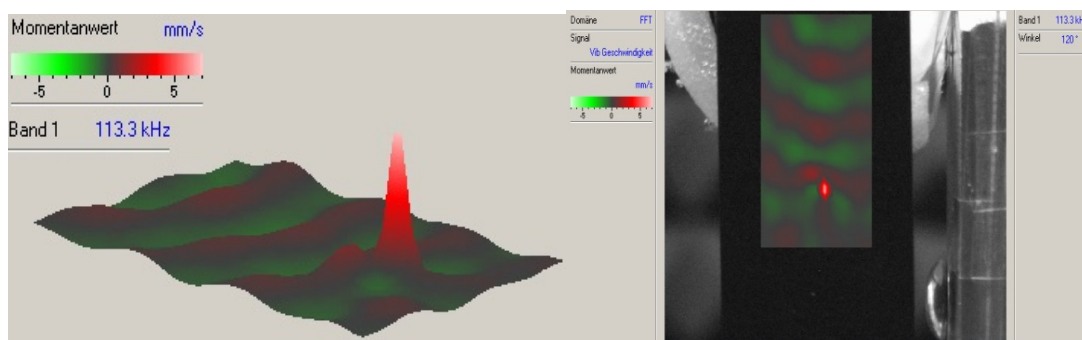


Рисунок 4.31 Изображение вибраций поверхности пластины углепластикового композита в области ударного повреждения при нагружении акустическим сигналом с частотой резонанса дефекта, равной 113,3 кГц (использован воздушно-связанный пьезопреобразователь)

С использованием полученных экспериментальных данных, а также справочных параметров материала, приведенных в разделе 4.5, и выражения (2.14), полученного в Главе 2, определим величину акустической мощности, переносимой звуковой волной через поперечную площадку (S), расположенную перпендикулярно распространению звука:

$$P_{\text{ак}} = \frac{\rho \times V_{\text{input}}^2 \times c \times S}{2} = \frac{1560 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \times 0,76 \times 10^{-6} \frac{\text{мм}^2}{\text{с}^2} \times 1133 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{2} \times 0,046 \times 10^{-3} \text{м}^2 = 31 \text{ мкВт},$$

где ρ – плотность материала, V_{input} – амплитуда виброскорости колебания частиц среды в бездефектной зоне, c – скорость распространения акустической волны, S – площадь поперечного сечения, расположенного перпендикулярно направлению распространения звука.

По аналогичной методике был произведен расчет акустической мощности излучателя, переносимой звуковой волной через поперечную площадку, расположенную перпендикулярно распространению звука при изменении уровня напряжения, прикладываемого к воздушно-связанному пьезопреобразователю в диапазоне от 10 до 70 В (Таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Зависимость амплитуда виброскорости колебания частиц среды в области дефекта и в бездефектной зоне от уровня акустической мощности излучателя

$U, \text{В}$	10	20	30	40	50	60	70
$V_{\text{LDR}}, \text{мм/с}$	1,1	2,3	3,8	5,0	6,0	7,8	8,7
$V_{\text{input}}, \text{мкм/с}$	160	371	505	660	840	1054	1183
$P_{\text{ак}}, \text{мкВт}$	3,44	13,8	31	55	86	124	169

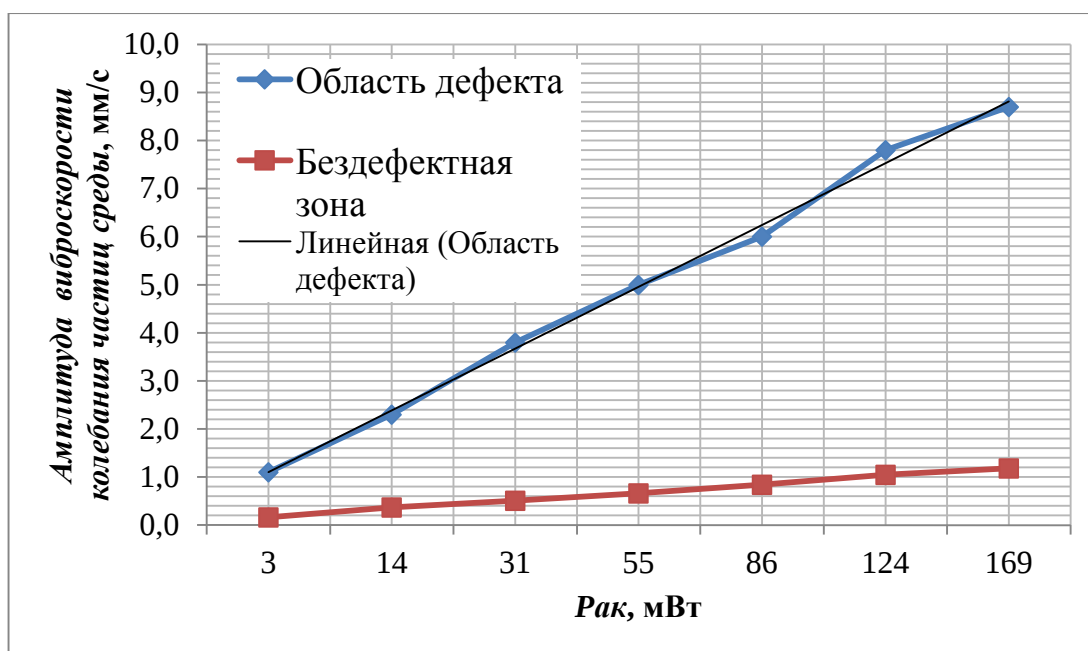


Рисунок 4.32 Зависимость амплитуды колебаний частиц пластины углепластика в области дефекта и в бездефектной зоне от уровня акустической мощности воздушно-связанного пьезопреобразователя при стимуляции материала акустическим сигналом с частотой резонанса ударного повреждения (113,3 кГц)

Как видно из Рисунка 4.32, амплитуда колебаний частиц пластины углепластика в области ударного повреждения существенно возрастает с увеличением уровня акустической мощности воздушно-связанного пьезопреобразователя. При этом значительных изменений амплитуды колебаний частиц среды в бездефектной зоне не наблюдается, благодаря чему усиление амплитуды вибраций частиц материала в области дефекта достигает 8-кратной величины.

С помощью тепловизора IRCAM Equus 327K (температурное разрешение ≈ 15 мК) регистрировали тепловое поле на поверхности пластины углепластикового композита в процессе УЗ стимуляции акустическим сигналом с частотой резонанса ударного повреждения, равной 113,3 кГц, при изменении уровня напряжения, прикладываемого к воздушно-связанному пьезоизлучателю в диапазоне от 75 до 175В в течение 10 секунд. Экспериментальные величины температурного сигнала в области дефекта (ΔT , °С) приведены в Таблице 4.6. Как видно из графика (Рисунок 4.33), изменение температурного отклика в области дефекта линейно зависит от уровня напряжения, прикладываемого к воздушно-связанному излучателю.

Таблица 4.6 – Зависимость изменения температурного сигнала в области дефекта от уровня напряжения, прикладываемого к воздушно-связанному пьезопреобразователю

U, В	75	100	125	150	175
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	0,02	0,025	0,045	0,06	0,09

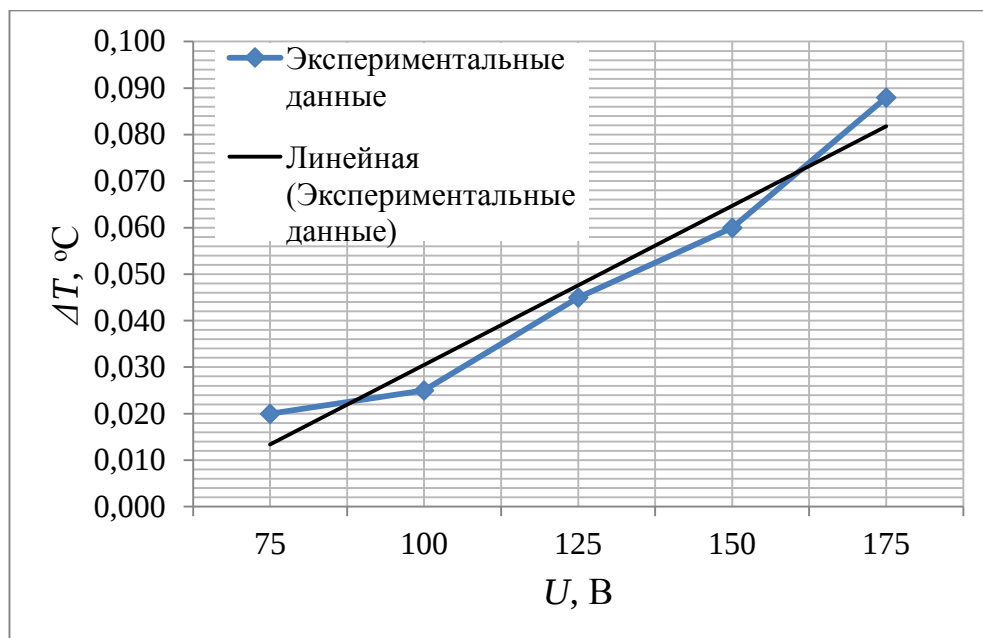


Рисунок 4.33 Зависимость изменения температурного сигнала в области ударного повреждения пластины из композита CFRP от изменения уровня напряжения, прикладываемого к воздушно-связанному излучателю при акустической стимуляции пластины на частоте резонанса дефекта (113,3 кГц)

Отличительной особенностью воздушно-связанных излучателей является влияние угла наклона преобразователя при исследовании материала с помощью поверхностных волн Лэмба. Используя два пьезокерамических преобразователей в качестве излучателя и приемника ультразвука, можно достичь максимально эффективный режим работы излучателя, при котором передаваемый в приемник сигнал будет максимальным. Как следствие, влияние угла наклона преобразователя к исследуемому материалу также влияет на результат проведения резонансной УЗ ИК термографии. В связи с этим, были проведены исследования влияния температурного сигнала в зоне дефекта от изменения угла между преобразователем и нормалью (α) при постоянном уровне напряжения, прикладываемого к излучателю ($U = 150$ В). Частота акустического сигнала составила 113,3 кГц, время УЗ воздействия – 10 секунд.

Таблица 4.7 – Зависимость температурного сигнала в области ударного повреждения пластины углепластикового композита от величины угла между преобразователем и нормалью при постоянном уровне входного напряжения преобразователя, равном 150 В

$\alpha, ^\circ$	15	19	21	22	23
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	0,01	0,03	0,06	0,04	0,01

Как видно из графика Рисунка 4.34, наиболее эффективная теплогенерация в области ударного повреждения ($\Delta T = 0,06\text{ }^\circ\text{C}$) имеет место при величине угла между преобразователем и нормалью (α), равном 21° .

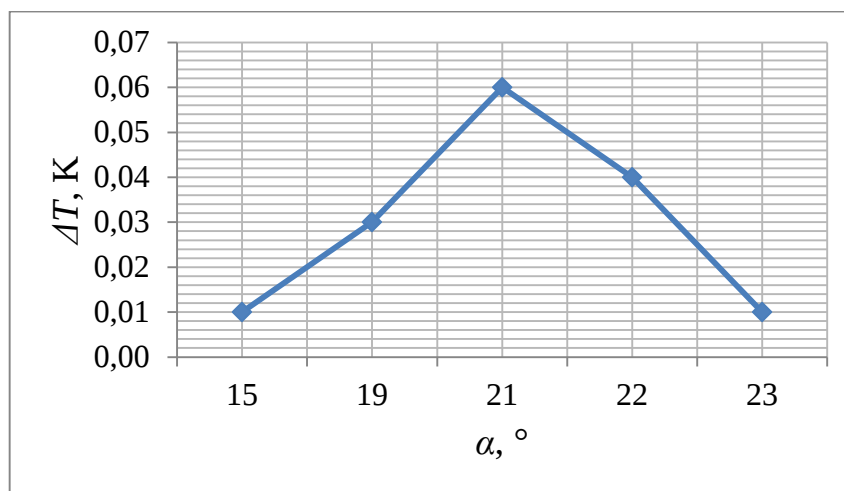


Рисунок 4.34 Зависимость температурного сигнала от изменения угла между преобразователем и нормалью (α) при уровне входного напряжения излучателя 150 В

Отклонение частоты подаваемого в материал акустического сигнала от значения резонансной частоты дефекта также оказывает значительное влияние на процесс теплогенерации, что подтверждается результатами экспериментальных исследований, приведенными ниже. На Рисунке 4.35, являющемся графической реализацией Таблицы 4.7, приведена зависимость температурного сигнала в области дефекта от изменения частоты при постоянном уровне напряжения, прикладываемаемого к воздушно-связанному излучателю (150 В). Угол между преобразователем и нормалью равен 21° , время воздействия 10 секунд.

Таблица 4.8 – Зависимость температурного сигнала в области дефекта от изменения частоты подаваемого акустического сигнала при постоянном уровне напряжения, прикладываемаемого к излучателю ($U=150\text{ В}$)

$f, \text{кГц}$	110,3	111,3	112,3	113,3	114,3	115,3	116,3	117,3	118,3
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	0,02	0,03	0,05	0,07	0,06	0,06	0,055	0,04	0,035

Как и следовало ожидать, при изменении частоты подаваемого акустического сигнала, максимальный уровень температурного сигнала в области дефекта наблюдался при нагружении пластины из углепластика УЗ сигналом, соответствующим частоте резонанса ударного повреждения. Таким образом, при УЗ стимуляции с помощью воздушно-связанного излучателя акустическим сигналом с частотой 113,3 кГц в течение 10 секунд при уровне входного напряжения излучателя, равном 150В, температурный сигнал составил 0,07 °С.

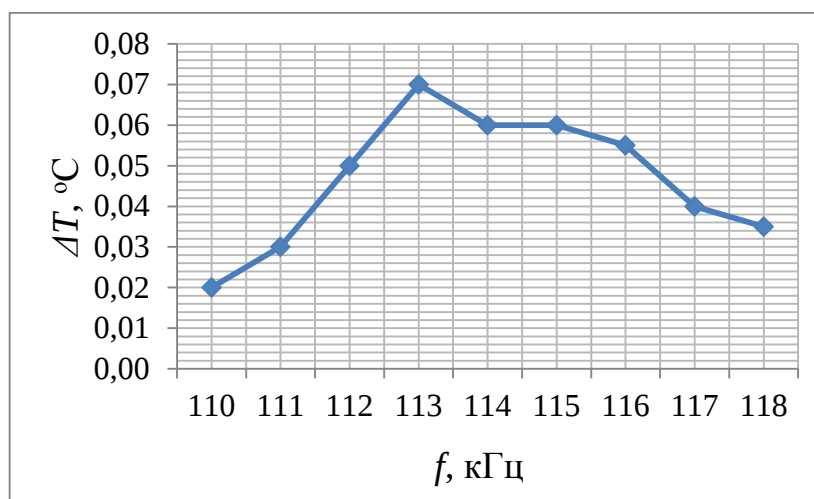


Рисунок 4.35 График зависимости температурного сигнала в области ударного повреждения от частоты подаваемого акустического сигнала при постоянном уровне напряжения, прикладываемого к излучателю (150 В)

Таким образом, следует отметить, что совместное использование резонансной УЗ ИК термографии с воздушно-связанными излучателями позволяет осуществить бесконтактный УЗ ИК контроль, однако, низкие значения мощности данных излучателей, а также жесткие требования к параметрам эксперимента (определение максимально эффективного угла наклона между излучателем и нормалью, необходимость близкого расположения излучателя по отношению к дефекту) и наличие собственных резонансных частот таких излучателей, ограничивают их применение в НК материалов и изделий.

