

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ХОРЕВ ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ

**УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИНФРАКРАСНАЯ ТЕРМОГРАФИЯ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

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 2013

Содержание

Термины и определения	С. 4
Обозначения и сокращения	5
Введение	6
1 Контроль полимерных композиционных материалов и изделий (обзор)	12
1.1 Историческая справка и современное состояние инфракрасной термографии	12
1.2 Основные термины, используемые в тепловом контроле	14
1.3 Современные тепловизоры и источники нагрева	18
1.4 Полимерные композиционные материалы (обзор)	19
1.5 Обзор методов контроля полимерных композиционных материалов и изделий	20
1.5.1 Ультразвуковой метод контроля	20
1.5.2 Визуально - измерительный метод контроля	22
1.5.3 Радиационный метод контроля	22
1.5.4 Тепловой метод контроля	22
1.6 Базовые процедуры активного теплового контроля	26
1.7 Выводы к первой главе	28
2 Физические основы контроля полимерных композиционных материалов методом УЗ ИК термографии	30
2.1 Анализ термоупругих напряжений	30
2.2 Ультразвуковая ИК термография	32
2.3 Выводы ко второй главе	35
3 Моделирование термомеханических эффектов в материалах со структурными неоднородностями при использовании метода УЗ ИК термографии	37
3.1 Феноменологическая модель тепловыделения в дефекте	37
3.2 Термомеханическая модель УЗ ИК термографии	40
3.2.1 Решение трехмерной задачи распространения механических колебаний в твердом теле	41
3.2.2 Решение трехмерной задачи распространения тепла в дефектных зонах	48
3.3 Приближенная оценка эквивалентного тепловыделения в дефекте (сравнение теории и эксперимента)	51
3.4 Анализ термомеханической модели на основе ТК углепластикового композита	55
3.5 Выводы к третьей главе	59
4 Аппаратура для экспериментальных исследований в области УЗ ИК термографии	61
4.1 Установка для непрерывной УЗ стимуляции дефектов	61
4.2 Установка для импульсной УЗ стимуляции дефектов	63
4.3 Тепловизионная система	65

	С.
4.4 Выводы к четвертой главе	66
5 Экспериментальные исследования УЗ ИК термографического контроля полимерных композиционных материалов	68
5.1 Влияние мощности и длительности УЗ стимуляции на температурные сигналы	69
5.1.1 Дифференциальный температурный сигнал	70
5.1.2 Отношение дифференциального сигнала к электрической мощности на инденторе	73
5.1.3 Отношение сигнал/шум	75
5.2 Температурные распределения в дефектных зонах	78
5.3 Исследование влияния иммерсионной жидкости на интенсивность УЗ стимуляции	80
5.4 Угол ультразвукового облучения и расстояние между точкой ввода ультразвука и точкой наблюдения	83
5.4.1 Взаимная ориентация точки ввода ультразвука и дефектов	83
5.4.2 Расстояние от точки ввода ультразвука до дефектов	88
5.4.3 Производительность УЗ ИК термографического контроля	91
5.5 Стоячие УЗ волны	92
5.6 Экспериментальные иллюстрации применения УЗ ИК термографии к неразрушающему контролю полимерных композиционных материалов, используемых в авиакосмической промышленности	93
5.6.1 Цилиндрические образцы из углепластика	93
5.6.2 Ударные повреждения в углепластиках	94
5.6.3 Теплозащитные покрытия	96
5.6.4 Сравнение оптической и УЗ стимуляции	97
5.6.5 Сотовые структуры	100
5.7 Выводы к пятой главе	104
Основные результаты диссертационных исследований	106
Публикации автора по теме диссертационных исследований	110
Список использованных источников	111
Приложение А. Справка об использовании диссертационных исследований в ОАО «ННКЦ»	118
Приложение Б. Справка об использовании диссертационных исследований в МНПО «Спектр»	119

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.

Ультразвуковая инфракрасная термография - инфракрасная термография, при которой регистрируемые температурные поля обусловлены ультразвуковой стимуляцией.

Тепловой неразрушающий контроль - метод (вид) неразрушающего контроля материалов и изделий, основанный на регистрации и анализе температурных сигналов на поверхности объектов контроля, которые, как правило, возникают в результате тепловой стимуляции материала.

Температурное поле - распределение поверхностной температуры на контролируемом участке объекта контроля.

Тепловой поток (мощность теплового потока) - тепловая энергия, передаваемая через объект контроля в единицу времени (обычно на единицу площади) Вт, Вт/м².

Теплопроводность (коэффициент теплопроводности) λ - справочная характеристика материала, характеризующая мощность теплового потока, распространяющегося от точки с большей температурой к точке с меньшей температурой, Вт/(м·К) (стеклопластик: $\lambda = 0.2$ Вт/(м·К), углепластик: $\lambda = 0.6$ Вт/(м·К), титан: $\lambda = 14$ Вт/(м·К)).

Температуропроводность (коэффициент температуропроводности) α - справочная характеристика материала, характеризующая скорость изменения температуры материала в условиях нестационарного теплообмена, м²/с.

Обозначения и сокращения

- T - температура (в активном тепловом контроле - избыточная температура), °С;
- T_{in} - начальная температура изделия, °С;
- ΔT - дифференциальный температурный сигнал, °С;
- α - температуропроводность материала, м²/с;
- λ, K - теплопроводность материала, Вт/(м·К);
- ρ - плотность материала, кг/м³;
- C - теплоемкость материала, Дж/(кг·К)
- x, y, z - декартовы координаты;
- q - одна из декартовых координат x, y или z , м;
- τ - текущее время, с;
- τ_h - время нагрева, с;
- $Q(x, y, \tau)$ - плотность мощности внешнего потока нагрева, изменяется во времени и в пространстве, Вт/м²;
- W - энергия импульса нагрева, Дж;
- h_F, h_R - коэффициенты теплообмена на передней и задней поверхностях, (м²·К)/Вт;
- T_{amb} - температура окружающей среды, °С;
- L_x, L_y, L_z - размеры изделия по 3-м декартовым координатам, м;
- L - толщина изделия, м;
- l - толщина покрытия, м;
- d - толщина дефекта, м;
- C - теплоемкость материала, Дж/(кг·К), или $C(\tau) = \Delta T(\tau)/T(\tau)$ - температурный контраст;
- ИК* - инфракрасный;
- ТНК* - тепловой неразрушающий контроль;
- ТК* - тепловой контроль;
- ТФХ* - теплофизические характеристики;
- ТД* - техническая диагностика;
- УЗ* - ультразвуковой;
- НК* - неразрушающий контроль;

Введение

Актуальность диссертационных исследований. В российской и зарубежной промышленности широко применяются так называемые *новые конструкционные материалы*, к которым, в частности, относятся современные композиционные материалы, отличающиеся высокой прочностью и технологичностью при малом удельном весе. К новому поколению композиционных материалов, пришедших на смену легкосплавным металлам, относят углеродные композиты, характеризующиеся отличными прочностными характеристиками и высоким температурным порогом деструкции. Однако, при всех их достоинствах, композиционные материалы и изделия из них могут обладать специфическими дефектами, которые образуются в процессе производства и эксплуатации. В частности, одним из популярных материалов в авиакосмической технике является углепластиковый композит, который подвержен растрескиванию и расслоениям вследствие ударных и циклических нагрузок.

Согласно общепринятому определению, *композиционные материалы* представляют собой искусственно созданный сплошной неоднородный материал, состоящий из двух или более компонентов с границей раздела между ними. В большинстве композитов (за исключением слоистых) компоненты можно разделить на матрицу и включенные в нее армирующие элементы. В композитах конструкционного назначения армирующие элементы обычно обеспечивают необходимые механические характеристики материала, а матрица, или связующее вещество, обеспечивает совместную работу армирующих элементов и защиту их от механических повреждений и агрессивной химической среды. Механическое поведение композитов определяется соотношением свойств армирующих элементов и матрицы, а также прочностью связи между ними. Эффективность и работоспособность подобных материалов зависят от правильного выбора исходных компонентов и технологии их совмещения, призванной обеспечить прочную связь между компонентами при сохранении их первоначальных характеристик.

Основными дефектами композиционных материалов являются: расслоения, образующиеся вследствие непрочности или нарушений технологического процесса изготовления изделия; растрескивания композита по границе раздела матрицы и армирующего элемента; разрушение матрицы композитного материала вследствие внешнего воздействия и образования продольных трещин.

Области применения композиционных материалов весьма обширны. В настоящей работе рассматриваются композиционные материалы, используемые в авиакосмической технике, судостроении и производстве автомобилей. При этом речь идет о несущих

элементах, деталях механизмов и готовых изделиях, выполненных из композиционных материалов.

Проблема неразрушающих испытаний композиционных материалов обуславливается рядом особенностей и физических явлений, характерных для композитов. В подобных материалах возникают поверхностные трещины, не видимые человеческим глазом и не обнаруживаемые многими методами неразрушающего контроля (НК) в силу специфических физических свойств, которыми обладают композиты, а именно: малая радиационная толщина, низкая электропроводность, отражение ультразвуковых (УЗ) волн от армирующих элементов, что приводит к искажению получаемых данных, и т.п. Кроме того, ряд дефектов, характерных только для композиционных материалов (расслоение матрицы и армирующих элементов), также представляет определенные сложности при проведении неразрушающего контроля.