4.7. Сравнение мощной и маломощной УЗ ИК термографии

Как было отмечено выше, существует два главных направления УЗ ИК термографии: мощная УЗ стимуляция на основе пьезоэлектрических [1, 44] и магнитострикционных [36, 41, 43] преобразователей, а также маломощная резонансная УЗ стимуляция объектов контроля на основе эффекта локального резонанса дефекта [7–9, 33]. Оба подхода обладают определенной спецификой, что обуславливает их преимущественное применение для решения конкретных задач.

С целью сравнения эффективности проведения мощной и маломощной УЗ ИК термографии был проведен контроль ударного повреждения в углепластиковом композите. Исследовали пластину размером $100 \times 150 \times 3$ мм³, содержащую ударное повреждение с энергией 14 Дж. В точке удара визуально отмечено поверхностное повреждение структуры углепластика размером около 5 мм (Рисунок 4.36,а). На противоположной поверхности пластины повреждение наблюдалось в виде двух вытянутых зон размером 37×6 мм² (форма «бабочки», Рисунок 4.36,б).

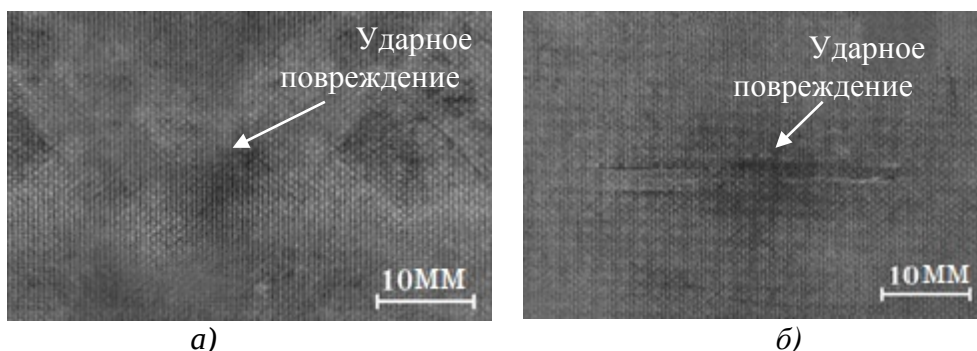


Рисунок 4.36 Изображение ударного повреждения на передней (а) и на задней (б) поверхностях изделия из углепластика

Мощная УЗ стимуляция

Мощную УЗ стимуляцию осуществляли с помощью двух установок: на базе магнитостриктора с резонансной частотой 22 кГц (Рисунок 4.37,а), принцип работы которой описан в Разделе 2.3.2 данной диссертации, и пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) с частотой 40 кГц, используемого в оборудовании для ультразвуковой сварки (Бэйханский университет авиации и космонавтики в г. Пекине, Рисунок 4.37,б). Наличие фиксированных рабочих частот обеих установок является их особенностью, поскольку изменение частоты ультразвука при сохранении его высокой мощности является сложной инженерной задачей.

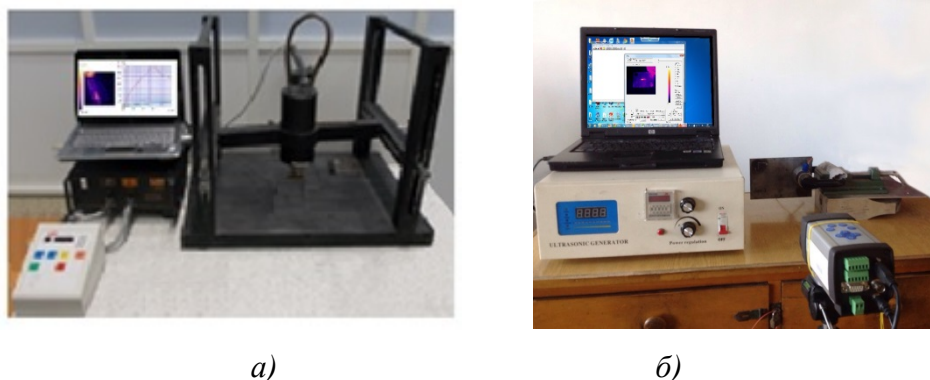


Рисунок 4.37 Аппаратура мощной УЗ ИК термографии на основе магнитострикционного (а) и пьезоэлектрического (б) преобразователей

УЗ ИК установка на базе магнитостриктора включала генератор УЗ колебаний, магнитострикционный преобразователь ИК камеру Nec Avio TH9100 (спектральный диапазон 7–13 мкм, температурное разрешение 30 мК, формат термограмм 320×240), а также оригинальное программное обеспечение ThermoFit Pro для цифровой обработки данных (Рисунок 4.37,*а*). Результатом контроля являются последовательности ИК термограмм, записанные как в ходе УЗ стимуляции длительностью до 10 секунд, так и в течение 1 минуты после нее. Температурный профиль в зоне дефекта, полученный при электрической мощности установки равной 1,5 кВт, показан на Рисунке 4.38,*а*. На расстоянии 65 мм от точки ввода ультразвука максимальный дифференциальный сигнал составил $\Delta T_m = 22,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, причем размер дефектной зоны на термограмме составил $33 \times 9\text{ мм}^2$, то есть приблизительно на 40 % меньше площади визуальной оценки.

Экспериментальная величина температурного сигнала в области дефекта была использована для оценки энергии, затраченной на тепловыделение в зоне ударного повреждения при УЗ стимуляции. С помощью программы ThermoSource была оценена мощность теплогенерации каждым отдельным расслоением, а также суммарная тепловая мощность дефекта ($P_{\text{тепл.}}$), аналогично методике, описанной в Разделе 2.6.1. В результате моделирования было определено, что мощность, затрачиваемая на нагрев дефекта при изменении температурного сигнала на $\Delta T_m = 22,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, составляет 0,788 Вт. Таким образом, коэффициент преобразования электрической мощности излучателя в тепловую мощность, рассеиваемую в области дефекта ($\eta_{\text{эт}}$), равен:

$$\eta_{\text{эт}} = \frac{P_{\text{тепл}}}{P_{\text{эл}}} \times 100\% = \frac{0,78\text{ Вт}}{1500\text{ Вт}} \times 100\% = 0,052\%.$$

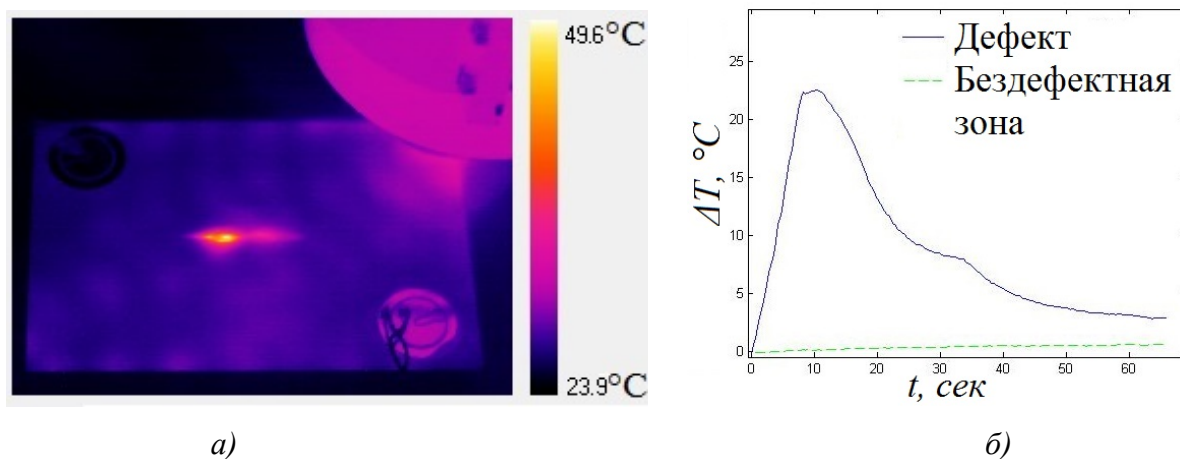


Рисунок 4.38 Термограмма (а) и график изменения температурного поля (б) на поверхности углепластикового композита, противоположной ударному повреждению, при УЗ магнитострикционной стимуляции мощностью 1,5 кВт в течение 10 с

Исходные последовательности ИК термограмм обрабатывали с помощью программы ThermoFit Pro, применяя ряд алгоритмов, принятых в ТК [67]. Фурье-фазограмма (Рисунок

4.39,а) отчетливо показывает две симметричные зоны повреждения – «крылья бабочки», в то время как применение метода анализа главных компонент (РСА) обеспечило максимальное значение отношения сигнал/шум равное 6,85 (Рисунок 4.39,б).

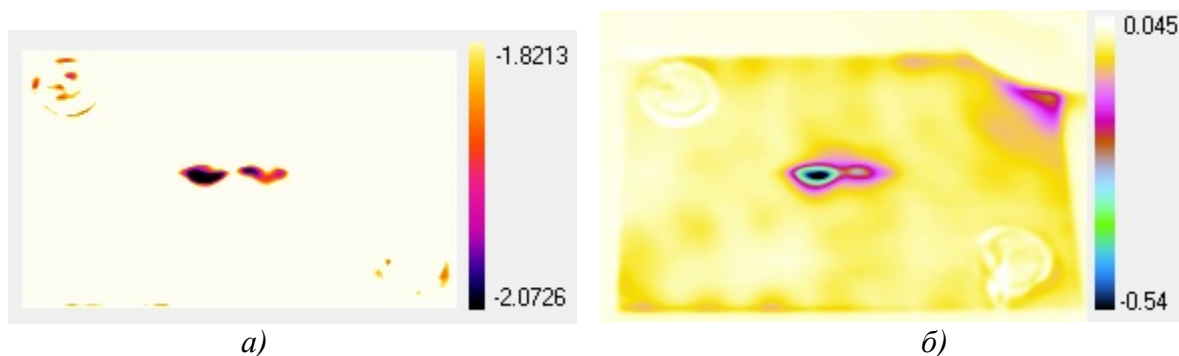


Рисунок 4.39 Исходная термограмма (а) и фазограмма (б) образца из углепластика при мощном УЗ нагружении с помощью магнитостриктора в течение 10 секунд при максимальном уровне акустической мощности преобразователя

Установки на базе ПЭП используются в аппаратуре для УЗ сварки пластмасс. Пьезоактивные компоненты ПЭП преобразуют электрические колебания в механические и затем передают сигнал пассивным резонансным элементам системы для дальнейшего усиления амплитуды до необходимого уровня и согласования акустической системы генератор – ПЭП с нагрузкой. Резонансные ПЭП имеют узкую полосу рабочих частот с небольшим отклонением от основного значения, что позволяет достичь высокого уровня акустической мощности на излучателе и активировать локальные вибрации в местах, ослабленных дефектными включениями. За счет внутреннего трения стенок дефектов обеспечивается необходимый уровень температурных сигналов.

Установка УЗ ИК термографии (Китай) на базе ПЭП включала генератор акустических колебаний диапазона 15–80 кГц, пьезоэлектрический преобразователь (частота резонанса 41 кГц) номинальной мощности 50 Вт, ИК камеру FLIR A325SC (спектральный диапазон 7,5–13 мкм, разрешение 100 мК, формат термограммы 320×240), а также оригинальное программное обеспечение для цифровой обработки данных (Рисунок 4.37,б).

В результате УЗ нагружения углепластикового образца в течение 10 секунд с помощью описанного выше устройства были определены температурные отклики в двух частях ударного повреждения ΔT_{D1} и ΔT_{D2} (Рисунок 4.40,а) в зависимости от рабочей частоты излучателя (f) при постоянном уровне мощности акустического сигнала, составившем 50 Вт (Таблица 1.). Соответствующая графическая зависимость, называемая «температурно-частотным» спектром приведена на Рисунок 4.40,б, откуда следует, что максимальный сигнал $\Delta T_{D1} = 33,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ имеет место на частоте резонанса пьезоизлучателя, равной 41 кГц. Размер дефекта по термограмме составил $35 \times 6\text{ мм}^2$, что близко к визуальной оценке. Следует

заметить, что, экстраполируя график на Рисунке 4.40,б до частоты 22 кГц, использованной в магнитострикционном устройстве, можно предсказать очень низкий уровень температурного сигнала над дефектом; значительную величину ΔT , полученную в эксперименте, можно объяснить большой мощностью вводимого ультразвука (до 1,5 кВт электрической мощности).

ИК термограммы ударного повреждения на различных частотах УЗ стимуляции приведены на Рисунке 4.41. Оптимальность использования частоты 41 кГц подтверждается визуальным анализом термограмм.