Первые попытки использовать тепловой контроль (ТК) для обнаружения дефектов в композиционных материалах были предприняты еще в 80-х годах прошлого века, используя классические схемы одно- и двухсторонних испытаний. Основным способом нагрева был оптический (работы Н.А. Бекешко, А.Е. Карпельсона, Ю.А. Попова, Д.А. Рапопорта, О.Н. Будадина, Е.В. Абрамовой, В.П. Вавилова и др. в бывшем СССР, Д. Балажа и др. во Франции, К. Малдага и др. в Канаде, Г. Буссе и др. в Германии, Д. Берли, С.Шепарда и др. в США, Э. Гринцато и др. в Италии). К началу XXI-го века «классический» тепловой контроль достиг определенного совершенства, тем не менее, он оказался ограниченным обнаружением дефектов определенного типа, главным образом, расслоениями, расположенными параллельно плоскости нагрева. В то же время в 90-х годах прошлого века появился метод «анализа нагрузок по тепловой эмиссии» (Stress Pattern Analysis by Thermal Emission- SPATE) [1], основанный на использовании зависимости динамического изменения температуры и механических нагрузок (одна из разновидностей этого метода получила название «вибротермография») [1-4]. Наконец, в первом десятилетии нынешнего века практически одновременно в США, Германии и Канаде был предложен метод стимуляции твердых тел с помощью механических колебаний звукового и УЗ диапазонов. В России первые работы в данной области были начаты В.П. Вавиловым и др. в Томском Политехническом Университете.

Таким образом, **актуальность диссертационных исследований** обусловлена:

- расширяющимся применением композиционных материалов нового поколения, прежде всего, в высокотехнологичных отраслях, таких как авиакосмическая техника, ядерная энергетика, автомобиле- и судостроение и т.п.;

- возможностью образования недопустимых специфических дефектов в процессе изготовления или эксплуатации композиционных материалов;
- ограничениями, присущими традиционным видам неразрушающего контроля, при обнаружении дефектов в композиционных материалах;
- положительными результатами практического применения теплового метода контроля композиционных материалов, включая выполненные за рубежом исследования в области ультразвуковой (УЗ) инфракрасной (ИК) термографии;
- отсутствием на российском рынке коммерческих систем теплового контроля композиционных материалов, в особенности, с использованием метода УЗ ИК термографии (УЗ тепловидения).

Цель работы. Разработка метода и устройства для ультразвукового тепловизионного неразрушающего контроля композиционных материалов.

Основные защищаемые положения

- Метод УЗ ИК термографии, восходящий к низкочастотной тепловизионной вибротермографии и испытывающий определенное возрождение в последнее десятилетие, перспективен для обнаружения структурных неоднородностей в твердых телах, которые проявляют эффект механического гистерезиса и внутреннего трения. В особенности, данный метод пригоден для выявления трещин ударного и усталостного происхождения в композиционных и сотовых изделиях, используемых в авиакосмической технике, ядерной энергетике, автомобиле строении и судостроении.
- Наиболее используемые в настоящее время в УЗ ИК термографии акустические колебания частотой несколько десятков килоГерц и электрической мощностью на магнитострикторе до нескольких килоВатт не вызывают заметного нагрева «бездефектного» материала вследствие механического гистерезиса. Феноменологическая модель тепловыделения в дефектных зонах предполагает, что эффект внутреннего трения подобен постоянному действующему источнику тепла, что позволяет использовать для оценки мощности тепловыделения классическую теорию теплопроводности. Сопоставление данных феноменологической модели и экспериментальных данных позволяет оценить вышеуказанную мощность тепловыделения (сотни милливатт при обнаружении трещин в композитах).
- Термомеханическая модель УЗ ИК термографии предполагает совместное решение трехмерного уравнения распространения акустических волн и теплопроводности,

на основании чего исследуют зависимости температурных сигналов в дефектных зонах от механических свойств материала (коэффициента Пуассона и модуля Юнга), частоты акустических волн, амплитуды колебаний магнитостриктора, расстояния между точкой УЗ стимуляции и точкой наблюдения, а также их взаимной ориентации.

- Областью применения метода УЗ ИК термографии является неразрушающий контроль трещин ударного и усталостного происхождения, а также расслоений, непроклеев и других дефектов без взаимного проникновения контактирующих материалов. Отрасли преимущественного использования метода УЗ ИК термографии: авиакосмическая промышленность, ядерная энергетика, автомобилестроение и судостроение.
- Амплитуда температурных сигналов пропорциональна коэффициенту трения и эффективной (поглощенной) акустической энергии. В диапазоне исследованной электрической мощности УЗ стимуляции (до 2,5 кВт), температурные сигналы пропорциональны электрической мощности на магнитострикционном инденторе.
- Наибольшие температурные сигналы возникают при перпендикулярном расположении дефектов типа трещин относительно преимущественного направления распространения ультразвука. Поэтому при проведении сплошного контроля изделий из композиционных материалов целесообразна последовательная УЗ стимуляция изделий в различных точках, или одновременная стимуляция нескольких точек.

Научная новизна диссертационных исследований.

- Разработаны теплофизическая и термомеханическая трехмерные модели генерации тепловых сигналов, стимулируемых мощным ультразвуком, что позволило оценить эквивалентную мощность тепловыделения в дефектных зонах, а также исследовать влияние частоты ультразвука, взаимной ориентации и расстояния между точкой ввода ультразвука и дефектами на регистрируемые температурные сигналы.
- Экспериментальным путем выявлены и подтверждены вышеуказанные закономерности УЗ ИК термографического контроля применительно к композиционным материалам, в особенности, углепластику, являющимся одним из основных конструкционных материалов в авиакосмической промышленности. В частности, установлено, что эквивалентная мощность тепловыделения в зонах ударных повреждений углепластика достигает сотен милливольт, а температурно-

частотный спектр сигналов обнаруживает значительное влияние частоты ультразвука на обнаружение скрытых дефектов.

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

Практическая ценность и реализация результатов диссертационных исследований

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

Апробация работы. Основное содержание диссертационной работы докладывалось на Международной конференции «Electronics - 2012» (г. Созополь, Болгария, 2012 г), Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (г. Томск, Россия, 2011 г.), 50-й Ежегодной конференции Британского общества неразрушающего контроля (г. Телфорд, Великобритания, 2011 г.).

Связь диссертационных исследований с научно-техническими программами и грантами. Результаты диссертационных исследований использованы при выполнении проекта № 5.568 аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы), а также грантов № 09-08-13568-офи_ц и № 09-08-99022–р_офи Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе 6 статей в рецензируемых изданиях из списка ВАК.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 100 источников литературы и двух приложений. Диссертация содержит 119 страниц текста, 73 рисунка и 13 таблиц.

1 Контроль полимерных композиционных материалов и изделий (обзор)

1.1 Историческая справка и современное состояние инфракрасной термографии¹

Области применения инфракрасной (ИК) термографии непрерывно расширяются вместе с развитием ИК техники и технологии. В западной литературе принято утверждать, что ИК излучение было открыто Уильямом Гершелем в 1800г. Однако в России еще в 1789 г. М. В. Ломоносов изобрел телескоп для ночного наблюдения за звездами, или так называемую «ночную трубу» (*tubo noctoptico*). В 1829 г. Джон Гершель, сын У. Гершеля, предложил прототип прибора для получения тепловых изображений, основанный на неравномерном испарении паров алкоголя с поверхности фильтровальной бумаги под действием ИК излучения [1]. Им же был предложен термин “термограмма”, широко используемый в настоящее время. Детекторы ИК излучения, предложенные в те годы, позволяли обнаруживать людей и животных на расстояниях до 100 м. Открытие М.Планком в 1900 г. основного закона теплового излучения заложило фундамент для дальнейших исследований в области ИК излучения. Как это обычно происходило в истории человеческой цивилизации, первые достижения в области ИК излучения стали использоваться в военном деле. ИК системы обнаружения самолетов, кораблей, танков и живой силы были разработаны в 1914-1918 гг. и непрерывно совершенствуются до наших дней. Ключевая роль военных систем ИК обнаружения и наблюдения была подтверждена в конфликте между Великобританией и Аргентиной в 1982 г., а также в операции США «Буря в пустыне» в 1991 г. в Ираке. Бортовая ИК система, разработанная в 1954г. фирмой Barnes, США, может рассматриваться как первый «впередсмотрящий» ИК тепловизор (английская аббревиатура: FLIR). В бывшем СССР М.М. Мирошниковым была впервые продемонстрирована ИК система с чувствительностью до 0,03°С (был показан тепловой отпечаток тела человека на деревянном полу, сохранявшийся в течение 30 минут). Публичное признание тепловизоров в 1970-х годах стало возможным благодаря инновационной деятельности фирмы AGA, Швеция (ныне фирма FLIR Systems, США). В 1986 г. эта фирма впервые применила термоэлектрический холодильник в модели Thermovision 870. В 1995 г. в производство была запущена серия тепловизоров

¹ В настоящем разделе диссертации использованы материалы монографии В.П. Вавилова «Инфракрасная термография и тепловой контроль», ИД «Спектр», Москва, 2009, 545 с.

Thermovision 500, где впервые были использованы мозаичные детекторы, устанавливаемые в фокальной плоскости (Focal Plane Array - FPA). В 1990-х годах фирмой Inframetrics, США, был разработан миниатюрный холодильник Стирлинга, который позволяет обходиться без жидкого азота при охлаждении фотонных детекторов. Плоские матричные детекторы могут быть неохлаждаемого типа (микроболометрические детекторы) и охлаждаемого типа (обычные фотонные детекторы и QWIP-детекторы); оба типа используются при производстве тепловизоров коммерческого, военного и двойного назначения (термин QWIP означает новое поколение ИК детекторов на так называемых «квантовых ловушках»). Мозаичные детекторы производятся фирмами BAE Systems, Raytheon и DRS, США, ULIS, Франция, Acreo, Швеция. В течение последних 10 лет произошло слияние фирм FSI, AGEMA Infrared Systems, Inframetrics, Indigo Systems и CEDIP в фирму FLIR Systems, что оказало существенное влияние на формирование рынка тепловизоров коммерческого и двойного применения. Фирма Raytheon, США, остается крупнейшим поставщиком ИК техники военного назначения. В Европе известными производителями тепловизоров являются фирмы Thalles, Франция, и AEG Infrarot-Module, Германия. Среди японских производителей следует выделить тепловизоры фирмы NEC Avio. В 2002 г. на мировом рынке заявили о себе китайские производители тепловизоров (фирмы WuHan Guide Electronic Industrial и Guangzhou Sat Infrared), использующие западные мозаичные детекторы [5]. Разработки российских тепловизоров в последней декаде прошлого века продолжали идеи, воплощенные в более ранних моделях западных тепловизоров, но с учетом новых технологических возможностей, прежде всего, с использованием цифровой обработки и накопления результатов измерений. В последние годы в заметных количествах были выпущены тепловизоры ИРТИС-2000 (фирма «ИРТИС», г. Москва) и ТКВр – ИФП (Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск) с охлаждаемыми фотоприемниками. С 2002г. объединением «Спектр» выпускаются приборы серии ТН-4604, использующие западные неохлаждаемые матричные фотоприемники. Применение ИК диагностики в промышленности расширяется совместно с усовершенствованием моделей тепловизоров. В частности, ИК тепловой контроль (ТК) в силу своего дистанционного и универсального характера имеет достаточно долгую историю, связанную с необходимостью испытаний сложных технических объектов, таких как атомные станции, космические ракеты и автомобили, строительные конструкции. По-видимому, одна из первых процедур динамического ИК ТК была реализована в 1965 г. У. Беллером, который предложил контролировать корпуса двигателей ракеты «Поларис» путем перемещения их из холодного помещения в теплое.

В 1967 г. Д. Грин выполнил исследование по активному ТК тепловыделяющих элементов ядерных реакторов, в котором успешно решил проблему учета коэффициента излучения. Результаты ранних работ были использованы и в дальнейших исследованиях, тем не менее, в течение длительного времени тепловой НК не входил в группу общепризнанных методов контроля, куда обычно включают УЗ, радиационный, магнитный, вихретоковый методы, а также метод проникающих веществ. Достаточно многообещающий в лабораторных условиях, ТК длительное время не был способен проявить эксплуатационную надежность. Высокий уровень шумов, отсутствие нормативной документации, дороговизна оборудования препятствовали его широкому применению в НК. В последнюю декаду наблюдается прорыв в области ИК ТК, во многом благодаря появлению на рынке нового поколения тепловизоров, а также непрерывно растущему потенциалу компьютерной обработки данных [6].

1.2 Основные термины, используемые в тепловом контроле

В таблице 1.1 описаны основные термины, принятые в отечественной и зарубежной научно - технической литературе по тепловому контролю (ТК) [7].

Таблица 1.1 - Основные термины и определения ИК термографии и ТК

Термин	Описание
Общие термины	
Стационарный	Температура не изменяется во времени
Нестационарный, динамический	Температура изменяется во времени
Инфракрасная термография	Термография, осуществляемая путем анализа теплового излучения объектов
Инфракрасный Неразрушающий контроль	Испытания материалов путем анализа их инфракрасного (теплового) излучения; как правило, этот термин относится к наиболее распространенной разновидности теплового НК
Дифференциальное уравнение теплопроводности параболического типа	$\alpha \nabla^2 T = \partial T / \partial \tau$; α - температуропроводность
Термографический неразрушающий контроль	Испытания материалов с применением термографии (тепловидения)
Термография	Метод анализа пространственного и временного распределения тепловой энергии (температуры) в физических объектах, сопровождающийся, как правило, построением тепловых изображений (термограмм)

Продолжение таблицы 1.1

Термографический неразрушающий контроль	Испытания материалов с применением термографии (тепловидения)
Тепловой неразрушающий контроль	Испытания материалов путем анализа тепловых потоков (температурных полей); в отличие от исследования технологических процессов и технического обслуживания с предсказанием, этот термин относится к тем случаям, когда перед испытанием температура объекта контроля равна температуре окружающей среды, в результате чего необходима тепловая стимуляция объекта
Активный тепловой контроль	Испытания материалов с использованием дополнительного источника теплового стимулирования
Пассивный тепловой Контроль	Дополнительный источник теплового стимулирования отсутствует
Тепловой НРК «на отражение», односторонняя техника	Тепловую стимуляцию объекта и регистрацию температуры осуществляют на одной и той же поверхности образца
Тепловой контроль «на просвет»	Тепловую стимуляцию объекта и регистрацию температуры осуществляют на противоположных поверхностях образца
Прямая задача теплового НК	Для известной конфигурации объекта и дефектов (известных ТФХ) определяют изменения температуры во времени и в пространстве
Обратная задача теплового НК	По экспериментально регистрируемым изменениям температуры во времени и пространстве определяют конфигурацию тела и дефектов (ТФХ)
Обратная задача теплового НК	По экспериментально регистрируемым изменениям температуры во времени и пространстве определяют конфигурацию тела и дефектов (ТФХ)
Дефектометрия	Определение параметров дефекта по экспериментальным данным с использованием алгоритмов решения обратных задач
Процедуры активного теплового контроля	
Анализ пространственных частот	Анализ амплитудных распределений
Анализ временных частот	Анализ изменений сигналов во времени
Анализ в частотной области	Анализ частотного спектра
Фототермический (фототепловой) метод	Тепловую стимуляцию объекта производят с помощью оптического излучения (как, правило, возбуждают тепловую волну в локальной зоне малого размера и производят сканирование объекта по точкам)

Продолжение таблицы 1.1

Импульсный метод	Длительность тепловой стимуляции существенно меньше характерного времени наблюдения; как правило, нагрев производят с помощью импульсного лазера или лампы-вспышки
Метод тепловых волн	Тепловую стимуляцию объекта производят путем периодического (гармонического) нагрева, в результате чего в объекте возникают тепловые волны; как правило, температуру регистрируют в квазистационарном режиме
Синхронная ультразвуковая термография	Исследование поверхностных температурных полей в области дефектов при контактной стимуляции изделия упругими периодическими УЗ волнами
Импульсная ультразвуковая термография	Исследование поверхностных температурных полей в области дефектов при контактной стимуляции изделия импульсными УЗ волнами
Метод вейвлет (волновых) - функций	Разновидность импульсной фазовой термографии, использующая разложение функции оригинала по базисным вейвлет - функциям
Тепловая (динамическая) томография	Послойное (томографическое) представление структуры объекта путем анализа сигналов во временной области при одностороннем тепловом НК
Полиномиальная аппроксимация	Аппроксимация изменения температуры во времени с помощью полиномов с целью сглаживания шумов и замены длинных экспериментальных последовательностей изображениями полиномиальных коэффициентов
Техника «летающего пятна»	Тепловой НК путем сканирования объекта тепловым стимулирующим пучком при синхронной регистрации температуры в локальной зоне на фиксированном расстоянии от точки нагрева (скорость сканирования относительно высока)
Метод синхронной регистрации сигнала, метод «временных ворот»	Метод теплового НК, предусматривающий регистрацию сигнала в выбранном временном окне при фиксированной задержке относительно нагрева
Профилирование глубины	Восстановление структуры объекта по глубине
Информативный параметр	Параметр, используемый для обнаружения сигнала
Информативные параметры	
Температурный сигнал	$\Delta T(x, y, \tau) = T(x, y, \tau) - T_{ref}(x, y, \tau)$ - амплитудный информативный параметр; $T_{ref}(x, y, \tau)$ - эталонная температура
Текущий контраст температуры	$C^{run}(x, y, \tau) = \frac{\Delta T(x, y, \tau)}{T(x, y, \tau) - T_a(x, y)}$; $T_a(x, y)$ - начальная температура (температура окружающей среды)