Таблица 4.9 – Температурный отклик ударного повреждения в углепластике при УЗ пьезоэлектрической стимуляции различной частоты в течение 10 с (акустическая мощность излучателя 50 Вт, расстояние между точкой ввода ультразвука и дефектом 30 мм)

f , кГц	33	35	37	39	40	41	42	43	45
ΔT_{D1} , °C	1,0	1,3	1,6	8,4	33,1	24,7	8,5	3,1	2,9
ΔT_{D2} , °C	2,5	2,9	4,2	14,3	24,5	25,8	11,2	6,9	4,5

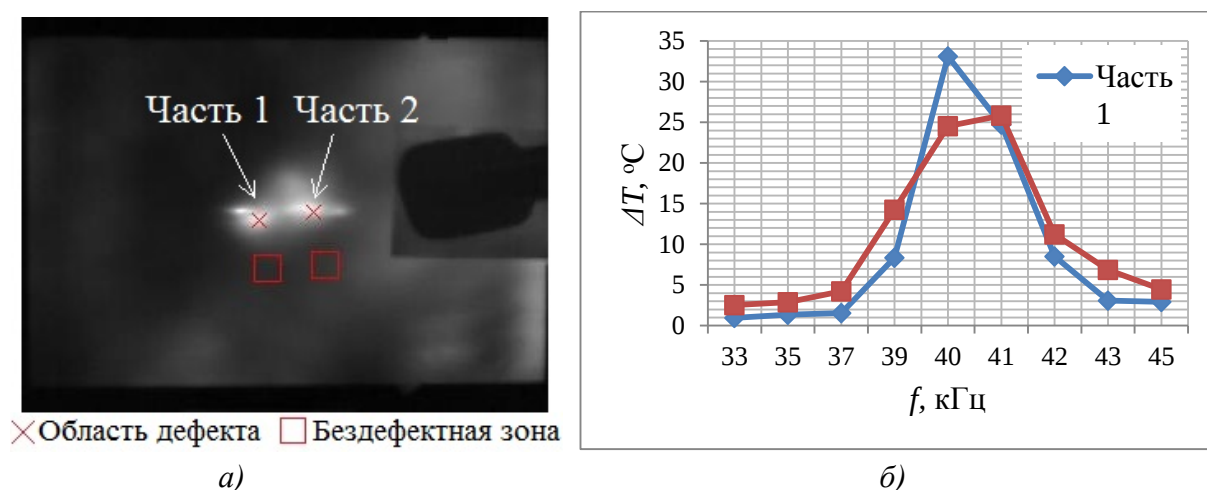
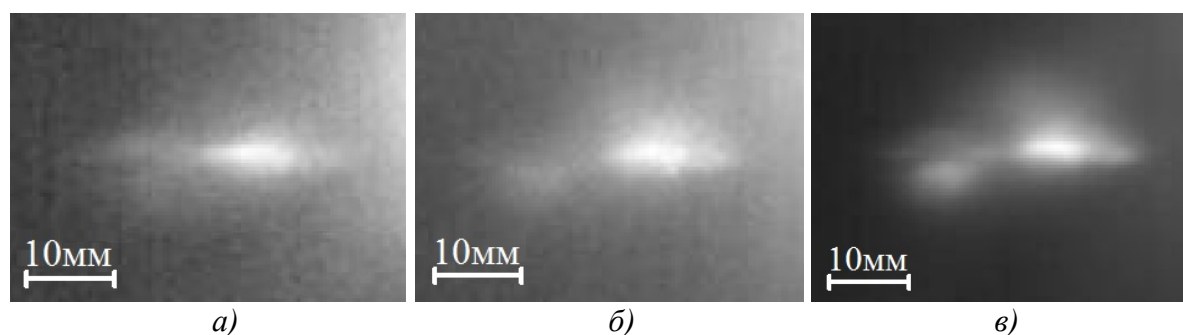


Рисунок 4.40 Термограмма ударного повреждения в углепластике при УЗ стимуляции с помощью пьезоэлектрического устройства (а) и зависимость дифференциального температурного сигнала от частоты УЗ стимуляции (б) при акустической мощности излучателя 50 Вт, времени стимуляции 10 секунд и расстоянии от точки ввода ультразвука до дефекта 30 мм



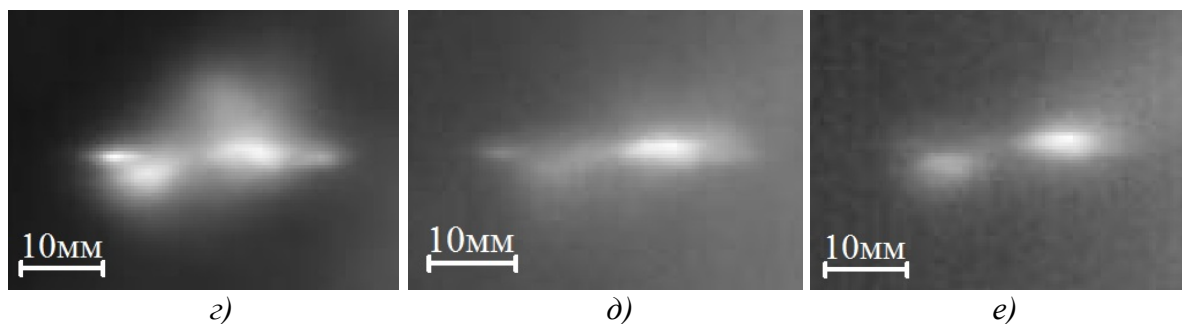


Рисунок 4.41 Термограммы ударного повреждения в углепластике при УЗ пьезоэлектрической стимуляции в течение 10 секунд на частотах 33 кГц (а), 37 кГц (б), 39 кГц (в), 41 кГц (г), 43 кГц (д) и 45 кГц (е)

При УЗ стимуляции с электрической мощностью от 50 до 1000 Вт температурные сигналы в зоне ударных повреждений могут достигать 4–30 °С на расстояниях до 30 см от излучателя до дефекта, однако при этом велика вероятность повреждения контролируемого материала в точке ввода ультразвука, что требует принятия специальных мер, таких как размещение металлических шайб, иммерсионной пасты и т.п. Использование метода локального резонанса дефекта, предусматривающего акустическую стимуляцию на резонансных частотах дефектов, позволяет проводить контроль качества с использованием аппаратуры с электрической мощностью в десятки Вт, что существенно ниже мощности аппаратуры на основе магнитострикционных излучателей.

Контроль качества пластины углепластикового композита с ударным повреждением 14 Дж с помощью маломощной резонансной УЗ ИК термографии был проведен с использованием лабораторной установки, включавшей: ПЭП марки FT-27T (производство Германия) с частотой резонанса 1,7 МГц, оригинальный лабораторный генератор акустических колебаний, трехкомпонентный сканирующий лазерный виброметр PSV-400-3D фирмы «Polytec» (Германия) и ИК тепловизор NEC Avio TH 9100 (Рисунок 4.4).

В ходе исследования были определены резонансные частоты дефекта с помощью широкополосного сканирования и оценки поверхностных вибраций при УЗ нагружении материала акустическим сигналом в форме меандра изменяющейся частоты (от 0 до 100 кГц). Результатом лазерного сканирования поверхности материала (сетка сканирования 100×100 точек) в режиме быстрого преобразования Фурье была АЧХ каждой точки сканирования, а также суммарные картины вибраций всей поверхности образца в широком диапазоне частот. Анализ максимальных значений АЧХ позволил определить частоты, являющиеся резонансными как для всего изделия, так и для его дефектных зон. Значительное увеличение амплитуды вибраций конкретной области материала на фоне общего уровня вибраций было идентифицировано как локальный резонанс дефекта, который затем использовали для его более детального исследования. Вследствие слоистой структуры

композитов, ударные повреждения представляют собой набор микро- и макро-расслоений, локализованных в одной области, но разделенных слоями материала. Поэтому ударное повреждение является неоднородным и характеризуется набором резонансных частот, характерных для отдельных участков повреждения. Тем не менее, можно предположить, что вибрации основной части дефекта активируют более мелкие дефекты и, следовательно, на основной резонансной частоте можно оценивать общее состояние ударного повреждения.

В вышеописанном углепластиковом образце анализировали резонансные частоты отдельных участков ударного повреждения. На Рисунке 4.42 представлена трехмерная (Рисунок 4.42,а) картина вибраций поверхности образца, противоположной поверхности повреждения, на частоте резонанса, равной 15,63 кГц, а также суммарные двухмерная (Рисунок 4.42,в) и трехмерная (Рис. 4.42,б) картины вибраций при широкополосном сканировании объекта в диапазоне частот от 1 до 100 кГц.

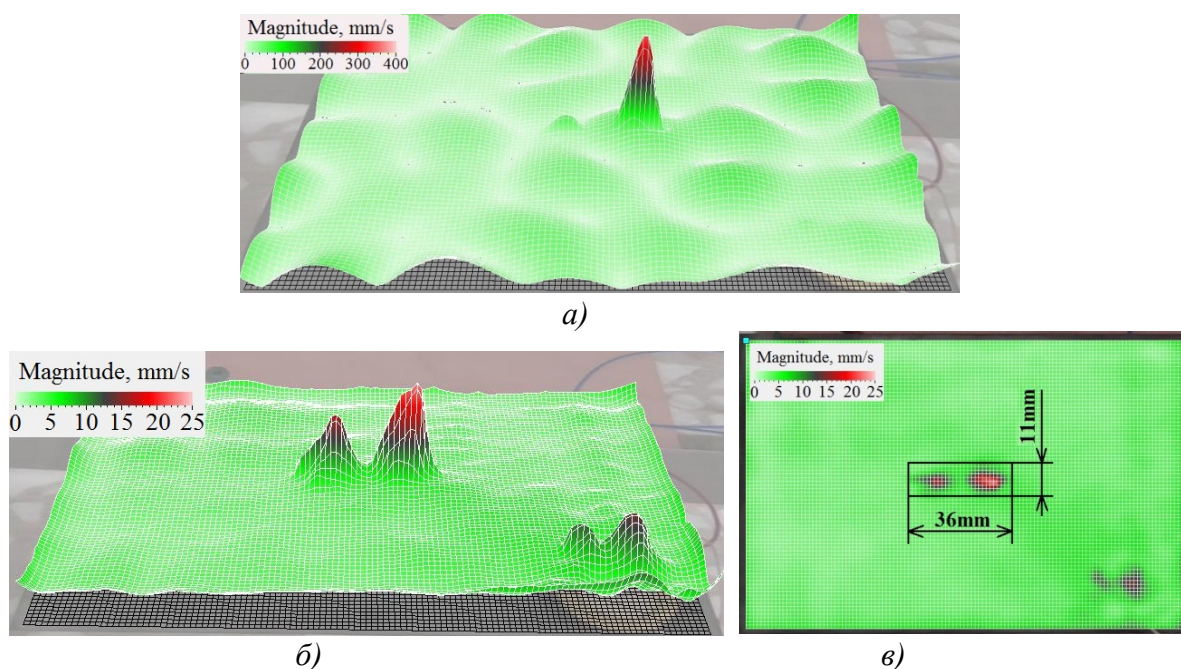


Рисунок 4.42 Распределения вибраций поверхности пластины из углепластика на частоте резонанса дефекта 15,63 кГц (а), а также суммарных вибраций в широком диапазоне частот (б, в)

Максимальный поперечный размер дефекта по результатам виброметрии составляет $36 \times 11 \text{ мм}^2$, что существенно превышает как визуальную, так и ИК термографическую оценки, приведенные выше. Таким образом, данные результаты исследований можно объяснить более эффективной стимуляцией микро-дефектов, входящих в структуру ударного повреждения.

Благодаря явлению резонанса, акустическая энергия ПЭП малой мощности эффективно передается в зону повреждения, многократно усиливая локальные вибрации и позволяя

получить высокоинформативный тепловой отклик дефекта на УЗ воздействие. Экспериментальные значения изменения температурного сигнала в области ударного повреждения пластины углепластика при стимуляции материала акустическим сигналом с частотой резонанса дефекта в течение 20 секунд в зависимости от уровня потребляемой электрической мощности установки приведены в Таблице 4.10. Максимальный уровень изменения температурного сигнала составил 0,9 °С при расстоянии между точкой ввода УЗ и дефектом, равном 50 мм.

В результате лазерного сканирования были измерены амплитуды скорости вибраций поверхности материала в области дефекта $V_{LDR} = 368,6$ мм/с и в бездефектной зоне $V_{input} = 44,5$ мм/с при уровне входного напряжения на пьезоизлучателе равном $U = 67$ В. Скорость звуковой волны в образце углепластикового композита составляет 825 м/с. Площадь поперечного сечения пластины, расположенного перпендикулярно направлению распространения звука, равна 3×10^{-4} м².

Справочные характеристики углепластика приведены в разделе 4.5.

Для расчета акустической мощности пьезопреобразователя были использованы экспериментальные данные, полученные в результате вибросканирования поверхности пластины, справочные характеристики материала, а также выражение (2.14) для расчета акустической мощности излучателя, переносимой звуковой волной через поперечную площадку (S), которая расположена перпендикулярно распространению звука (Глава 2). Таким образом, величина акустической мощности при уровне входного напряжения на пьезоизлучателе, равном $U = 67$ В, определяется как:

$$P_{ак} = \frac{\rho \times V_{input}^2 \times c \times S}{2} = \frac{1560 \frac{кг}{м^3} \times 0,76 \times 10^{-6} \frac{м^2}{с^2} \times 825 \frac{м}{с}}{2} \times 3 \times 10^{-4} м^2 = 380 \text{ мВт},$$

где ρ – плотность материала, V_{input} – амплитуда виброскорости колебания частиц среды в бездефектной зоне, c – скорость распространения акустической волны, S – площадь поперечного сечения, расположенного перпендикулярно направлению распространения звука.

$$P_{ак}(\text{при } U = 67 \text{ В}) = 380 \text{ мВт}.$$

По аналогичной методике был произведен расчет акустической мощности излучателя при изменении уровня напряжения, прикладываемого к пьезопреобразователю, в диапазоне от 50 до 120 В. Результаты вычислений приведены в Таблице 4.10.

Полученные экспериментальные величины температурных сигналов были использованы для оценки энергии, затраченной на тепловыделение в зоне ударного повреждения в результате УЗ стимуляции. С помощью программы ThermoSource была

оценена мощность теплогенерации каждым отдельным расслоением, а также суммарная тепловая мощность дефекта ($P_{\text{тепл}}$), используя методику, описанную в разделе 2.6.1. При моделировании ударное повреждение рассматривается в виде пирамидального дефекта, состоящего из одиннадцати активных внутренних источников тепла, которые представляют собой воздушные области в форме параллелепипеда толщиной 0,31 мм каждый. Расстояние между слоями равно 0,1 мм. Теплофизические характеристики максимально соответствовали экспериментальным (толщина образца 4 мм, теплопроводность 0,61 Вт/(м×°C), теплоемкость 1500 Дж/(кг×°C) и плотность 1560 кг/м³) [67, 68]. Результаты моделирования приведены в Таблице 4.10.

Используя значения электрической и акустической мощности магнитострикционного излучателя, полученные экспериментально (Таблица 4.10), рассчитаем коэффициент преобразования электрической мощности излучателя в акустическую ($\eta_{\text{эа}}$) по формуле:

$$\eta_{\text{эа}} = \frac{P_{\text{ак}}}{P_{\text{эл}}} \times 100\%. \quad (4.32)$$

Выражение для определения коэффициента преобразования акустической мощности излучателя в тепловую мощность ($\eta_{\text{ат}}$), которая рассеивается дефектом, имеет вид:

$$\eta_{\text{ат}} = \frac{P_{\text{тепл}}}{P_{\text{ак}}} \times 100\%. \quad (4.33)$$

Выражение для определения коэффициента преобразования электрической мощности, потребляемой излучателем в тепловую мощность ($\eta_{\text{эт}}$), которая рассеивается дефектом, имеет вид:

$$\eta_{\text{эт}} = \frac{P_{\text{тепл}}}{P_{\text{эл}}} \times 100\%. \quad (4.34)$$

Расчетные величины $\eta_{\text{эа}}$, $\eta_{\text{ат}}$ и $\eta_{\text{эт}}$ приведены в Таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Зависимость изменения температуры в зоне дефекта от изменения уровня входного напряжения и акустической мощности преобразователя

$P_{\text{эл}}, \text{ Вт}$	1,75	2,52	4,04	5,67	8,05	10,08
$P_{\text{ак}}, \text{ Вт}$	0,21	0,31	0,49	0,66	0,9	1,224
$P_{\text{тепл}}, \text{ мВт}$	12	15	19	20	31	43
$\eta_{\text{эа}}, \%$	12	12,3	12,1	11,6	11,2	12,1
$\eta_{\text{ат}}, \%$	5,7	4,8	3,9	3	3,44	3,51
$\eta_{\text{эт}}, \%$	0,69	0,59	0,47	0,35	0,39	0,43
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	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 линейные зависимости, показанные на Рисунке 4.43 и ИК термограммы (Рисунок 4.44).