Продолжение таблицы 1.1

Информативные параметры	
Температурный сигнал	$\Delta T(x, y, \tau) = T(x, y, \tau) - T_{ref}(x, y, \tau)$ - амплитудный информативный параметр; $T_{ref}(x, y, \tau)$ - эталонная температура
Текущий контраст температуры	$C^{run}(x, y, \tau) = \frac{\Delta T(x, y, \tau)}{T(x, y, \tau) - T_a(x, y)}$; $T_a(x, y)$ - начальная температура (температура окружающей среды)
Нормализованный температурный контраст	$C^n(x, y, \tau) = \frac{T(x, y, \tau) - T_a(x, y)}{T^n(x, y, \tau^n) - T_a(x, y)} - \frac{T_{ref}(x, y, \tau) - T_a(x, y)}{T_{ref}^n(x, y, \tau^n) - T_a(x, y)}$; $T^n(x, y, \tau^n)$ - температура текущей точки в момент времени τ^n , принятая в качестве нормализующего значения (как правило, момент времени τ^n соответствует концу нагрева τ_h)
Оптимальное время наблюдения	Момент времени τ_m , при котором обеспечивается максимальное значение информативного параметра (отношения сигнал/шум)
Раннее время обнаружения	Момент времени, при котором температурный сигнал $\Delta T(\tau)$ начинает превышать уровень шума (как правило, значительно меньше времени τ_m)
Представление результатов испытаний	
Термограмма, ИК термограмма	Распределение интенсивности теплового излучения (температуры) объекта, представляемое в виде изображения на экране монитора а также в виде твердой или электронной копии
Тепловая томограмма	Изображение структуры ТФХ объекта в пределах Выделенного по глубине слоя
Максиграмма	Изображение, в котором каждый пиксель содержит максимальное наблюдавшееся значение информативного параметра (температурного сигнала), независимо от времени его появления
Таймограмма	Изображение, в котором каждый пиксель содержит соответствующее значение Характерного времени теплопередачи
Фазограмма	Изображение, в котором каждый пиксель содержит соответствующее значение фазы (сдвига фаз)
Модулограмма	Изображение, в котором каждый пиксель содержит значение модуля Фурье-образа на выбранной частоте
Глубинограмма	Изображение, в котором каждый пиксель содержит значение глубины залегания дефекта
Толщинограмма	Изображение, в котором каждый пиксель содержит значение толщины дефекта

1.3 Современные тепловизоры и источники нагрева

В тепловизионной технической диагностике используется пассивный метод ТК, при котором не требуется дополнительной тепловой стимуляции объектов, имеющих температуру, отличную от температуры окружающей среды. При обнаружении подповерхностных дефектов в материалах, температура которых близка к температуре окружающей среды, необходима дополнительная тепловая стимуляция, или активный режим тепловизионной съемки, показанный на рисунке 1.1.

Активный режим ТК может применяться как в односторонней процедуре (нагреватель и тепловизор находятся с одной стороны образца), так и в двухсторонней процедуре (нагреватель и тепловизор разделены образцом). Односторонний контроль типичен для практических испытаний, в то время как двухсторонний контроль чаще применяют в лабораторных условиях для определения ТФХ материалов [8-9].

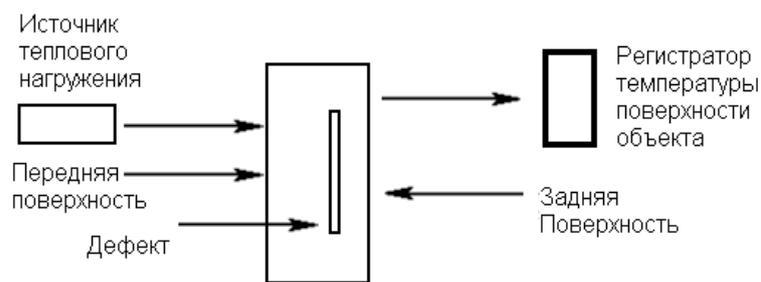


Рисунок 1.1 - Схема активного ТК

Тепловизоры классифицируют по нескольким принципам: показывающие и измерительные, переносные и стационарные, общего назначения и исследовательские и т.п.

Основными характеристиками тепловизоров, применяемых в ТК, являются:

- формат изображения: 160x120 и более;
- возможность цифровой записи термограмм на внутренний или сменный носитель информации (SD-card, Flash-card);
- использование диапазона длин волн 7...13 мкм (допустим диапазон 3...5 мкм);
- возможность цифровой записи термограмм на периферийные устройства, в особенности, через шины быстрого доступа (Fire Wire);
- применение матричных охлаждаемых и/или неохлаждаемых детекторов.

Тепловизоры, применяющиеся при активном ТК, различаются по своим характеристикам, прежде всего, в зависимости от типа объектов контроля. Основными требованиями к таким системам являются:

- системы, применяющиеся в академических исследованиях, должны обеспечивать температурное разрешение до 10 мК и частоту кадров до нескольких десятков кГц; типичный формат изображения – 320x240; разрядность АЦП должна быть равна 12...14 битам;
- для вышеописанных систем необходима возможность продолжительной записи термограмм, что позволяет наблюдать развитие температуры на поверхности образца в течение продолжительного времени; поскольку амплитуда температурных сигналов от дефектов мала и они подвержены воздействию шума, необходимо использовать развитые алгоритмы цифровой обработки сигналов;
- системы активного ТК могут работать как в длинноволновом (7...13 мкм), так и средневолновом (3..5 мкм), диапазонах, хотя проблема отраженного излучения от нагревателей более существенна при работе в средневолновом диапазоне [10-11].

1.4 Полимерные композиционные материалы (обзор)

Композиционные материалы (от лат. *compositio* - составление), многокомпонентные материалы, состоящие из полимерной, металлической, углеродной, керамической или другой основы (матрицы), армированной наполнителями из волокон, нитевидных кристаллов, тонкодисперсных частиц и т.п. Путем подбора состава и свойств наполнителя и матрицы (связующего), их соотношения, ориентации наполнителя можно получить материалы с требуемым сочетанием эксплуатационных и технологических свойств. Использование в одном материале нескольких матриц (полиматричные композиционные материалы) или наполнителей различной природы (гибридные композиционные материалы) значительно расширяет возможности регулирования свойств композиционных материалов. Армирующие наполнители воспринимают основную долю нагрузки композиционных материалов. По структуре наполнителя композиционные материалы подразделяют на волокнистые (армированы волокнами и нитевидными кристаллами), слоистые (армированы пленками, пластинками), дисперсно-армированные, или дисперсно-упрочненные (с наполнителем в виде тонкодисперсных частиц) [12].

Матрица в композиционном материале обеспечивает его монолитность, передачу и распределение напряжения в наполнителе, определяет тепло-, влаго-, огне- и химическую стойкость. По природе матричного материала различают полимерные,

металлические, углеродные, керамические и др. композиты. Наибольшее применение в технике получили композиционные материалы, армированные высокопрочными и высокомодульными непрерывными волокнами. К таким материалам относят: 1) полимерные композиционные материалы на основе термореактивных (эпоксидных, полиэфирных, феноло - формальдегидных, полиамидных и др.) и термопластичных связующих, армированные стеклянными (стеклопластики), углеродными (углепластики), органическими (органопластики), борными (боропластики) и др. волокнами; 2) металлические композиционные материалы на основе сплавов Al, Mg, Cu, Ti, Ni, Cr, армированных борными, углеродными или карбидокремниевыми волокнами, а также стальной, молибденовой или вольфрамовой проволокой; 3) композиционные материалы на основе углерода, армированного углеродными волокнами (углерод - углеродные материалы); 4) композиционные материалы на основе керамики, армированной углеродными, карбид кремниевыми и др. Волокнистые, композиционные материалы превосходят металлы и сплавы по усталостной прочности, термостойкости, виброустойчивости, шумопоглощению, ударной вязкости и другими свойствам.

Композиционные материалы используют в качестве конструкционных, теплозащитных, антифрикционных, материалах и др. это позволяет снизить массу конструкции, повысить ресурсы и мощности машин и агрегатов, создать принципиально новые узлы, детали и конструкции [13-15].

1.5 Обзор методов контроля полимерных композиционных материалов и изделий

1.5.1 Ультразвуковые методы контроля

Ультразвуковые (УЗ) методы контроля основаны на регистрации упругих колебаний частиц среды, распространяющихся в материалах. При этом колебательное движение возбужденных частиц благодаря наличию между ними упругих сил вызывает распространение упругой волны, сопровождаемой переносом энергии. Основной процесс распространения ультразвука в пространстве является волновым. В зависимости от направления колебания частиц различают несколько типов волн. Для ввода УЗ колебаний в материалы и преобразования электрической энергии в акустическую, как правило, используют пьезоэлектрические преобразователи (далее ПЭП), хотя для генерации мощного ультразвука в России исторически чаще применяют магнитострикционные (МС) преобразователи. Для контроля трещин и расслоений в верхних слоях контролируемого

объекта применяют методы, основанные на регистрации отраженного или прямого луча ультразвуковой энергии; к таким методам относятся эхо-метод, теневой метод, зеркально-теневой метод, эхо - зеркальный метод, дельта-метод.

Эхо-метод основан на регистрации эхо-сигнала, отраженного от дефекта. При теневом методе контроля о наличии дефекта судят по уменьшению амплитуды УЗ-колебаний, прошедших от излучателя к приемнику. При зеркально-теневом методе признаком обнаружения дефекта служит ослабление амплитуды сигнала, отраженного от противоположной поверхности (ее обычно называют донной поверхностью) изделия. Эхо-зеркальный метод реализуется при сканировании объекта двумя ПЭП, которые перемещаются по поверхности таким образом, чтобы фиксировать одним из ПЭП сигнал, излученный другим ПЭП и дважды отразившийся от дефекта и противоположной поверхности изделия. В дельта-методе используется УЗ энергия, переизлученная дефектом. Падающая на дефект поперечная волна частично зеркально отражается, частично трансформируется в продольную, а частично переизлучает дифрагированную волну. Трансформированная продольная волна распространяется нормально к нижней поверхности, отражается от нее и улавливается прямым ПЭП. Этим же ПЭП будет улавливаться компонента продольной дифрагированной волны, срывающейся с верхнего кончика трещины и распространяющейся вертикально вверх.

Реверберационный метод, наиболее часто применяющийся при контроле расслоений и трещин в композиционных материалах, показан на рисунке 1.2. Метод основан на анализе времени объемной реверберации, т.е. процесса постепенного затухания звука в некотором объеме объекта контроля. При контроле используется один совмещенный преобразователь. Например, при контроле двухслойной конструкции в случае некачественного соединения слоев время реверберации в слое, с которым контактирует преобразователь, будет больше, а в случае доброкачественного соединения слоев меньше, так как часть энергии будет переходить в другой слой [16-18].

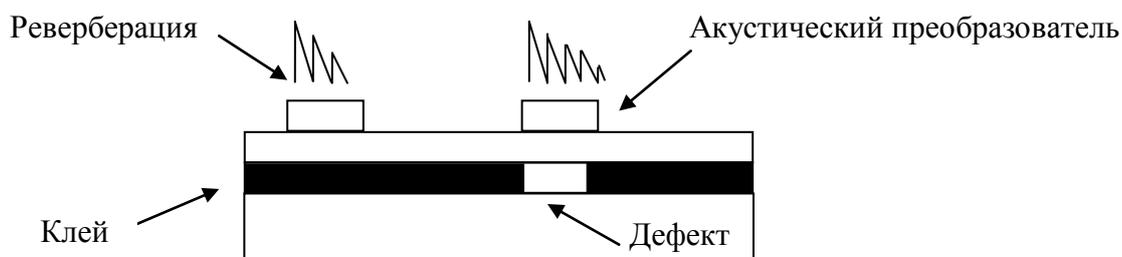


Рисунок 1.2 - Принципиальная схема реверберационного метода УЗ контроля.

1.5.2 Визуально - измерительный метод

Визуально - измерительный контроль (ВИК) основан на взаимодействии оптического излучения видимого диапазона от объекта контроля и принимающего детектора. ВИК являются одним из самых распространенных методов контроля, применяемых в НК. Обычно первым методом контроля является именно ВИК, после которого выносят решение о дальнейшем применении других методов НК. С помощью визуального метода выявляют поверхностные трещины и дефекты, видимые человеческого глазом или с помощью специальных оптических приборов. ВИК проводят путем осмотра объекта контроля на предмет наличия дефектов и неоднородностей. Данный метод контроля применяется совместно с другими методами НК. Основным достоинством ВИК является высокая оперативность и дешевизна. Основной недостаток ВИК: выявление только поверхностных дефектов [19-20].

1.5.3 Радиационный метод

Применение радиационного метода зачастую ограничивается лабораторными условиями, что связано со специфическими требованиями безопасности. Недостатками этого метода являются: невозможность одностороннего контроля (за исключением особых и дорогостоящих технологий обратного рассеяния проникающего излучения), высокая стоимость оборудования и расходных материалов, необходимость специально оборудованной лаборатории для обработки результатов.

Кроме того, в случае «сэндвичевых» композитов невозможно определить, в каком слое находится дефект. Ограничение применимости данного метода также обуславливается минимальным ослаблением излучения при прохождении через объект, что осложняет обработку информации.

1.5.4 Тепловой метод

В тепловых методах НК в качестве пробной энергии используется тепловая энергия, распространяющаяся в объекте контроля. Температурное поле поверхности объекта является источником информации об особенностях процесса теплопередачи, которые, в свою очередь, зависят от наличия внутренних или наружных дефектов. При передаче тепла реализуется три способа передачи энергии: конвекционный перенос,

теплопроводность, излучение. Ниже приводится краткая характеристика этих механизмов, описанная в многочисленной классической литературе по теплопередаче.

Теплопроводность - это процесс распространения тепла вследствие теплового движения структурных частиц вещества (молекул, атомов, свободных электронов). В чистом виде теплопроводность имеет место в твердых телах и в весьма тонких неподвижных слоях жидкости или газа. Плотность теплового потока Q в твердом теле между точками с различной температурой T_1 и T_2 подчиняется закону Фурье, рассчитывается по формулам:

$$Q = -\lambda(T_2 - T_1)/\Delta x \quad (\text{в интегральном выражении}); \quad (1.1)$$

$$Q = -\lambda(\partial T/\partial x) \quad (\text{в дифференциальном выражении}), \quad (1.2)$$

где λ - коэффициент теплопроводности;

T_1, T_2 - температура объекта.

Конвекция - это процесс распространения тепла в результате теплопроводности и непосредственного перемещения молярных (т.е. состоящих из большого количества молекул) частей среды из одной области пространства в другую. Этот механизм означает перемешивание теплых и холодных слоев газа или жидкости. Конвективный перенос тепла имеет место в движущихся жидкостях, газах, сыпучих телах. Охлаждение (отвод тепла) поверхности тела газом или жидкостью описывается законом Ньютона:

$$Q = \alpha_{cv} (T_s - T_{amb}), \quad (1.3)$$

где α_{cv} - коэффициент конвективной теплоотдачи [$\text{Вт м}^{-2} \text{К}^{-1}$];

T_s и T_{amb} - соответственно температуры поверхности тела и среды, °С.

Излучение - это поток квантов электромагнитного излучения, которое испускается всеми физическими телами с температурой выше абсолютного нуля. Процесс передачи тепла от одного тела к другому происходит путем переноса энергии электромагнитного поля через промежуточную прозрачную для теплового излучения среду. В этом процессе часть внутренней энергии излучающего тела превращается в лучистую энергию, распространяющуюся через электромагнитное поле и вновь трансформирующуюся в энергию теплового движения структурных частиц при падении на второе (облучаемое) тело. В интегральном выражении плотность радиационного излучения описывается законом Стефана-Больцмана, который для теплообмена между двумя телами с температурами T_1 и T_2 ($T_1 > T_2$) имеет следующий вид:

$$Q_{12} = \sigma \cdot F_q \cdot F_s (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.4)$$

где Q_{12} - плотность результирующего потока между телами [Вт м^{-2}];

σ - постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{Вт м}^{-2} \text{К}^{-4}$);

F_q - геометрический фактор;

F_ϵ - приведенный коэффициент излучения.

Теплообмен между теплым объектом (T_s) и холодной окружающей средой (T_{amb}) происходит как путем конвекции, так и излучения:

$$Q = Q_{cv} + Q_{rd} = \alpha_{cv} (T_s - T_{amb}) + \sigma \cdot G \cdot (\epsilon \cdot T_s^4 - \epsilon_{amb} \cdot T_{amb}^4) \quad (1.5)$$

При нарушении термодинамического равновесия объекта с окружающей средой на его поверхности возникает избыточное температурное поле, параметры которого позволяет получить информацию об интересующих свойствах объектов.

Методы теплового контроля основаны на взаимодействии теплового поля объекта с чувствительными к тепловой энергии элементами (термопарой, фотоприемником, жидкокристаллическим индикатором, болометрической матрицей и т.д.), преобразовании параметров поля (интенсивности, температурного градиента, контраста, лучистости и др.) в электрический сигнал и передаче его на регистрирующий прибор [21-25].

Различают пассивный и активный методы теплового контроля. Пассивный метод ТК не нуждается во внешнем источнике теплового воздействия - тепловое поле в объекте контроля (далее ОК) возникает при его эксплуатации (изделия радиоэлектроники, энергетическое оборудование, металлургические печи и т. п.) или изготовлении (закалке, отжиге, сварке и т. п.). Активный ТК предполагает нагрев объекта внешними источниками энергии [26,27]. Принципиальная схема ТК представлена на рисунке 1.1. Для контроля трещин в композиционных материалах используют импульсный оптический нагрев и вибротепловизионный методы, как наиболее информативные с точки зрения получаемой информации в процессе обработки полученных данных. Фиксирование полученной информации осуществляется с помощью тепловизора.

На рисунке 1.3 представлена термограмма композиционной самолетной панели с дефектными участками, зарегистрированная в процессе акустической стимуляции.