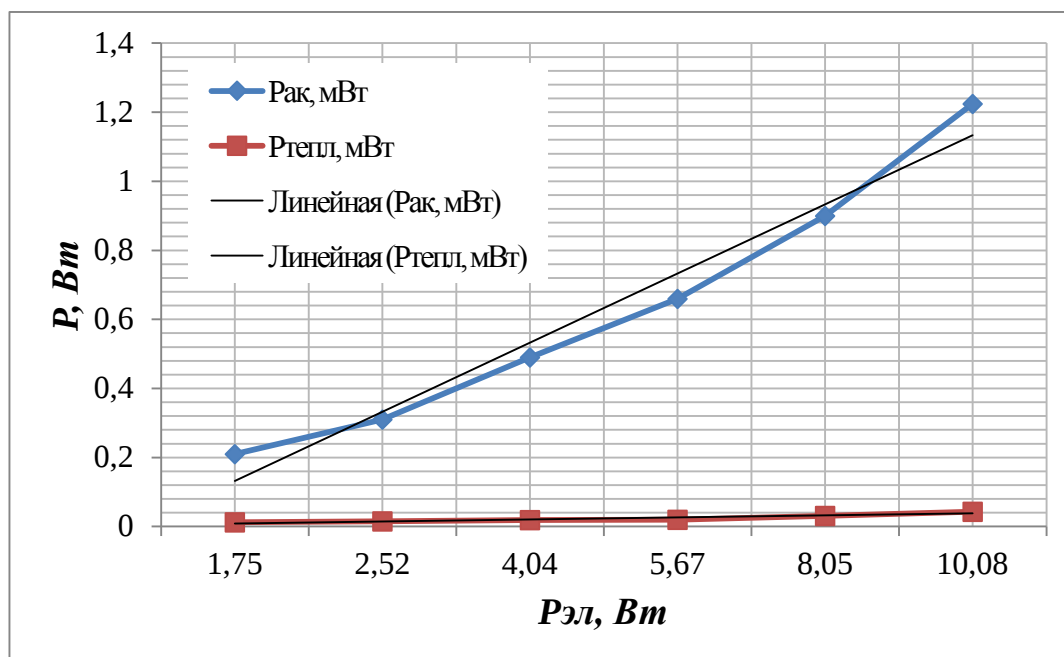


Рисунок 4.43 Изменение акустической мощности магнитостриктора и тепловой мощности, выделяемой в области дефекта в зависимости от уровня электрической мощности магнитострикционного преобразователя

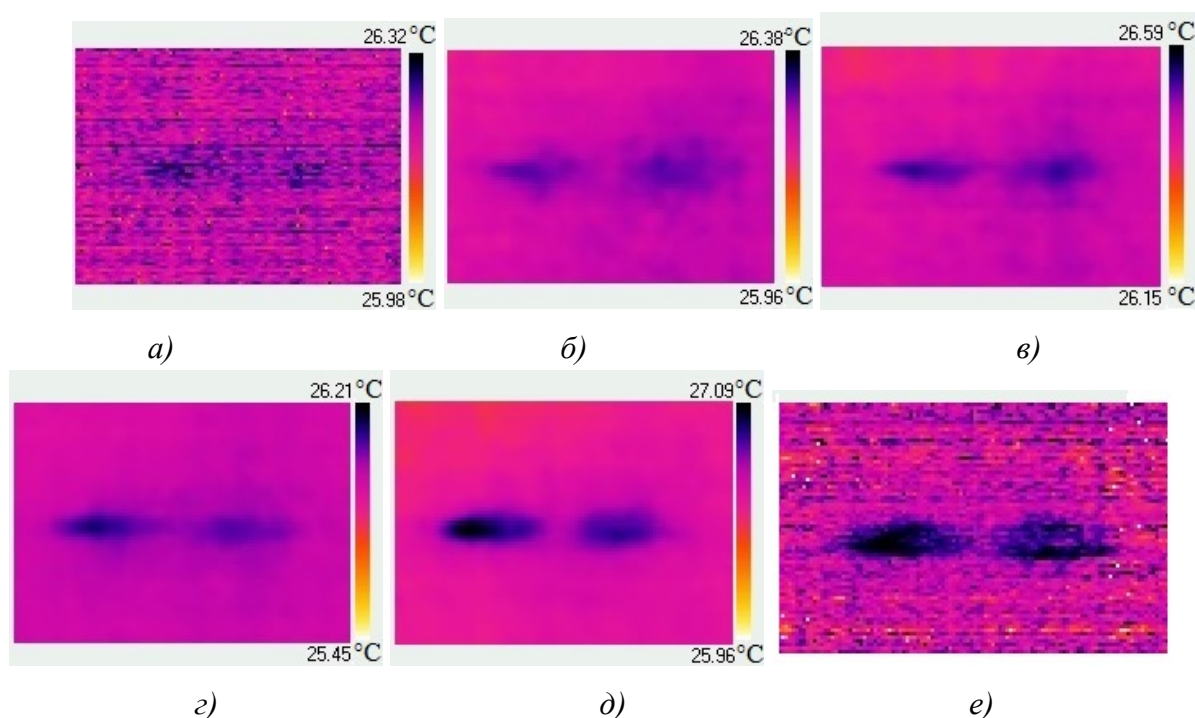


Рисунок 4.44 Термограммы ударного повреждения в углепластике при УЗ пьезоэлектрической резонансной стимуляции в течение 20 секунд при уровне потребляемой мощности генератора 2,52 Вт (а), 4,04 Вт (б), 5,67 Вт (в), 8,05 Вт (г), 10,08 Вт (д) и фазовое изображение (е)

Результаты компьютерного моделирования тепловой мощности, рассеиваемой в области дефекта, а также расчетные значения акустической мощности пьезопреобразователя и потребляемой электрической мощности генератора (Таблица 4.10), показали, что в процессе УЗ стимуляции пластины эффективность преобразования электрической мощности в акустическую составляет от 11,2% до 12,3%. Соответственно, среднее значение коэффициента преобразования электрической мощности в акустическую ($\eta_{\text{эа ср}}$) равно:

$$\eta_{\text{эа ср}} = \frac{12 + 12,3 + 12,1 + 11,6 + 11,2 + 12,1}{6} = 11,88 \text{ \%}.$$

Коэффициент преобразования акустической мощности в тепловую в области дефекта варьируется от 3 до 5,7 %. Среднее значение коэффициента преобразования электрической мощности в акустическую ($\eta_{\text{ат ср}}$) составляет:

$$\eta_{\text{ат ср}} = \frac{5,7 + 4,8 + 3,9 + 3 + 3,44 + 3,51}{6} = 4,06 \text{ \%}.$$

Доля электрической мощности излучателя, преобразованной в тепловую энергию, в среднем составляет:

$$\eta_{\text{эт ср}} = \frac{0,69 + 0,59 + 0,47 + 0,35 + 0,39 + 0,43}{6} = 0,49 \text{ \%}.$$

Таким образом, «спектроскопический» подход к УЗ стимуляции, реализуемый методом локального резонанса дефекта при маломощной акустической стимуляции, позволяет анализировать резонансные явления в дефектах со сложной структурой, например, в ударных повреждениях, а также оптимизировать процесс акустической стимуляции, материала, исходя из резонансных свойств исследуемого объекта, за счет исследования отдельных частей дефектных структур. Предложенная в данной работе процедура контроля качества становится недоступной при использовании метода и аппаратуры мощной УЗ ИК термографии, поскольку эффективность работы используемых в данном методе излучателей напрямую зависит от соответствия подаваемого акустического сигнала частоте резонанса излучателя и резко снижается при небольшом отклонении сигнала от рабочей частоты.

Следует отметить, что среднее значение коэффициента преобразования электрической мощности, потребляемой аппаратурой резонансной УЗ ИК термографии, в тепловую мощность составляет 0,49%, что превосходит по своим показателям величину аналогичного коэффициента преобразования установки мощной УЗ ИК термографии (0,052%), приведенной на Рисунке 4.37,а, почти в 10 раз. Вышеприведенные данные доказывают эффективность предложенного подхода у маломощной УЗ стимуляции дефектов в твердых телах.

4.8. Выводы по Главе 4

1. 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 неразрушающего контроля материалов и изделий.

2. Значительное повышение температуры в области дефектов за счет явления резонанса повышает отношение сигнал/шум в результирующих ИК термограммах, улучшая информативность данного метода для определения дефектов.

3. 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.

4. 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 (определение эффективного угла наклона между излучателем и нормалью, необходимость близкого расположения излучателя по отношению к дефекту) и наличие собственных резонансных частот у таких излучателей ограничивают их применение в неразрушающем контроле материалов и изделий.

ОБЩИЕ ВЫВООДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Возможности нового способа теплового неразрушающего контроля, названного УЗ ИК термографией, интенсивно исследовались в течение последнего десятилетия. Данный способ представляет интерес, как для промышленного применения, так и для академических исследователей, решающих термомеханические задачи.

2. Предложен новый подход к определению эквивалентной тепловой мощности, генерируемой подповерхностными дефектами, которые облучаются механическими волнами УЗ диапазона. Дефекты представляются конгломератом отдельных тепловыделяющих расслоений, а 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. Продemonстрировано, что основной вклад в повышение температуры вносят дефекты, расположенные на глубинах до 1,5 мм, считая от контролируемой поверхности.

3. Обычно 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, поскольку ставит под сомнение неразрушающий характер испытаний.

4. Метод мощной УЗ ИК термографии доказал свою высокую эффективность при обнаружении низкоэнергетических ударных повреждений в углерод-углеродном композите. При электрической мощности на инденторе 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 между точкой ввода акустического сигнала и дефектом. Таким образом, площадь одновременно контролируемой поверхности составляет 0,283 м².

5. 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 излучателя. 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.

6. Механизмы генерации температурных сигналов при УЗ и оптической стимуляции в определенной степени различаются. При облучении дефектов механическими волнами звуковой и УЗ частоты основным механизмом теплогенерации является трение стенок дефектов, что приводит к парадоксальному феномену лучшего проявления «тонких» дефектов по сравнению с дефектами, имеющими большое раскрытие. Таким образом, дефект является локальным тепловым источником, а тепловая энергия распространяется «однократно» от заглубленного дефекта к поверхности. При оптическом нагреве тепловая «волна» от стимулируемой поверхности распространяется в глубь материала, встречает дефект, как правило, низкотеплопроводный, что приводит к локальной аккумуляции тепловой энергии над дефектом. При этом тепловая энергия проходит вдвое больший путь, чем в случае УЗ возбуждения.

7. 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 «слипнутых» расслоений и микротрещин.

8. 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 НК материалов и изделий.

9. 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.

10. 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 неразрушающем контроле материалов и изделий.

11. По результатам настоящего диссертационного исследования опубликовано 14 работ, в том числе 9 статей в изданиях, цитируемых в базах данных SCOPUS и Web of Science (4 статьи в изданиях с импакт-фактором более 1). Материалы диссертационных исследований использованы в НИИИН МНПО «Спектр», г. Москва.

Публикации автора

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. (ISSN: 0041-624X). 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. Article number 012084. 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. Article number 91050J, 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 lXiX.– 2014.– n. 4.– Pp. 473-478. (ISSN: 0391 2051).
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.

Литература

1. Ключев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник/ В.В. Ключев, Ф.С. Соснин, А.В. Ковалев и др.; Под ред. В.В. Ключева. 3-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656с., ил.
2. Патент РФ № 2477854 от 22.06.2011г. «Способ контроля материалов методом резонансной ультразвуковой спектроскопии»
3. Montanini, R. Non-destructive evaluation of thick glass fiber-reinforced composites by means of optically excited lock-in thermography/ Roberto Montanini, Fabrizio Freni // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 43, Issue 11 – 2012. – pp. 2075–2082.
4. Горбаш, В.Г. Неразрушающий контроль в промышленности. Акустический контроль/ Горбаш, В.Г., Делендик М.Н., Павленко П.Н. // *Неразрушающий контроль и диагностика*. – 2011 – №4 – С. 35-51.
5. Петрухин, В.В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации: учебное пособие/ Петрухин В.В., Петрухин С.В. – М.: Инфра-Инженерия, 2010. – 176 с.:ил.
6. Busse, G. Damage and its Evolution in Fiber – Composite Materials: Simulation and Non-Destructive Evaluation / eds Gerd Busse, Bernd-H. Kruplin, Falk K. // *Wittel*. Stuttgart: University Stuttgart, 2006. – 548 p.
7. Ostrovsky, L.A. Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials/ L.A. Ostrovsky and P.A. Johnson// *Rivista del Nuovo Cimento*, Volume 24, Issue 7 – 2001. – pp. 1-46.
8. Solodov, I. Resonant ultrasound spectroscopy of defects: Case study of flat bottomed holes/ Solodov I., Bai J., Busse G.// *J. Appl. Phys.*, Volume 113, Issue 22 – 2013. Article number 223512
9. Solodov, I. A local defect resonance to enhance acoustic wave-defect interaction in ultrasonic nondestructive evaluation/ I. Solodov, J. Bai, S. Bekgulyan, G. Busse// *Appl. Phys. Lett.*, Volume 99, Issue 21 – 2011. Article number 211911
10. Solodov, I. Air-coupled laser vibrometry: Analysis and applications/ Solodov I., Döring D., Busse G.// *Appl. Optics*, Volume 48 – 2009. – pp. 33-37.
11. Система неразрушающего контроля. Виды (методы) и технология неразрушающего контроля. Термины и определения: Справочное пособие/ Серия 28. Выпуск 4/ Колл. авт. – М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003. – 392 с.
12. Румянцев, С.В. Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля / Румянцев С.В., Штань А.С., Гольцев В.А. – М.: Энергоиздат, 1982. – 240 с.
13. Costin, M. A 2D multiresolution image reconstruction method in X-ray computed tomography/ Costin M., Lazaro-Ponthus D., Legoupil S., Duvauchelle P., Kaftanjan V.// *Journal of X-Ray Science and Technology*, Volume 19, Issue 2 – 2011. – pp. 229-247.