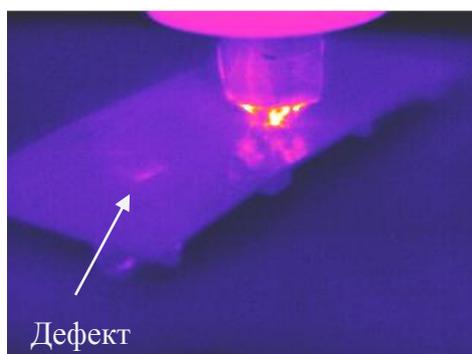


Рисунок 1.3 - Термограмма композиционной самолетной панели с дефектными участками

Аномалии теплового поля на термограмме могут свидетельствовать о наличии дефектов. Вибротепловизионный метод особенно перспективен для анализа изделий, работающих в условиях вибрации. В материалах с дефектами структуры под воздействием вибрации возникают температурные поля, что обусловлено рассеянием энергии механических колебаний на дефектах и превращением её в тепловую энергию за счет внутреннего нагрева в материале. В областях нарушения однородности структуры возникают локальные зоны перегрева объекта. На термограммах вибрирующих пластин и других объектов четко выявляются дефекты типа расслоений и несплошностей. Для реализации данного метода необходимо использовать соответствующий источник стимуляции, поскольку в основе данного метода лежит термоупругий эффект. Частота механической стимуляции лежит в пределах от звукового до УЗ диапазона. Иллюстрации данного метода показаны на рисунках 1.4 и 1.5

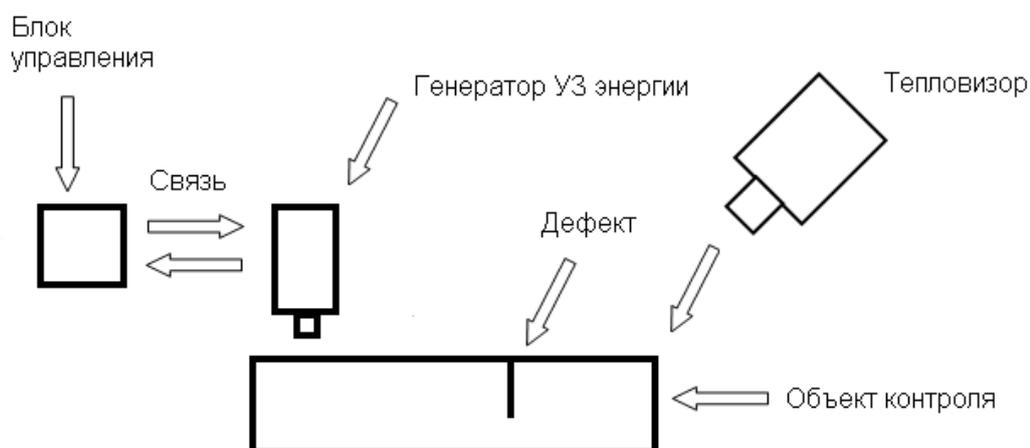


Рисунок 1.4 - Принципиальная схема УЗ ТК

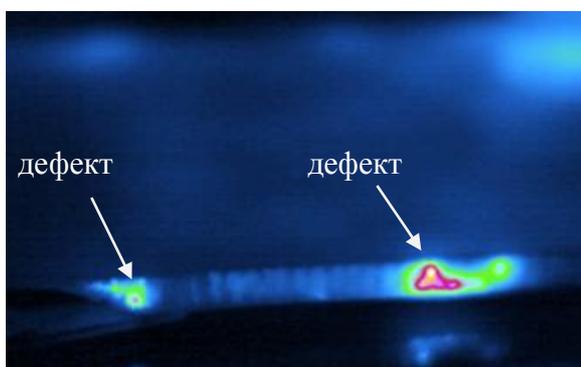


Рисунок 1.5 - Термограмма сотовой панели самолета Super Jet -100 (композиционная обшивка, бумажные соты), стимулируемой ультразвуком с частотой 22 кГц и мощностью 200 Вт; исследования автора)

1.6 Базовые процедуры активного теплового контроля

Большинство существующих процедур активного ТК могут быть классифицированы как разновидности импульсного ТК (pulsed thermal NDT), который предусматривает нагрев изделия импульсом тепловой энергии определенной длительности и регистрацию температуры на передней, задней или боковой поверхности изделия как во время действия импульса, т.е. на стадии нагрева, так и после его окончания, т.е. на стадии охлаждения. Отличия могут быть связаны либо с физической реализацией нагрева, либо с особенностями обработки температурной информации, причем наибольшее число процедур ТК связано с тем, как количественная или качественная информация о скрытых дефектах извлекается из базовой температурной функции $T(x, y, \tau)$, описывающей изменение избыточной температуры изделия во времени для каждой точки изделия (x, y) . В процедурах тепловизионного ТК эта функция определена для последовательности записанных термограмм и привязана к пикселям изображения: $T(i, j, \tau)$ рисунки 1.6 и 1.7 [1].

Типичный вид функций $T(i, j, \tau)$ показан на рисунке 1.6 для дефектной (δ) и бездефектной ($\delta\delta$) областей. На передней поверхности в ходе нагрева избыточная температура изделия T растет от нулевого значения и достигает максимума в конце теплового импульса длительностью τ_h . На задней поверхности максимум избыточной температуры наблюдается со сдвигом относительно конца нагрева. Величина этого сдвига возрастает с увеличением толщины изделия и снижением его температуропроводности α .

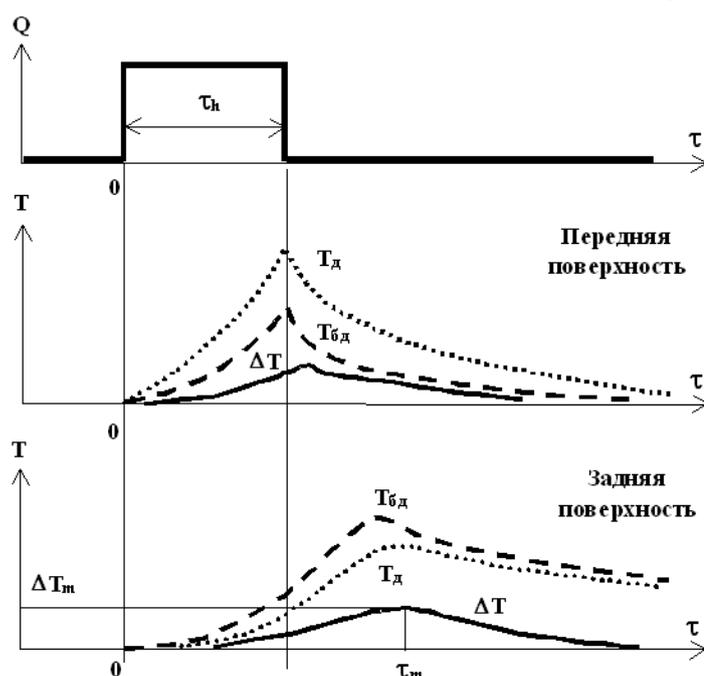


Рисунок 1.6 - Базовые температурные функции активного теплового контроля импульс нагрева и формирование температурного сигнала ΔT [1]

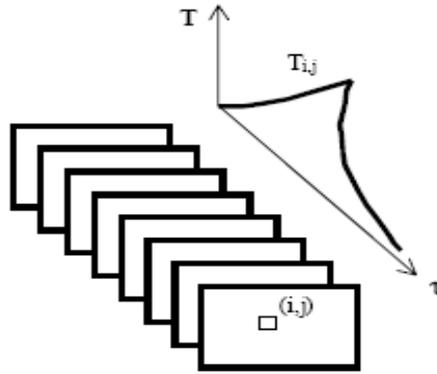


Рисунок 1.7 - Базовые температурные функции активного теплового контроля формирование последовательности термограмм и функции $T(i, j, \tau)$ [1]

На стадии охлаждения, вследствие теплообмена с окружающей средой, температура спадает до температуры среды (или до нуля, если речь идет только об избыточных температурах нагрева). Фундаментальным понятием ТК является температурный сигнал, определяемый как разность температур в исследуемой точке и в зоне, принятой за бездефектную: $\Delta T(x, y, \tau) = T(x, y, \tau) - T_{\text{бд}}(x, y, \tau)$ - (в англоязычной литературе для обозначения ΔT часто используют некорректный термин «температурный контраст»). При таком определении, $\Delta T > 0$ на передней поверхности изделия для дефектов, теплопроводность которых ниже, чем теплопроводность основного материала; на задней поверхности такие дефекты создают $\Delta T < 0$. Соответственно, дефекты, более теплопроводные, чем основной материал, создают температурные сигналы обратного знака: $\Delta T < 0$ на передней поверхности и $\Delta T > 0$ на задней поверхности. Отметим, что в ряде случаев, вследствие различных теплоемкостей дефектной и бездефектной зон, на стадии охлаждения возможна инверсия знака ΔT , однако амплитуда соответствующих сигналов мала для их уверенной регистрации. В процессе динамического нагрева/охлаждения температурный сигнал от внутреннего дефекта достигает максимального значения ΔT_m в момент времени τ_m . Известно, что наибольшая статистическая достоверность НК обеспечивается при максимальном отношении сигнал/шум. В динамических испытаниях это достигается в оптимальный момент наблюдения (optimum observation time). В первом приближении, можно считать, что τ_m (ΔT_m) и есть оптимальный момент наблюдения. Из вышеприведенного рассуждения следует, что вместо записи последовательности термограмм можно фиксировать одну термограмму в момент τ_m к чему и сводится большинство процедур активного ТК. При этом нагрев можно осуществлять коротким импульсом с регистрацией температуры в процессе охлаждения изделия, что получило название «импульсного ТК». При

достаточно длительном нагреве оптимальный момент регистрации может наступить в ходе нагрева, что используется в методе «ИК радиометрии с временным разрешением» (Temperature-Resolved Infrared Radiometry, TRIR). На первый взгляд, парадоксально выглядит метод «раннего обнаружения сигнала» (early detection), согласно которому температурный сигнал регистрируют на ранних стадиях теплового процесса, т.е. при $\tau < \tau_m$. Очевидно, что при этом отношение сигнал/шум невелико и, следовательно, возможно обнаружить только относительно большие дефекты. Тем не менее, преимуществом метода раннего обнаружения является низкий уровень диффузии тепла в поперечных направлениях, в результате чего обеспечивается весьма высокое качество воспроизведения границ скрытых дефектов, близкое к тому, что имеет место в УЗ НК. Иногда используют усреднение N термограмм в течение отрезка времени, центрированного относительно τ_m , в результате чего случайные шумы снижаются в N раз (averaging technique).