14. Bin, L. Design of Automatic Control System for NDT Device/ Liu Bin, Zhou Min// Energy Procedia, Volume 17, Part A – 2012. – pp. 68-73.
15. Ketcham, R.A. Beam hardening correction for X-ray computed tomography of heterogeneous natural materials/ Richard A. Ketcham, Romy D. Hanna// Computers and Geosciences, Volume 67 – 2014.– pp. 49-61.
16. Канаевский, И.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. Пособие/ И.Н. Канаевский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243с.
17. Вейко, В.П. Лазерное формирование зондов для ближнепольных оптических микроскопов/ В.П. Вейко, Н.Б. Вознесенский, С.А. Родионов // Поверхность, №7 – 2000. – С. 1-8.
18. Вавилов, В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.: ил. и цветная вкладка 16с.
19. Vladimir, P. V. Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing/ Vladimir P. Vavilov, Douglas D. Burleigh// NDT & E International, Volume 73 – 2015. – pp. 28-52.
20. Vavilov, V.P. A complex approach to the development of the method and equipment for thermal nondestructive testing of CFRP cylindrical parts/ V.P. Vavilov, A.V. Plesovskikh, A.O. Chulkov, D.A. Nesteruk// Composites Part B: Engineering, Volume 68 – 2015. – pp. 375-384.
21. Maldague, X. Pulse phase infrared thermography/ Maldague X., Marinetti S.// Journal of Applied Physics, Volume 79, Issue 5 – 1996. – pp. 2694-2698.
22. Fernandes, H.C. Fiber orientation assessment on surface and beneath surface of carbon fiber reinforced composites using active infrared thermography/ Fernandes, H.C., Maldague, X.P.V.// Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Volume 9105 – 2014. Article number 91050D
23. Meola, C., Toscano, C. Flash thermography to evaluate porosity in carbon fiber reinforced polymer (CFRPs). Materials, Vol. 7, Issue 3, 2014, pp. 1483-1501
24. Henneke, E.G. Thermography, An NDI Method for Damage Detection/ Henneke E.G., Reifsnider K.L. and Stinchcomb W.W.// Journal of Metal – 1979. – pp. 11-15.
25. Gleiter A. Ultrasound Lock-In Thermography for Advanced Depth Resolved Defect Selective Imaging/ Gleiter A., Riegert G., Zweschper Th. and Busse G.// Insight., Volume 49, No. 5 – 2007. – pp. 272-274.
26. Reifsnider, K.L. The Mechanics of Vibrothermography, Mechanics of Nondestructive Testing/ Reifsnider K.L., Henneke E.G., and Stinchcomb W.W.// Plenum Press, New York – 1980. – pp. 249-276.

27. Mignogna, R.B. Thermographic Investigation of High-Power Ultrasonic Heating in Materials/ Mignogna R.B., Green R.E., Duke J., Henneke, E.G. and Reifsnider, K.L.// Ultrasonics, Volume 7 – 1981. – pp.159-163.
28. Favro, L.D. IR Imaging of Cracks Excited by an Ultrasonic Pulse/ Favro L.D., Han X., Ouyang Z., Sun G., Sui H., and Thomas R.L.// Proc. SPIE “Thermosense-XXII”, Volume 4020 – 2000. – pp. 182-185.
29. Burke, M.W. Status of VibroIR at Lawrence Livermore National Laboratory/ Burke M.W. and Miller W.O.// Proc. SPIE. “Thermosense-XXVI”, Volume 5405 – 2004. – pp. 313-321.
30. Holland, S.D. Toward a viable strategy for estimating vibrothermographic probability of detection/ Holland S.D., Uhl C. and Renshaw J.// Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Volume 27 – 2008. – pp. 491-497.
31. Holland, S.D. First Measurements from a New Broadband Vibrothermography Measurement System/ Holland S.D.// Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Volume 2 – 2007. – pp. 478-483.
32. Hiremath, S.R. Detection of Crack In Metal Plate by Thermo Sonic Wave Based Detection Using FEM/ Hiremath S.R., Mahapatra R. and Srinivasan S.// JEST-M, Volume 1, Issue 1 – 2012. – pp. 12-18.
33. Solodov, I. Resonance ultrasonic thermography: Highly efficient contact and air-coupled remote modes/ Solodov I. and Busse G.// Applied Physics Letters, Volume 102, Issue 6 – 2013. Article number 061905.
34. Pye, C.J. Detection of damage in fibre reinforced plastics using thermal fields generated during resonant vibration/ Pye C.J. and Adams R.D.// NDT International, Volume 14, Issue 3 – 1981. – pp.111-118.
35. Han X., Li W., Zeng Z., Favro L.D. and Thomas R.L. Acoustic Chaos and Sonic Infrared Imaging. -Applied Physics Letter, 2002, Vol. 81, pp. 3188-3190.
36. Вавилов, В. П. Исследование метода ультразвукового инфракрасного контроля трещин в композиционных материалах/ Вавилов В. П., Хорев В. С., Чулков А. О.// Контроль. Диагностика, №. 13 – 2012. – с. 197-201.
37. Vavilov, V.P. IR thermographic characterization of low energy impact damage in carbon/carbon composite by applying optical and ultrasonic stimulation/ Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A.// Proc. SPIE “Thermosense-XXXVI”, Volume 9105 – 2014. Article number 91050J.
38. Shepard, S.M. Experimental Considerations in Vibrothermography/ Shepard S.M., Ahmed T. and Lhota J.// Proc. of SPIE, Volume 5405 – 2004. – pp. 332-335.

39. Rizi, A.S. FEM Modelling of Ultrasonic Vibrothermography of Damaged Plate and Qualitative Study of Heating Mechanisms/ Rizi A.S., Hedayatrasa S., Maldague, X. and Vukhanh T.// *Infrared Physics & Technology*, Volume 61 – 2013. – pp. 101-110.
40. Pieczonka, L. Vibrothermography – Measurement System Development and Testing/ Pieczonka L., Szwed M. and Uhl T.// *Diagnostyka – Diagnostics and Structural Health Monitoring*, Volume 2, Issue 58 – 2011. – pp. 61- 66.
41. Вавилов, В.П. 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*, 1(47) – 2010. – с. 36-58.
42. Ширяев, В.В. Тепловой контроль ударных повреждений в углепластике с применением ультразвуковой стимуляции / В.В.Ширяев, В.С. Хорев. // *Контроль. Диагностика* – 2011. – с. 112-114.
43. Вавилов, В.П. Исследование метода ультразвукового инфракрасного контроля трещин в композитных материалах / В.П. Вавилов, В.С. Хорев, А.О.Чулков// *Контроль и диагностика* – 2012. – с. 197-201.
44. Ермолов, И.Н. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / И.Н. Ермолов, М.Б. Гитис, М.В. Королев и др.; под ред. И.Н. Ермолова. – Москва: Машиностроение, 1986. – 280 с.: ил.
45. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – Москва: Наука, 1972. – 721 с.
46. Костиков, В.И. Композиционные материалы на основе углерода / В.И. Костиков – Москва, Министерство металлургии СССР, 1991. – 158 с.
47. Эльпинер, И.Е. Ультразвук/ И.Е. Эльпинер. – М. Физматгиз, 1963. – 420 стр. с илл.
48. Савельев, И.В. Курс общей физики. Том 2. Электричество и магнетизм, волны, оптика/ Савельев И.В. – М.: Наука, 1978. – 480 с. с илл.
49. Госсорг, Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение : пер. с фр. / Ж. Госсорг; под ред. Л. Н. Курбатова ; пер. Н. В. Васильченко. – Москва: Мир, 1988. – 399 с.
50. Вавилов, В.П. Тепловой контроль композиционных материалов в авиакосмической промышленности: возрождение интереса и направления применения / Вавилов В.П., Чулков А.О., Дерусова Д.А., Швидерский В. // *В мире НК*. 2(64) – 2014.
51. Vavilov, V.P. Modeling Thermal NDT problems/ Vavilov V.P.// *International J. of Heat and Mass Transfer*, Volume 72 – 2014. – p.75-86.
52. Zweschper, Th. Ultrasound lock-in thermography - a defect selective method for the inspection of aerospace components / Zweschper Th., Dillenz A., and Busse G. // *Insight*, Volume 43, No. 3. – 2001. – p. 173-179.

53. Solodov, I. Thermosonic Chladni figures for defect-selective imaging/ Solodov I., Derusova D., Rahammer M. // *Ultrasonics* 60 – 2015. – pp. 1-5.
54. Mignogna, R.B. Thermographic investigation of high-power ultrasonic heating in materials / Mignogna R.B., Green Jr. R.E., Duke Jr. J.C., Henneke II E.G., Reifsnider K.L. // *Ultrasonics* 19 – 1981. – pp. 159-163.
55. Solodov, I. A local defect resonance to enhance acoustic wave-defect interaction in ultrasonic nondestructive testing / Solodov I., Bai J., Bekgulyan S., Busse G. // *Appl. Phys. Lett.* 99 – 2011. Article number 211911.
56. Solodov, I. Resonant ultrasonic spectroscopy of defects: case study of flat-bottomed holes / Solodov I., Bai J., Busse G. // *J. Appl. Phys.* 113 – 2013. Article number 223512.
57. Garnier, J.-L. Visualization of ultrasonic vibrations in piezoelectric ceramics using telethermography / Garnier J.-L., Gazanhes C. // *IEEE Trans. Son. Ultrason.* 25 – 1978. – pp. 68-71.
58. Migliori, A. Resonant Ultrasonic Spectroscopy/ Migliori A., Sarrao J.L.// Wiley-Interscience Publ., New York – 1997.
59. Solodov, I. New opportunities for NDE with aircoupled ultrasound / Solodov I., Pfleiderer K., Gerhard H., Predak S., Busse G. // *NDT&E International*, Volume 39 – 2006. – pp. 176-183.
60. Solodov, I. Highly-efficient and noncontact vibro-thermography via local defect resonance/ Solodov I., Rahammer M., Derusova D., Busse G. // *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Vol. 12 (1), Issue 2 – 2015. – pp. 98-111.
61. Диментберг, Ф.М. Колебания машин/ Ф.М. Диментберг, К.Т. Шаталов, А.А. Гусаров. – М.: Машиностроение, 1964. – 308с.:ил.
62. Ландау, Л.Д. Теория упругости / Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. - М.: Издательство «Наука», 1965. – 204с.
63. Timoshenko, S.P. Vibration Problems in Engineering / Timoshenko S.P. // D. Van Nostrand Company, 4th Ed. – 1956.
64. Официальный сайт Массачусетского технологического института, база данных свойства материалов [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://www.mit.edu/~6.777/matprops/pmma.htm>
65. Chladni, E.F.F. Entdeckungen uber die Theorie des Klanges / Chladni, E.F.F. // Beichmanns & Reich – 1787.
66. Vavilov, V.P. Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing / Vavilov V.P., Burleigh D.D. // *NDT & E International*, Volume 73 – 2015. – pp. 28-52.
67. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 721 с.

68. Костиков, В.И. Композиционные материалы на основе углерода / В.И. Костиков – М.: Министерство металлургии СССР, 1991. – 158 с.

Теоретический расчет частоты резонанса пластины в области прямоугольного отверстия

Одним из методов НК материалов и изделий, как отмечалось выше, является резонансная УЗ спектроскопия. Сущность метода заключается в возбуждении УЗ колебаний в определенном диапазоне частот и регистрации спектра сигнала отклика для его дальнейшей обработки и диагностики материалов на наличие дефектов. И. Солодовым (I. Solodov) введено понятие локального резонанса дефекта (LDR), обосновывающее наличие у каждого дефекта материала своей собственной частоты резонанса, на которой происходит максимально эффективное преобразование акустической энергии излучателя в тепловую в области дефекта.

Произведем теоретический расчет частоты резонанса пластины в области прямоугольного отверстия с плоским дном, представляющим собой прототип дефекта в композиционных материалах в виде трещины при большом значении соотношения сторон прямоугольника, а также определим область применимости данной модели для оценки частоты резонанса дефекта. Общий вид объекта исследований (Рисунок ПА1) и геометрия задачи (Рисунок ПА2) приведены ниже.

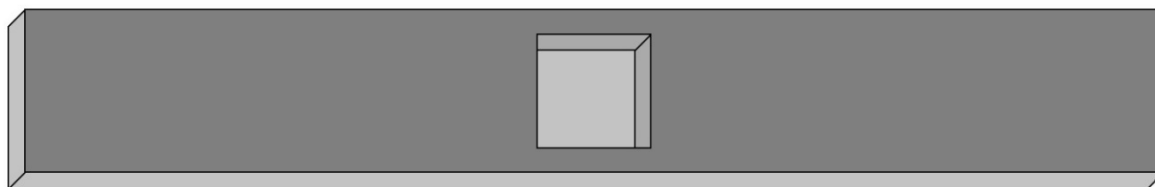


Рисунок ПА 1 Общий вид объекта исследований (схематично)

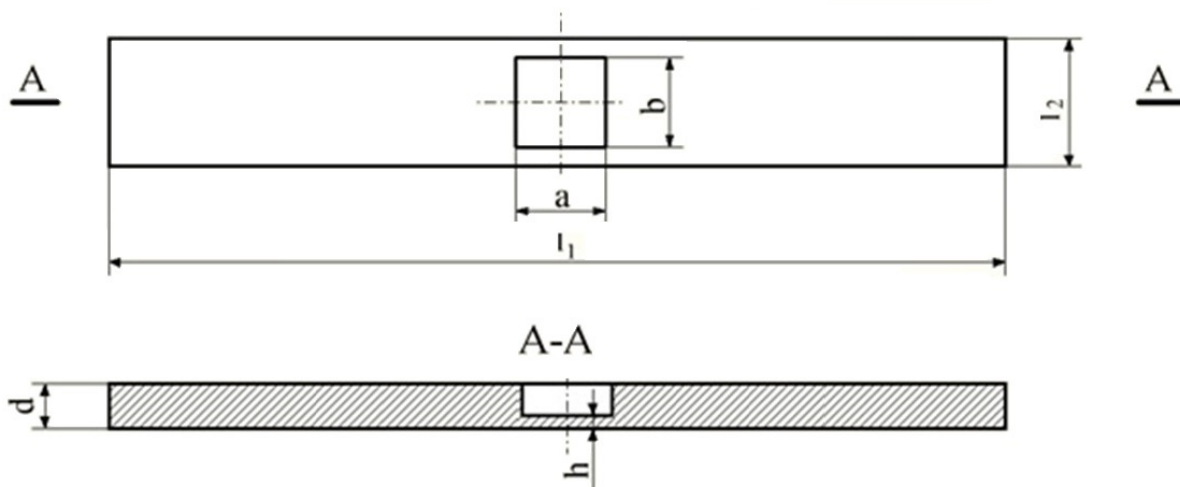


Рисунок ПА 2 Геометрия задачи

В качестве объекта исследования примем тонкую пластину изотропного материала длиной $l_1 = 214$ мм, шириной $l_2 = 31$ мм, толщиной $d = 4$ мм, включающую квадратное отверстие с плоским дном в центре, как показано на Рисунке ПА 1. Стороны квадратного отверстия равны и составляют $a = b = 20$ мм. Толщина пластины в области квадратного отверстия составляет $h = 1,2$ мм. Будем изучать поведение материала пластины в области отверстия, выступающего резонатором, в процессе УЗ возбуждения. Если ширина пластины в области квадратного отверстия (h) намного меньше ширины пластины вне этой зоны (d): $h \ll d$, то тонкую часть пластины в области отверстия с плоским дном можно считать зафиксированной по периметру.

Рассмотрим осесимметричные колебания тонкой изотропной прямоугольной пластины площадью S с зажатыми краями. Введем систему координат таким образом, чтобы сторонам a и b прямоугольника соответствовали оси x и y соответственно, как показано на Рисунке ПА 3.