1.7 Выводы к первой главе

- В процессе диссертационных исследований были рассмотрены и проанализированы основные методы НК композиционных материалов, которыми являются УЗ, ВИК, контроль проникающими веществами, а также классический ТК. У перечисленных методов имеются определенные недостатки, что делает их использование затруднительным или нецелесообразным.
- УЗ методы НК не решают в полном объеме задачи испытаний композиционных материалов, поскольку для проведения контроля необходимо соблюдать определенные требования как к самому материалу объекта контроля, так и к состоянию его поверхности. Радиационный метод контроля существенно ограничен требованиями радиационной безопасности, а также сложностью технической реализации в применении к специфическим дефектам композитов. Метод ВИК неприменим для обнаружения скрытых дефектов, а метод пенетрантов является контактным и низкопроизводительным, будучи также неприменимым к «закрытым» дефектам.
- «Классические» процедуры ТК также не могут в полной мере решать задачи неразрушающих испытаний композиционных материалов. Их существенным недостатком является сильная зависимость поверхностных температурных сигналов от глубины залегания дефектов в односторонней процедуре, а также

высокий уровень аддитивных и мультипликативных шумов, если использована оптическая стимуляция.

- На основании обзора научно-технической литературы можно предположить, что одним из наиболее пригодных методов испытаний композиционных материалов сложной формы является вибротепловизионный метод, названный в данной работе «ультразвуковым инфракрасным термографическим (тепловизионным) контролем». Особенности данного метода и физические явления, происходящие в объектах контроля при УЗ облучении, до сих пор не изучены в полном объеме для практического применения метода. Например, в некоторых ситуациях, где над скрытыми дефектами интуитивно ожидалось возникновение динамических температурных сигналов, такие сигналы отсутствовали и, наоборот, в ряде случаев амплитуда наблюдавшихся температурных аномалий существенно превышала ожидаемую.

2 Физические основы контроля полимерных композиционных материалов методом УЗ ИК термографии

2.1 Анализ термоупругих напряжений

При механическом сжатии или растяжении или разрушении в твердых телах возникают температурные градиенты, обусловленные процессами преобразования механической энергии в тепловую. В отсутствие дефектов типа нарушения сплошности, выделение тепла может происходить либо вследствие механического гистерезиса, либо за счет пластической деформации при возникновении и распространении трещин и разрушении. Первый механизм имеет место при циклическом нагружении материалов, поэтому статические нагрузки в пределах текучести не приводят к существенным температурным эффектам. Второй механизм связан с образованием зон пластической деформации вследствие концентрации механических напряжений на структурных неоднородностях материалов и носит локальный характер. Если циклические нагрузки действуют в пределах упругого материала и скорость ее изменения велика, то потери за счет теплопроводности малы и после снятия нагрузки изделие возвращается к первоначальной форме и температуре, в этом случае процесс является практически обратимым. Динамические изменения температуры и механических нагрузок описывается формулой:

$$\sigma T / T_0 = - \beta \delta \sigma / \rho C_p = - K \delta \sigma \quad (2.1)$$

где σT - циклическое изменение температуры;

T_0 - абсолютная температура образца;

β - коэффициент линейного расширения, K^{-1} ;

$\delta \sigma$ - изменение суммы основных механических напряжений;

C_p - теплоемкость при постоянном давлении;

K - коэффициент термоупругости;

ρ - плотность материала.

Упругие материалы с положительными коэффициентами линейного расширения имеют отрицательный коэффициент термоупругости. При адиабатическом нагружении поверхности температура таких материалов снижается с ростом механических напряжений. Важным преимуществом термоупругого эффекта является то, что он позволяет измерять непосредственно деформацию. Частотный диапазон измеряемых переменных напряжений составляет от долей Герц до нескольких килоГерц, а амплитуда температурных сигналов обусловленных термоупругостью обычно находится в диапазоне

от тысячных до сотых долей градуса. Минимальное определяемое механическое напряжение в изделии соответствует относительной деформации 5 мкм/м. Поскольку изменение температуры пропорционально сумме деформаций и не зависит от их направления, анализ термоупругости не в состоянии обеспечить информацию о компонентах и направлениях деформации. Экспериментальным путем выявлена следующая особенность процесса: константа термоупругости зависит от нагрузок, что объясняет зависимость модуля упругости материалов от температуры. Уточненный вид уравнения термоупругости, связывающего скорости изменения температуры и нагрузки в однородном «гуковском» материале при адиабатических граничных условиях, был предложен А. Вонгом с соавторами:

$$\rho C_{\epsilon} \frac{\partial T / \partial \tau}{T} = - \left[\beta + \left(\frac{\nu}{E^2} \frac{\partial E}{\partial T} - \frac{1}{E} \frac{\partial \nu}{\partial T} \right) I_1 \right] \times \left(\frac{\partial I_1}{\partial T} \right) +$$

$$+ \left[\frac{(1+\nu)^2}{E^2} \frac{\partial E}{\partial T} - \frac{1}{E} \frac{\partial \nu}{\partial T} \right] \times \sum_{i=1}^3 \sigma_{ii} \left(\frac{\partial \sigma_{ii}}{\partial \tau} \right) \quad (2.2)$$

где T - термодинамическая температура, К;

σ_{ii} - главные напряжения;

I_1 - сумма главных напряжений, Па;

C_{ϵ} - теплоемкость, Дж/(кг·К);

E - модуль Юнга, Па;

ν - коэффициент Пуассона.

Анализ данного уравнения показал, что температурный отклик материала, подвергнутого чисто гармоническому нагружению с частотой ω , содержит две компоненты с частотами ω и 2ω . Первая гармоника температурного отклика является функцией амплитуды циклических нагрузок и средней нагрузки, тогда как вторая гармоника определяется квадратом амплитуды нагрузки. Процесс возникновения температурных градиентов зависит от частоты механического нагружения, что приводит к локальному механическому резонансу. Например, на определенных частотах нагружения расслоения в композиционных материалах вибрируют не синфазно с основным материалом, поэтому анализ соответствующих частот поставяет информацию о размерах и глубине залегания дефектов. Метод термографического анализа напряжений весьма полезен при исследовании процессов возникновения и развития трещин, как при циклической, так и при статической нагрузке. С ростом нагрузки происходит концентрация напряжений на микродефектах материала, что приводит, вначале, к появлению микротрещин, которые при достижении критического уровня нагрузки,

объединяются в магистральные трещины, вызывающие разрушение материала. В головке растущих трещин и других зонах пластической деформации выделяется тепловая энергия, которая может служить индикатором наличия трещин, а так же индикатором их направления и роста.

Согласно теории Гриффитса, разрушение есть процесс энергетической разгрузки структуры, то есть образование трещин приводит к изменению полной энергии структуры. При этом вводят понятие поверхностной энергии разрушения γ , а также характерного размера трещины i , равного половине длины трещины L . Основная формула Гриффитса определяет вклад в энергию системы упругой энергии в зависимости от длины трещины выражается формулой [28-37]:

$$\Delta W = -\pi\sigma^2 l^2 / E \quad (2.3)$$

где E - модуль Юнга;

σ - приложенное на границе напряжение.

Критическое напряжение, вызывающее рост трещины, определяют по выражению:

$$(2.4)$$

Если предположить, что площадь разрушения $S=L \cdot H$, где H - глубина трещины, и $\gamma = \Delta W/S$. Тогда длину трещины можно связать с выделившейся энергией в следующем виде:

$$(2.5)$$

2.2 Ультразвуковая ИК термография

Как известно, активный ТК основан на тепловой стимуляции объекта исследований и регистрации его динамических тепловых полей с помощью ИК тепловизоров. Известные классические методы тепловой стимуляции при активном ТК, например, оптический, СВЧ, конвективный и т.п., применимы лишь для определенной категории обнаруживаемых дефектов. Как правило, эти методы требуют тепловой стимуляции всего объекта контроля, что не всегда приемлемо. Более того, некоторые категории дефектов в принципе не обнаруживаются обычной тепловой стимуляцией, в частности, с помощью распространенных оптических нагревателей. Оптимальным методом стимуляции, по-видимому, явился бы такой, который не приводил бы к изменению температуры в бездефектных зонах.