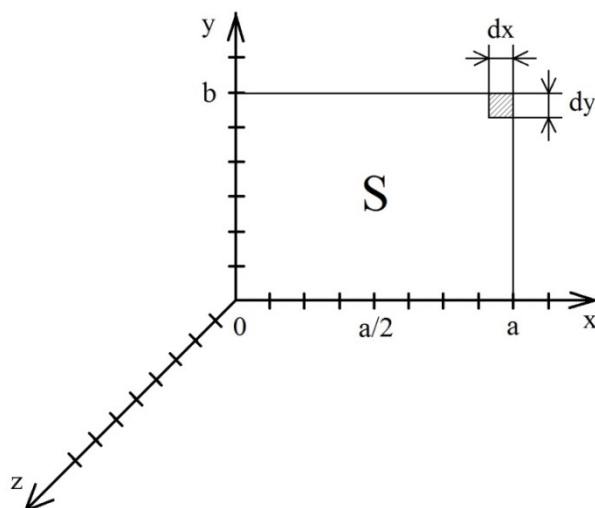


Рисунок ПА 3 Система координат в области несквозного прямоугольного отверстия

Распределение прогиба пластины в квадратном отверстии с плоским дном при динамическом возбуждении, для основного резонанса, при собственных колебаниях пластинки, приведенное в [1], определяется выражением

$$Z = Z_m \times \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a}\right) \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right), \quad (1)$$

где Z_m – максимальное смещение центральной частицы пластины из положения равновесия во время её колебательного движения, вызванного возбуждением частиц среды (амплитуда колебаний в центре пластинки); a, b – стороны прямоугольной пластины.

В случае квадратной пластины, стороны прямоугольника будут равны.

Для оценки эффективной жесткости (k_{eff}) и эффективной массы (M_{eff}) пластины используем выражения для потенциальной W_p и кинетической W_c энергий колебаний прямоугольной пластины, приведенные в [2].

Потенциальная энергия колебаний имеет вид:

$$W_p = \frac{D}{2} \int_0^a \int_0^b \left\{ \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} \times \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} dx dy, \quad (2)$$

где D – изгибная жесткость пластины, которая находится как:

$$D = \frac{E \times h^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (3)$$

где E – модуль Юнга (модуль упругости), ν – коэффициент Пуассона, h – толщина пластинки в области квадратного отверстия.

Произведем расчет потенциальной энергии колебаний прямоугольной пластинки по частям:

$$W_p = \frac{D}{2} \times (W_{p1} + W_{p2} + W_{p3} + W_{p4}),$$

где $W_{p1} = \int_0^a \int_0^b \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} \right)^2 dx dy,$ (4)

$$W_{p2} = \int_0^a \int_0^b \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} \right)^2 dx dy, \quad (5)$$

$$W_{p3} = \int_0^a \int_0^b \left\{ 2\nu \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} \times \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} \right\} dx dy, \quad (6)$$

$$W_{p4} = \int_0^a \int_0^b \left\{ 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} dx dy. \quad (7)$$

Рассмотрим вибрации пластины относительно осей x и y .

$$\frac{dZ}{dx} = Z_m \times \frac{2\pi}{a} \sin \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b} \right)$$

$$\frac{d^2 Z}{dx^2} = Z_m \times \frac{4\pi^2}{a^2} \cos \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b} \right) \quad (8)$$

$$\left(\frac{d^2 Z}{dx^2} \right)^2 = Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^4} \cos^2 \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b} \right)^2 \quad (9)$$

$$\frac{dZ}{dy} = Z_m \times \frac{2\pi}{a} \sin \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b} \right)$$

$$\frac{d^2 Z}{dy^2} = Z_m \times \frac{4\pi^2}{b^2} \cos \frac{2\pi y}{b} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a} \right) \quad (10)$$

$$\left(\frac{d^2 Z}{dy^2} \right)^2 = Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{b^4} \cos^2 \frac{2\pi y}{b} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a} \right)^2 \quad (11)$$

$$\frac{d^2 Z}{dx dy} = Z_m \times \frac{4\pi^2}{ab} \times \sin \frac{2\pi x}{a} \times \sin \frac{2\pi y}{b} \quad (12)$$

$$\left(\frac{d^2 Z}{dx dy} \right)^2 = Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^2 b^2} \times \sin^2 \frac{2\pi x}{a} \times \sin^2 \frac{2\pi y}{b} \quad (13)$$

Подставив выражение (9) в формулу (4), получим:

$$W_{p1} = Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^4} \int_0^a \int_0^b \cos^2 \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b} \right)^2 dx dy$$

Произведем замену:

$$\cos^2 \alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2}$$

$$\cos^2 \frac{2\pi x}{a} = \frac{1 + \cos \frac{4\pi x}{a}}{2}$$

$$\cos^2 \frac{2\pi y}{b} = \frac{1 + \cos \frac{4\pi y}{b}}{2}$$

Тогда:

$$\begin{aligned} W_{p1} &= Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^4} \int_0^b \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right)^2 \times \left(\frac{1}{2}x + \frac{a}{8\pi} \sin \frac{4\pi x}{a}\right) \Big|_0^a dy = \\ &= Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^4} \times \int_0^b \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right)^2 \times \frac{1}{2} a dy = \\ &= Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^4} \times \frac{a}{2} \int_0^b \left(1 - 2\cos \frac{2\pi y}{b} + \cos^2 \frac{2\pi y}{b}\right) dy = \\ &= Z_m^2 \times \frac{8\pi^4}{a^3} \int_0^b \left(y - 2 \times \frac{b}{2\pi} \sin \frac{2\pi y}{b} + \frac{y}{2} + \frac{b}{8\pi} \sin \frac{4\pi y}{b}\right) dy = \\ &= Z_m^2 \times \frac{8\pi^4}{a^3} \times \left(b + \frac{b}{2}\right) = Z_m^2 \frac{12\pi^4 b}{a^3} \\ W_{p1} &= Z_m^2 \frac{12\pi^4 b}{a^3} \end{aligned} \quad (14)$$

Подставив выражение (11) в формулу (5), получим:

$$W_{p2} = Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{b^4} \int_0^a \int_0^b \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a}\right)^2 \times \cos^2 \frac{2\pi y}{b} dx dy$$

Произведем замену:

$$\cos^2 \alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2}$$

$$\cos^2 \frac{2\pi y}{b} = \frac{1 + \cos \frac{4\pi y}{b}}{2}$$

$$\cos^2 \frac{2\pi x}{a} = \frac{1 + \cos \frac{4\pi x}{a}}{2}$$

Тогда:

$$\begin{aligned} W_{p2} &= Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{b^4} \int_0^a \int_0^b \left(1 - 2\cos \frac{2\pi x}{a} + \cos^2 \frac{2\pi x}{a}\right) \times \frac{1 + \cos \frac{4\pi y}{b}}{2} dx dy = Z_m^2 \times \times \\ &\frac{16\pi^4}{b^4} \times \int_0^b \left(x - \frac{a}{\pi} \sin \frac{2\pi x}{a} + \frac{x}{2} + \frac{a}{8\pi} \sin \frac{4\pi x}{a}\right) \times \frac{1 + \cos \frac{4\pi y}{b}}{2} \Big|_0^a dy = \\ &= Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{b^4} \times \frac{3a}{2} \int_0^b \frac{1 + \cos \frac{4\pi y}{b}}{2} dy = Z_m^2 \times \frac{24\pi^4 a}{b^4} \left(\frac{y}{2} + \frac{y}{8\pi} \sin \frac{4\pi y}{b}\right) \Big|_0^b = \\ &= Z_m^2 \times \frac{24\pi^4 a}{b^4} \times \frac{b}{2} = Z_m^2 \frac{12\pi^4 a}{b^3} \\ W_{p2} &= Z_m^2 \frac{12\pi^4 a}{b^3} \end{aligned} \quad (15)$$

Подставив выражения (8) и (10) в формулу (6), получим:

$$\begin{aligned} W_{p3} &= 2v \int_0^a \int_0^b Z_m \times \frac{4\pi^2}{a^2} \cos \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right) \times Z_m \times \frac{4\pi^2}{b^2} \cos \frac{2\pi y}{b} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a}\right) dx dy = \\ &= 2v \times Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^2 b^2} \int_0^a \int_0^b \cos \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right) \times \cos \frac{2\pi y}{b} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a}\right) dx dy = \\ &= 2v \times Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^2 b^2} \int_0^a \int_0^b \left(\cos \frac{2\pi x}{a} - \cos \frac{2\pi x}{a} \times \cos \frac{2\pi y}{b}\right) \times \left(\cos \frac{2\pi y}{b} - -\cos \frac{2\pi y}{b} \times \cos \frac{2\pi x}{a}\right) dx dy = \end{aligned}$$

$$= 2\nu \times Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^2b^2} \int_0^a \int_0^b \left(\cos \frac{2\pi x}{a} \times \cos \frac{2\pi y}{b} - \cos^2 \frac{2\pi x}{a} \times \cos \frac{2\pi y}{b} - -\cos \frac{2\pi x}{a} \times \cos^2 \frac{2\pi y}{b} - \right. \\ \left. -\cos^2 \frac{2\pi x}{a} \times \cos^2 \frac{2\pi y}{b} \right) dx dy$$

Произведем замену:

$$\cos^2 \alpha = \frac{1+\cos 2\alpha}{2}$$

$$\cos^2 \frac{2\pi y}{b} = \frac{1+\cos \frac{4\pi y}{b}}{2}$$

$$\cos^2 \frac{2\pi x}{a} = \frac{1+\cos \frac{4\pi x}{a}}{2}$$

Тогда:

$$W_{p3} = 2\nu \times Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^2b^2} \int_0^a \int_0^b \left(\cos \frac{2\pi x}{a} \times \cos \frac{2\pi y}{b} - \frac{1+\cos \frac{4\pi x}{a}}{2} \times \cos \frac{2\pi y}{b} - -\cos \frac{2\pi x}{a} \times \frac{1+\cos \frac{4\pi y}{b}}{2} + \right. \\ \left. \frac{1+\cos \frac{4\pi x}{a}}{2} \times \frac{1+\cos \frac{4\pi y}{b}}{2} \right) dx dy = \\ = 2\nu \times Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^2b^2} \int_0^b \frac{a}{2\pi} \times \sin \frac{2\pi x}{a} \times \cos \frac{2\pi y}{b} - \left(\frac{x}{2} + \frac{a}{8\pi} \times \sin \frac{4\pi x}{a} \right) \times \cos \frac{2\pi y}{b} - -\frac{a}{2\pi} \times \sin \frac{2\pi x}{a} \times \\ \frac{1+\cos \frac{4\pi y}{b}}{2} + \left(\frac{x}{2} + \frac{a}{8\pi} \times \sin \frac{4\pi x}{a} \right) \times \frac{1+\cos \frac{4\pi y}{b}}{2} \Big|_0^a dy = \\ = 2\nu \times Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^2b^2} \int_0^b \left(-\frac{a}{2} \times \cos \frac{2\pi y}{b} + \frac{a}{2} \times \frac{1+\cos \frac{4\pi y}{b}}{2} \right) dy = \\ = 2\nu \times Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^2b^2} \times \left(-\frac{a}{2} \times \frac{b}{4\pi} \times \sin \frac{2\pi y}{b} + \frac{a}{2} \times \left(\frac{y}{2} + \frac{b}{8\pi} \times \sin \frac{4\pi y}{b} \right) \right) \Big|_0^b = \\ = 2\nu \times Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^2b^2} \times \frac{a}{2} \times \frac{b}{2} = \nu \times Z_m^2 \times 16\pi^4 \times \frac{1}{2ab} \\ W_{p3} = \nu \times Z_m^2 \times 16\pi^4 \times \frac{1}{2ab} \quad (16)$$

Подставив выражение (13) в формулу (7), получим:

$$W_{p4} = \int_0^a \int_0^b \left\{ 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} dx dy = \int_0^a \int_0^b \left\{ 2(1-\nu) \times \left(Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^2b^2} \times \sin^2 \frac{2\pi x}{a} \times \right. \right. \\ \left. \left. \sin^2 \frac{2\pi y}{b} \right) \right\} dx dy = 2(1-\nu) \times Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^2b^2} \int_0^a \int_0^b \sin^2 \frac{2\pi x}{a} \times \sin^2 \frac{2\pi y}{b} dx dy = \\ = 2(1-\nu) \times Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^2b^2} \int_0^a \int_0^b \left(1 - \cos^2 \frac{2\pi x}{a} \right) \times \left(1 - \cos^2 \frac{2\pi y}{b} \right) dx dy$$

Произведем замену:

$$\cos^2 \alpha = \frac{1+\cos 2\alpha}{2}$$

$$\cos^2 \frac{2\pi y}{b} = \frac{1+\cos \frac{4\pi y}{b}}{2}$$

$$\cos^2 \frac{2\pi x}{a} = \frac{1+\cos \frac{4\pi x}{a}}{2}$$

Тогда:

$$W_{p4} = 2(1-\nu) \times Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^2b^2} \int_0^a \int_0^b \left(1 - \frac{1+\cos \frac{4\pi x}{a}}{2} \right) \times \left(1 - \frac{1+\cos \frac{4\pi y}{b}}{2} \right) dx dy =$$

$$\begin{aligned}
&= 2(1 - \nu) \times Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^2 b^2} \int_0^b \left(x - \frac{1}{2}x - \frac{a}{8\pi} \times \sin \frac{4\pi x}{a} \right) \times \left(1 - \frac{1 + \cos \frac{4\pi y}{b}}{2} \right) \Big|_0^a dy = \\
&= 2(1 - \nu) \times Z_m^2 \times \frac{16\pi^4}{a^2 b^2} \int_0^b \frac{a}{2} \left(1 - \frac{1 + \cos \frac{4\pi y}{b}}{2} \right) dy = \\
&= 2(1 - \nu) \times Z_m^2 \times \frac{8\pi^4}{ab^2} \left(y - \frac{1}{2}y - \frac{b}{8\pi} \times \sin \frac{4\pi y}{b} \right) \Big|_0^b = \\
&= 2(1 - \nu) \times Z_m^2 \times \frac{4\pi^4}{ab} \\
W_{p4} &= 2(1 - \nu) \times Z_m^2 \times \frac{4\pi^4}{ab} \tag{17}
\end{aligned}$$

Рассчитаем суммарное значение потенциальной энергии колебаний прямоугольной пластинки:

$$\begin{aligned}
W_p &= \frac{D}{2} \times (W_{p1} + W_{p2} + W_{p3} + W_{p4}) \\
W_p &= \frac{D}{2} \times \left(Z_m^2 \frac{12\pi^4 b}{a^3} + Z_m^2 \frac{12\pi^4 a}{b^3} + \nu \times Z_m^2 \times 16\pi^4 \times \frac{1}{2ab} + 2(1 - \nu) \times Z_m^2 \times \frac{4\pi^4}{ab} \right) = \\
&= \frac{D}{2} \times Z_m^2 \times 16\pi^4 \left(\frac{3a^4 + 3b^4}{4a^3 b^3} + \frac{\nu}{2ab} + \frac{1 - \nu}{2ab} \right) = \\
&= \frac{D}{2} \times Z_m^2 \times 16\pi^4 \left(\frac{3a^4 + 3b^4}{4a^3 b^3} + \frac{1}{2ab} \right) = \frac{D}{2} \times Z_m^2 \times 16\pi^4 \left(\frac{3a^4 + 3b^4 + 2a^2 b^2}{4a^3 b^3} \right)
\end{aligned}$$

Таким образом, суммарное значение потенциальной энергии колебаний прямоугольной пластины находится как:

$$W_p = \frac{D}{2} \times Z_m^2 \times 16\pi^4 \left(\frac{3a^4 + 3b^4 + 2a^2 b^2}{4a^3 b^3} \right) \tag{18}$$

С другой стороны, потенциальная энергия деформации находится как [3]:

$$W_p = \frac{k_{eff} \times \Delta Z_{eff}^2}{2} \tag{19}$$

где k_{eff} – эффективная жесткость, а ΔZ_{eff} – эффективное смещение.

Для вычисления эффективного смещения, усредняем колебания (1) по площади вибрирующей пластины S:

$$\Delta Z_{eff} = \frac{1}{ab} \times \int_0^a \int_0^b Z dx dy \tag{20}$$

Воспользуемся формулой распределения прогиба пластины (Z) в квадратном отверстии с плоским дном при собственных колебаниях пластинки (1). Подставив это выражение в формулу для вычисления эффективного смещения, получим:

$$\begin{aligned}
\Delta Z_{eff} &= \frac{1}{ab} \times Z_m \int_0^a \int_0^b \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a} \right) \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b} \right) dx dy = \\
&= \frac{1}{ab} \times Z_m \int_0^b \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b} \right) \times \left(x - \frac{a}{2\pi} \sin \frac{2\pi x}{a} \right) \Big|_0^a dy = \\
&= \frac{1}{ab} \times Z_m \int_0^b \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b} \right) \times \left(a - \frac{a}{2\pi} \sin \frac{2\pi a}{a} \right) dy = \\
&= \frac{1}{ab} \times Z_m \times a \int_0^b \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b} \right) dy = \frac{1}{ab} \times Z_m \times a \left(y - \frac{b}{2\pi} \sin \frac{2\pi y}{b} \right) \Big|_0^b =
\end{aligned}$$

$$= \frac{1}{ab} \times Z_m \times a(b - \frac{b}{2\pi} \sin \frac{2\pi b}{b}) = \frac{1}{ab} \times Z_m \times ab = Z_m$$

$$\Delta Z_{eff} = Z_m \quad (21)$$

Оценим скорость движения точки максимума поверхности S в центре пластинки:

$$v_{eff} = \frac{\omega_0}{2\pi} \times Z_m,$$

где $\frac{\omega_0}{2\pi}$ – основная частота колебаний пластинки.

Для нахождения k_{eff} , приравниваем выражения (18) и (19), и, с учетом выражения (6), получаем:

$$\frac{k_{eff} \times \Delta Z_{eff}^2}{2} = \frac{k_{eff} \times Z_m^2}{2} = \frac{D}{2} \times Z_m^2 \times 16\pi^4 \left(\frac{3a^4 + 3b^4 + 2a^2b^2}{4a^3b^3} \right) \quad (22)$$

$$k_{eff} = D \times 16\pi^4 \left(\frac{3a^4 + 3b^4 + 2a^2b^2}{4a^3b^3} \right) \quad (23)$$

Эффективную массу части пластины, вовлеченную в процесс колебания, т.е. массу эффективного объема пластины, в котором происходит основная доля деформационных процессов, найдем из выражения для кинетической энергии, приведенной в [2]:

$$W_c = \frac{\rho h}{2} \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} \int_0^a \int_0^b Z^2 dx dy \quad (24)$$

Подставив выражение (1) в формулу (24), получаем:

$$\begin{aligned} W_c &= \frac{\rho h}{2} \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} Z_m \int_0^a \int_0^b (1 - \cos \frac{2\pi x}{a})^2 (1 - \cos \frac{2\pi y}{b})^2 dx dy = \\ &= \frac{\rho h}{2} \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} Z_m^2 \int_0^a \int_0^b (1 - \cos \frac{2\pi y}{b})^2 (1 - 2\cos \frac{2\pi x}{a} + \cos^2 \frac{2\pi x}{a}) dx dy = \\ &= \frac{\rho h}{2} \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} Z_m^2 \int_0^a \int_0^b (1 - \cos \frac{2\pi y}{b})^2 (1 - 2\cos \frac{2\pi x}{a} + \frac{1 + \cos \frac{4\pi x}{a}}{2}) dx dy = \\ &= \frac{\rho h}{2} \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} Z_m^2 \int_0^b (1 - \cos \frac{2\pi y}{b})^2 (x - \frac{2a}{2\pi} \sin \frac{2\pi x}{a} + \frac{1}{2}x + \frac{a}{8\pi} \sin \frac{4\pi x}{a}) \Big|_0^a dy = \\ &= \frac{\rho h}{2} \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} Z_m^2 \int_0^b \frac{3}{2} a (1 - 2\cos \frac{2\pi y}{b} + \cos^2 \frac{2\pi y}{b}) dy = \\ &= \frac{\rho h}{2} \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} Z_m^2 \frac{3}{2} a (y - \frac{2b}{2\pi} \sin \frac{2\pi y}{b} + \frac{1}{2}y + \frac{b}{8\pi} \sin \frac{4\pi y}{b}) \Big|_0^b = \\ &= \frac{\rho h}{2} \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} Z_m^2 \frac{3}{2} a (b - \frac{2b}{2\pi} \sin \frac{2\pi b}{b} + \frac{1}{2}b + \frac{b}{8\pi} \sin \frac{4\pi b}{b}) = \frac{\rho h \omega^2}{2} Z_m^2 \times \frac{3}{2} a \times \frac{3}{2} b = \\ &= \frac{\rho h}{2} \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} Z_m^2 \times \frac{9}{4} ab \end{aligned}$$

$$W_c = \frac{9\rho hab}{8} \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} Z_m^2 \quad (25)$$

С другой стороны, кинетическая энергия деформации находится [3]:

$$W_c = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} M_{eff} \times v_{eff}^2, \quad (26)$$

где v_{eff} – колебательная скорость

$$W_c = \frac{1}{2} M_{eff} \times (\frac{\omega_0}{2\pi} \times Z_m)^2 \quad (27)$$

Приравнивая выражения (27) и (25), получаем:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{2} M_{eff} \times \left(\frac{\omega_0}{2\pi} \times Z_m \right)^2 &= \frac{9\rho h a b}{8} \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} Z_m^2 \\
M_{eff} &= \frac{18\rho h a b \times Z_m^2 \times \omega_0^2 \times 4\pi^2}{8 Z_m^2 \times \omega_0^2 \times 4\pi^2} = \frac{9}{4} \rho h a b \\
M_{eff} &= \frac{9}{4} \rho h a b
\end{aligned} \tag{28}$$

Таким образом, выражение для нахождения основной частоты колебаний пластины в области прямоугольного отверстия будет иметь вид [3]:

$$\begin{aligned}
\omega_0 &= \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{k_{eff}}{M_{eff}}} = \sqrt{\frac{D \times 16\pi^4 \left(\frac{3a^4 + 3b^4 + 2a^2b^2}{4a^3b^3} \right)}{\frac{9}{4}\rho h a b}} = \sqrt{\frac{4 \times D \times 16\pi^4 \times (3a^4 + 3b^4 + 2a^2b^2)}{4a^3b^3 \times 9\rho h a b}} = \\
&= \frac{4\pi^2}{3a^2b^2} \sqrt{\frac{D(3a^4 + 3b^4 + 2a^2b^2)}{\rho h}} \\
\omega_0 &= \frac{4\pi^2}{3a^2b^2} \sqrt{\frac{D(3a^4 + 3b^4 + 2a^2b^2)}{\rho h}}
\end{aligned} \tag{29}$$

Подставим формулу для нахождения изгибной жесткости пластины (3) в выражение (29), получим:

$$\begin{aligned}
\omega_0 &= \frac{4\pi^2}{3a^2b^2} \sqrt{\frac{E h^3 (3a^4 + 3b^4 + 2a^2b^2)}{\rho h \times 12(1-\nu^2)}} = \frac{2\pi^2}{3a^2b^2} \sqrt{\frac{E h^2 (3a^4 + 3b^4 + 2a^2b^2)}{3\rho(1-\nu^2)}} \\
\omega_0 &= \frac{2\pi^2}{3a^2b^2} \sqrt{\frac{E h^2 (3a^4 + 3b^4 + 2a^2b^2)}{3\rho(1-\nu^2)}}
\end{aligned} \tag{30}$$

Для линейной частоты получаем:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{3a^2b^2} \sqrt{\frac{E h^2 (3a^4 + 3b^4 + 2a^2b^2)}{3\rho(1-\nu^2)}} \tag{31}$$

Литература

1. Arthur, W.L. Vibration of plates / Arthur, W.Leissa // Scientific and Technical' Information Division. Office of technology utilization, NASA, Washington DC – 1969.
1. Timoshenko, S.P. Vibration Problems in Engineering / Timoshenko S.P. // D. Van Nostrand Company, 4th Ed. – 1956.
2. Савельев, И.В. Курс общей физики / Савельев И.В. – Том 1. Механика, колебания и волны, молекулярная физика. – М.: Наука, 1970. – 517 с.

Теоретический расчет частоты резонанса пластины в области круглого отверстия

Произведем теоретический расчет частоты резонанса дефекта пластины в виде несквозного круглого отверстия с плоским дном, а также определим область применимости данной модели для оценки частоты резонанса дефекта. Общий вид объекта исследований (Рисунок ПБ1) и геометрия задачи (Рисунок ПБ2) приведены ниже.

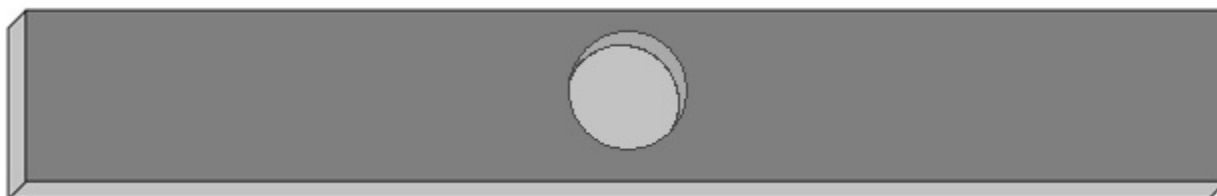


Рисунок ПБ 1 Общий вид объекта исследований (схематично)

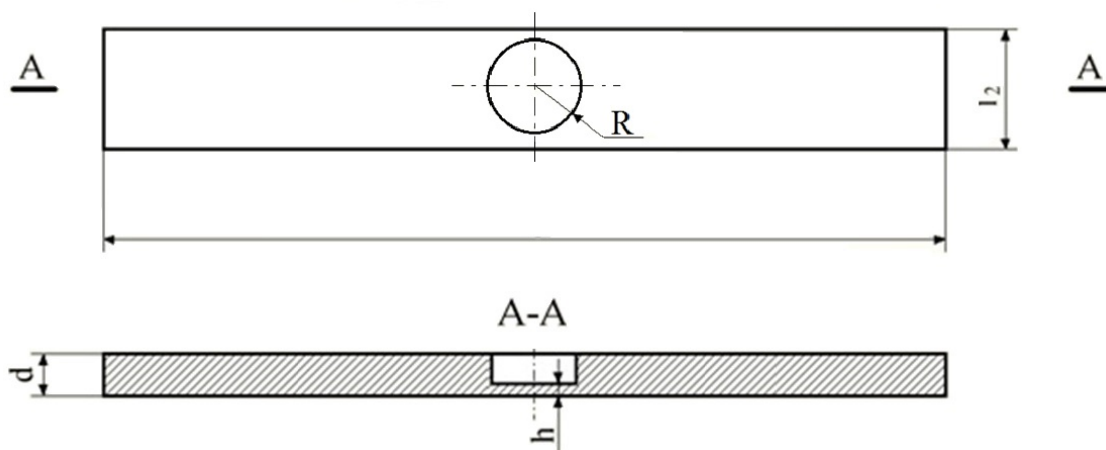


Рисунок ПБ 2 Геометрия задачи

Рассмотрим пластину в области круглого отверстия в качестве резонатора, частицы которого совершают колебания под воздействием ультразвукового возбуждения. Если ширина пластины в области квадратного отверстия (h) намного меньше ширины пластины вне этой зоны (d): $h \ll d$, тонкую часть пластины в области несквозного отверстия можно считать зафиксированной по периметру.

Рассмотрим осесимметричные колебания тонкой изотропной пластины в области круглого отверстия радиуса R , толщиной h и площадью S с зажатыми краями. Введем полярную систему координат (ρ, φ) в центре пластины, как показано на Рисунке ПБ 3.

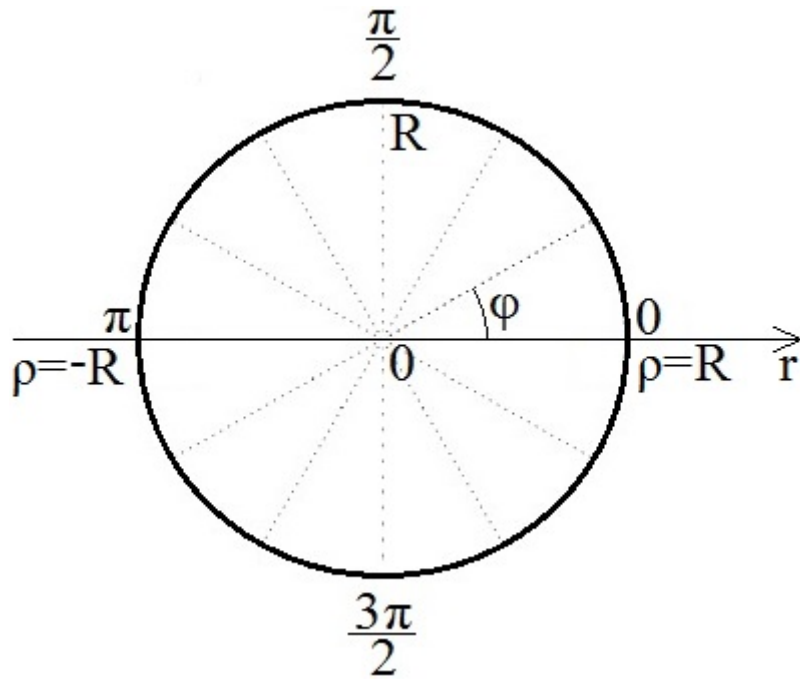


Рисунок ПБ 3 Система координат в области несквозного круглого отверстия

Вибрации на поверхности пластины в области круглого отверстия сопровождаются деформациями растяжения-сжатия в плоскости пластины (ϵ_r), причем, как известно из [2], они равны нулю в средней плоскости пластины и достигают максимальных значений на его обеих поверхностях:

$$\epsilon_r = \frac{d}{2} \times \frac{\partial^2 U(r)}{\partial r^2}, \quad (1)$$

где d - толщина пластины в области отверстия, r – координата радиуса отверстия ($r = -R \dots R$), R – радиус отверстия.

Для основного резонанса, радиальное распределение прогиба пластинки $U(r)$ в круглых несквозных отверстиях радиуса R при динамическом возбуждении, для основного резонанса, при собственных колебаниях пластинки, определяется выражением [1]:

$$U(r) = U_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^2, \quad (2)$$

где U_0 – амплитуда колебаний в центре пластины, R – радиус отверстия.

Для оценки эффективной жесткости (k_{eff}) и эффективной массы (M_{eff}) пластинки используем выражения для потенциальной W_p и кинетической W_c энергий колебаний прямоугольной пластинки, приведенные в [2].

Потенциальная энергия колебаний имеет вид:

$$W_p = \pi D \int_0^R \left(\frac{\partial^2 U(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial U(r)}{\partial r} \right)^2 r dr, \quad (3)$$

где D – изгибная жесткость пластины, определяемая как

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (4)$$

где E – модуль Юнга (модуль упругости), ν – коэффициент Пуассона, h – толщина пластины в области круглого отверстия.

Произведем расчет потенциальной энергии колебаний:

$$W_p = \pi D \int_0^R \left(\frac{\partial^2 U(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial U(r)}{\partial r} \right)^2 r dr = \pi D \int_0^R \left(\left(\frac{\partial^2 U(r)}{\partial r^2} \right)^2 + \frac{2}{r} \times \frac{\partial^2 U(r)}{\partial r^2} \times \frac{\partial U(r)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial U(r)}{\partial r} \right)^2 \right) r dr$$

Произведем расчет потенциальной энергии колебаний прямоугольной пластины по частям:

$$W_p = \pi D \times (W_{p1} + W_{p2} + W_{p3}),$$

$$\text{где } W_{p1} = \int_0^R \left(\frac{\partial^2 U(r)}{\partial r^2} \right)^2 r dr, \quad (5)$$

$$W_{p2} = \int_0^R \frac{2}{r} \times \frac{\partial^2 U(r)}{\partial r^2} \times \frac{\partial U(r)}{\partial r} r dr, \quad (6)$$

$$W_{p3} = \int_0^R \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial U(r)}{\partial r} \right)^2 r dr, \quad (7)$$

Рассмотрим вибрации пластины относительно радиуса R путем дифференцирования выражения (2) по r :

$$\frac{\partial U(r)}{\partial r} = -4U_0 \frac{r}{R^2} + 4U_0 \frac{r^3}{R^4} \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 U(r)}{\partial r^2} = -4 \frac{U_0}{R^2} + 12U_0 \frac{r^2}{R^4} \quad (9)$$

Подставив выражение (9) в формулу (5), получим значение W_{p1} :

$$\begin{aligned} W_{p1} &= \int_0^R \left(\frac{\partial^2 U(r)}{\partial r^2} \right)^2 r dr = \int_0^R \left(-4 \frac{U_0}{R^2} + 12U_0 \frac{r^2}{R^4} \right)^2 r dr = \\ &= \int_0^R \left(16 \frac{U_0^2}{R^4} - 96 \frac{U_0^2 r^2}{R^6} + 144 \frac{U_0^2 r^4}{R^8} \right) r dr = \\ &= \left(16 \frac{U_0^2 r^2}{2R^4} - 96 \frac{U_0^2 r^4}{4R^6} + 144 \frac{U_0^2 r^6}{6R^8} \right) \Big|_0^R = \\ &= 8 \frac{U_0^2}{R^2} - 24 \frac{U_0^2}{R^2} + 24 \frac{U_0^2}{R^2} = 8 \frac{U_0^2}{R^2} \\ W_{p1} &= 8 \frac{U_0^2}{R^2} \end{aligned} \quad (10)$$

Подставив выражения (8) и (9) в формулу (6), получим значение W_{p2} :

$$\begin{aligned} W_{p2} &= \int_0^R \frac{2}{r} \times \frac{\partial^2 U(r)}{\partial r^2} \times \frac{\partial U(r)}{\partial r} r dr = \\ &= \int_0^R \frac{2}{r} \times \left(-4 \frac{U_0}{R^2} + 12U_0 \frac{r^2}{R^4} \right) \times \left(-4U_0 \frac{r}{R^2} + 4U_0 \frac{r^3}{R^4} \right) r dr = \\ &= 2 \int_0^R \left(16 \frac{U_0^2 r}{R^4} - 16 \frac{U_0^2 r^3}{R^6} - 48 \frac{U_0^2 r^3}{R^6} + 48 \frac{U_0^2 r^5}{R^8} \right) dr = \\ &= 2 \left(16 \frac{U_0^2 r^2}{2R^4} - 16 \frac{U_0^2 r^4}{4R^6} - 48 \frac{U_0^2 r^4}{4R^6} + 48 \frac{U_0^2 r^6}{6R^8} \right) \Big|_0^R = \end{aligned}$$

$$= 2 \left(8 \frac{U_0^2}{R^2} - 4 \frac{U_0^2}{R^2} - 12 \frac{U_0^2}{R^2} + 8 \frac{U_0^2}{R^2} \right) = 0$$

$$W_{p2} = 0 \quad (11)$$

Подставив выражение (8) в формулу (7), получим значение W_{p3} :

$$\begin{aligned} W_{p3} &= \int_0^R \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial U(r)}{\partial r} \right)^2 r dr = \int_0^R \frac{1}{r^2} \left(-4U_0 \frac{r}{R^2} + 4U_0 \frac{r^3}{R^4} \right)^2 r dr = \\ &= \int_0^R \frac{1}{r^2} \left(-4U_0 \frac{r}{R^2} + 4U_0 \frac{r^3}{R^4} \right)^2 r dr = \int_0^R \frac{1}{r} \left(16 \frac{U_0^2 r^2}{R^4} - 32 \frac{U_0^2 r^4}{R^6} + 16 \frac{U_0^2 r^6}{R^8} \right) dr = \\ &= \int_0^R \left(16 \frac{U_0^2 r}{R^4} - 32 \frac{U_0^2 r^3}{R^6} + 16 \frac{U_0^2 r^5}{R^8} \right) dr = \\ &= \left(16 \frac{U_0^2 r^2}{2R^4} - 32 \frac{U_0^2 r^4}{4R^6} + 16 \frac{U_0^2 r^6}{6R^8} \right) \Big|_0^R = \\ &= 8 \frac{U_0^2}{R^2} - 8 \frac{U_0^2}{R^2} - \frac{8}{3} \frac{U_0^2}{R^2} = \frac{8}{3} \frac{U_0^2}{R^2} \\ W_{p3} &= \frac{8}{3} \frac{U_0^2}{R^2} \end{aligned} \quad (12)$$

Рассчитаем суммарное значение потенциальной энергии колебаний пластинки в области несквозного круглого отверстия:

$$W_p = \pi D \times (W_{p1} + W_{p2} + W_{p3}) = \pi D \times \left(8 \frac{U_0^2}{R^2} + \frac{8}{3} \frac{U_0^2}{R^2} \right) = \frac{32}{3} \frac{U_0^2 \pi D}{R^2}$$

$$W_p = \frac{32}{3} \frac{U_0^2 \pi D}{R^2} \quad (13)$$

С другой стороны, потенциальная энергия деформации находится как [3]:

$$W_p = \frac{k_{eff} \times \Delta Z_{eff}^2}{2} \quad (14)$$

где k_{eff} – эффективная жесткость, а ΔZ_{eff} – эффективное смещение.

Для вычисления эффективного смещения, усредняем колебания (1) по площади вибрирующей поверхности пластины S с использованием теоремы о среднем:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{eff} &= \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R U(r) 2\pi r dr \\ \Delta Z_{eff} &= \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R U_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^2 2\pi r dr = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R U_0 \left(1 - 2 \frac{r^2}{R^2} + \frac{r^4}{R^4} \right) 2\pi r dr = \\ &= \frac{2\pi}{\pi R^2} U_0 \left(\frac{r^2}{2} - 2 \frac{r^4}{4R^2} + \frac{r^6}{6R^4} \right) \Big|_0^R = \frac{2}{R^2} U_0 \left(\frac{R^2}{2} - \frac{R^2}{2} + \frac{R^2}{6} \right) \Big|_0^R = \frac{U_0}{3} \\ \Delta Z_{eff} &= \frac{U_0}{3} \end{aligned} \quad (15)$$

Оценим скорость движения точки поверхности S в центре пластинки:

$$v_{eff} = \frac{\omega_0}{2\pi} \times \Delta Z_{eff}, \quad (17)$$

где ω_0 – основная частота колебаний пластинки.

Для нахождения k_{eff} , приравняем выражения (13) и (14), и, с учетом выражения (16), получаем:

$$\frac{k_{eff} \times \Delta Z_{eff}^2}{2} = \frac{k_{eff} \times U_0^2}{18} = \frac{32 U_0^2 \pi D}{3 R^2} \quad (18)$$

$$k_{eff} = 192 \frac{\pi D}{R^2} \quad (19)$$

Эффективную массу части пластины, вовлеченную в процесс колебания, т.е. массу эффективного объема пластинки, в котором происходит основная доля деформационных процессов, найдем из выражения для кинетической энергии, приведенной в [2]:

$$W_c = \pi \rho h \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} \int_0^R U(r)^2 r dr, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} W_c &= \pi \rho h \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} \int_0^R (U_0(1 - \frac{r^2}{R^2})^2)^2 r dr = \pi \rho h \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} U_0^2 \int_0^R (1 - \frac{r^2}{R^2})^4 r dr = \\ &= \pi \rho h \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} U_0^2 \int_0^R (1 - 4\frac{r^2}{R^2} + 6\frac{r^4}{R^4} - 4\frac{r^6}{R^6} + \frac{r^8}{R^8}) r dr = \\ &= \pi \rho h \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} U_0^2 (\frac{r^2}{2} - 4\frac{r^4}{4R^2} + 6\frac{r^6}{6R^4} - 4\frac{r^8}{8R^6} + \frac{r^{10}}{10R^8}) \Big|_0^R = \\ &= \pi \rho h \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} U_0^2 (\frac{R^2}{2} - R^2 + R^2 - \frac{R^2}{2} + \frac{R^2}{10}) = \pi \rho h \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} U_0^2 \frac{R^2}{10} \\ W_c &= \pi \rho h \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} U_0^2 \frac{R^2}{10}, \end{aligned} \quad (21)$$

С другой стороны, кинетическая энергия деформации находится [3]:

$$W_c = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} M_{eff} \times v_{eff}^2, \quad (22)$$

где v_{eff} – колебательная скорость

$$W_c = \frac{1}{2} M_{eff} \times (\frac{\omega_0}{2\pi} \times \Delta Z_{eff})^2 \quad (23)$$

Приравнявая выражения (21) и (23), получаем:

$$\begin{aligned} W_c &= \pi \rho h \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} U_0^2 \frac{R^2}{10} = \frac{M_{eff} U_0^2 \frac{\omega_0^2}{4\pi^2}}{18} \\ M_{eff} &= \pi \rho h \frac{18 R^2}{10} = 1,8 m, \\ m &= \pi R^2 \rho h. \end{aligned} \quad (24)$$

Таким образом, выражение для нахождения основной частоты колебаний пластины в области прямоугольного отверстия будет иметь вид [3]:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{k_{eff}}{M_{eff}}} = \sqrt{\frac{192 \pi D}{R^2 \times 1,8 m}} \quad (25)$$

Подставим формулу для нахождения изгибной жесткости пластины (4) в выражение (25), получим:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{192 \pi E h^3}{12(1-\nu^2) R^2 \times 1,8 \pi R^2 \rho h}} \approx \frac{10,3 h}{R^2} \sqrt{\frac{E}{12(1-\nu^2) \rho}}, \quad \omega_0 = \frac{10,3 h}{R^2} \sqrt{\frac{E}{12(1-\nu^2) \rho}} \quad (26)$$

Для линейной частоты получаем:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1,6 h}{R^2} \sqrt{\frac{E}{12(1-\nu^2) \rho}} \quad (27)$$

Литература

1. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика
Теория упругости / Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. // 4-е изд., испр. -М.: Наука. Гл. ред. физ.-
мат. лит. – 1987. – 248 с. (т. VII)
2. Timoshenko, S.P. Vibration Problems in Engineering / Timoshenko S.P. // D. Van Nostrand
Company, 4th Ed. – 1956.
3. Савельев, И.В. Курс общей физики/ Савельев И.В. – Том 1. Механика, колебания и
волны, молекулярная физика. – М.: Наука, 1970. – 517 с.

Акт использования результатов диссертационных исследований



Закрытое акционерное общество
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ИНТРОСКОПИИ
МНПО «СПЕКТР»

Joint Stock Company
RESEARCH INSTITUTE OF INTROSCOPY of MSIA "SPECTRUM"

Россия, 119048, Москва, ул. Усачева, 35, стр. 1
Телефон: (499) 245-5656
Факс: (499) 246-8888
E-mail: niin@spektr-group.ru, spektr@co.ru

Build. 1, 35 St. Usacheva, Moscow, 119048, Russia
Phone: (499) 245-5656
Fax: (499) 246-8888
www.niin.ru, spektr-group.ru

№ 20-91/44

« 30 » 05 2016 г.

УТВЕРЖДАЮ
Директор
ЗАО НИИИ МНПО «СПЕКТР»



В.В. Ключев

СПРАВКА

об использовании материалов диссертационной работы
Д.А. Дерусовой «ТЕПЛОВОЙ ВИБРОТЕРМОГРАФИЧЕСКИЙ
КОНТРОЛЬ КОМПОЗИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗОНАНСНОЙ
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ»,
выполненной в Национальном исследовательском Томском
политехническом университете и представленной по специальности
05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ,
материалов и изделий»

В диссертации Д.А. Дерусовой разработана новая разновидность теплового контроля, основанная на стимуляции внутренних структурных дефектов в твердых телах механическими волнами ультразвукового диапазона с одновременной регистрацией возникающего температурного поля с помощью инфракрасных тепловизоров. В особенности, в работе подробно рассмотрен принцип резонансной ультразвуковой стимуляции, что позволило преодолеть один из основных недостатков ультразвуковой термографии, а именно, потенциальную возможность повреждения контролируемого материала мощным ультразвуком. В диссертации содержатся подробные сведения методологического характера, позволяющие

выполнять расчеты необходимых параметров теплового контроля. Описана аппаратура, реализующая как магнитострикционный, так и пьезоэлектрический способ возбуждения ультразвука, что позволяет обоснованно начать и планировать исследования по вибротермографическому контролю в лабораториях неразрушающих испытаний. Диссертация содержит конкретные результаты по контролю композитов авиакосмического профиля, прежде всего, углепластика, а также принципы и результаты использования лазерной виброметрии в ультразвуковом инфракрасном контроле.

Как результат научного сотрудничества между МНПО «Спектр» и Томским политехническим университетом в области неразрушающего контроля, существующего в течение нескольких десятилетий, в МНПО «Спектр» использованы следующие результаты диссертационных исследований Д.А. Дерусовой:

- 1) методика расчета резонансных частот дефектов простой формы;
- 2) методика оценки эквивалентной мощности тепловыделения в дефектах, облучаемых ультразвуком, путем расчета теплофизической задачи с множественными термоисточниками;
- 3) рекомендации по разработке аппаратуры ультразвуковой ИК термографии с использованием магнитострикторов и пьезоэлектрических преобразователей;
- 4) экспериментальные данные по контролю ударных повреждений в композитах, что позволило оценить предельные возможности вышеуказанного метода.

Ученый секретарь
д.т.н., профессор



Артемьев Б.В.