В настоящее время такого рода стимуляцию внутренних дефектов осуществляют термомеханическими методами. Изменение температуры твердого тела

вследствие механической стимуляции происходит в силу действия двух механизмов. Первый механизм обусловлен термоупругостью; в современной зарубежной аппаратуре он реализован в так называемых системах SPATE (Stress Pattern Analysis), предназначенных для анализа напряжений в образцах под нагрузкой. Вторым эффектом связан с механическим гистерезисом, при котором часть упругой энергии безвозвратно теряется. Этот эффект доминирует в пластических материалах даже при небольших нагрузках, поскольку в них существенно затухание акустических волн. В более общем смысле, ИК термография связана с обнаружением механической энергии, производимой механическими вибрациями, поэтому соответствующую технику называют, как было упомянуто в первой главе, вибротепловидением, или вибротермографией (vibrothermography) [38-50]. Подобную процедуру можно реализовать при звуковом или УЗ возбуждении материалов, поскольку источником существенного повышения температуры является внутреннее трение стенок дефектов при их облучении механическими волнами, то есть происходит термомеханический нагрев. Считается, что вибротермография, в отличие от большинства стандартных процедур ТК, пригодна для испытаний не только неметаллов, но и металлов. В чисто теоретическом плане термомеханические феномены подразделяют на связанные явления термомеханики (термомеханическая связанность) и рассеяние. Первый класс явлений было открыт лордом Кельвином в 19-м веке и называется термоупругостью. Эффект термоупругости относится к квазистационарным процессам взаимного превращения механической и тепловой энергии. В рамках теории термомеханических эффектов, а также первого и второго законов механики, считается, что локальные температурные изменения описываются классическим дифференциальным уравнением:

$$\rho C \dot{T} - k \nabla^2 T = r + s_{the} + d_1, \quad (2.6)$$

где справа размещены члены, отвечающие за источники тепловыделения: внешние r , термоупругие s_{the} и диссипативные d_1 . При постоянных теплофизических характеристиках (ТФХ), пренебрежении конвекцией и постоянстве (отсутствии) внешних источников, что приводит к равновесной температуре материала T_0 , формула (2.6) приобретает вид:

$$\rho C \dot{\theta} - k \nabla^2 \theta = s_{the} + d_1 \quad (2.7)$$

где $\dot{\theta} = T - T_0$.

Из данного уравнения следует, что измерения выделяющейся энергии возможны при условии измерения пространственных и временных градиентов температуры. Если принять, что скорость измерения температуры значительно больше, чем лапласовский член, то имеет место формула:

$$\rho C \dot{\theta} = s_{the} + d_1 \quad (2.8)$$

Последнее условие можно достигнуть, выбирая достаточно большую частоту механического нагружения. Например, граничная частота для стимуляции стали составляет 3 Гц, для алюминия 10 Гц. Точное значение граничной частоты рассчитать достаточно сложно, поскольку необходимо знать локальные градиенты поля напряжений. При относительно низком уровне напряжений энергия диссипации значительно меньше (до 100 раз), чем энергия, производимая термоупругим эффектом, поэтому имеет место следующая формула:

$$\rho C \dot{\theta} = s_{the} \quad (2.9)$$

Для линейного изотропного материала, приняв гипотезу плоских напряжений:

$$s_{the} = -\alpha T_0 \dot{\sigma} \quad (2.10)$$

где $\dot{\sigma}$ - сумма главных напряжений.

Комбинируя уравнения (2.9) и (2.10), приходим к известному уравнению термоупругости Кельвина:

$$\rho C \dot{\theta} = -\alpha T_0 \dot{\sigma} \quad (2.11)$$

Это уравнение означает, что в однородном изотропном адиабатически нагружаемом материале изменение температуры пропорционально изменению суммы главных напряжений.

При гармоническом нагружении, уравнение термоупругости справедливо также и для пиковых значений входящих величин:

$$\Delta \theta = -\frac{\alpha}{\rho C} T_0 \Delta \sigma = K_m T_0 \Delta \sigma, \quad (2.12)$$

где K_m - коэффициент термоупругости контролируемого материала.

Измерение напряжений требует измерения ΔT и T для каждого пикселя термограммы. Следующий принцип анализа, как отмечалось выше, связан с процессами рассеяния и поглощения звуковых (ультразвуковых волн) в твердых средах. При этом чаще всего используют УЗ стимуляцию, реализуя как принцип оптимального нагрева, так и преимущества метода синхронизации функции нагрева и регистрируемых температурных отсчетов. Авторами метода описана экспериментальная установка [50-55], в которой УЗ возбуждение изделий осуществлялось упругими волнами частотой 20 кГц и мощностью несколько сотен Ватт, частотой кадров до 200 Гц в спектральном диапазоне 3...5 мкм. Время одного теста достигало 3-х минут. Объектами исследования были композиционные материалы (угле- и стеклопластики) и керамики, для которых продемонстрированы такие преимущества УЗ стимуляции как селективность в отношении

дефектов и эффективность использования энергии возбуждения. В частности, весьма эффективным оказалось обнаружение трещин и расслоений в стрингерах элеронов, изготовленных из углепластика, на модулирующей частоте 0,4 Гц. Другим контролируемым материалом был усиленный углеродными волокнами карбид кремния, который используют в космических челноках, тормозах высокоскоростных поездов и т.п., там, где необходимо противостоять быстрым и мощным изменениям температуры. Авторы исследования полагают, что УЗ стимуляция позволяет обнаруживать те зоны, где развиваются трещины, тогда как поверхностное оптическое возбуждение хорошо выявляет относительно большие участки с аномальными ТФХ.

Дальнейшее повышение конкурентоспособности метода УЗ термографии связано с увеличением вводимой энергии и, соответственно, расширением зоны контроля, которая в настоящее время составляет около 1 м². При выборе параметров УЗ нагревателя необходимо предотвращать образование стоячих волн, в узлах которых возможен пропуск дефектов (на термограммах стоячие волны видны в виде регулярных полос).

Одним из основных недостатков метода периодической УЗ стимуляции является необходимость сохранять хороший контакт между изделием и УЗ стимулятором в течение времени стимуляции, необходимого для проявления достаточно глубоких дефектов. Для решения этой проблемы по аналогии с оптическим возбуждением предложено использовать для нагрева изделий короткие УЗ импульсы (с определенной несущей частотой), а поверхностное температурное поле исследовать с помощью тепловизора на стадии охлаждения.

В настоящем исследовании использована как непрерывная, так и импульсная, УЗ стимуляция. Тем не менее, следует отметить, что в силу относительно большой длительности импульсов УЗ стимуляции (обычно от 0,1 до 3 секунд), непрерывная УЗ стимуляция, длительность которой, во всяком случае, не превышает от 15 до 20 секунд, может рассматриваться как частный случай импульсной стимуляции.

2.3 Выводы ко второй главе

- Во второй главе на основе обзора литературных данных описаны принцип метода УЗ ИК термографии, его особенности а также механизм возникновения термоупругого эффекта при облучении твердых тел мощным ультразвуком.
- Основными механизмами тепловыделения при прохождении акустических волн через твердые тела является механический гистерезис, роль которого в неразрушающих испытаниях незначительна, и, в особенности, внутреннее трение,

которое является основным источником повышения температуры в дефектных зонах.

- Приоритет в разработке метода УЗ ИК термографии принадлежит зарубежным исследователям (конец XX-го века). В России первые работы, описанные в настоящем исследовании, выполнены в Томском политехническом университете в 2008-2009 гг.
- В настоящем исследовании использована как непрерывная, так и импульсная, УЗ стимуляция. Следует отметить, что в силу относительно большой длительности импульсов УЗ стимуляции (обычно от 0,1 до 3 секунд), непрерывная УЗ стимуляция, длительность которой, во всяком случае, не превышает 15-20 секунд, может рассматриваться как частный случай импульсной стимуляции.
- Областью применения метода УЗ ИК термографии является НК трещин ударного и усталостного происхождения, а также расслоений, непроклеев и других дефектов без взаимного проникновения контактирующих материалов. Отрасли преимущественного использования метода УЗ ИК термографии: авиакосмическая промышленность, ядерная энергетика, автомобиле- и судостроение.

3 Моделирование термомеханических эффектов в материалах со структурными неоднородностями при использовании метода УЗ ИК термографии

3.1 Феноменологическая модель тепловыделения в дефекте

Для определения энергии (мощности), генерируемой дефектами, в особенности, трещинами, предложена феноменологическая, или «теплофизическая», модель, которая исходит из того, что распространение ультразвука в бездефектном материале происходит практически без поглощения и, соответственно, без повышения средней температуры материала. Существенное поглощение ультразвука имеет место при наличии структурных неоднородностей, например, вследствие, феномена трения стенок трещин, как это показано на рисунке 3.1а. Таким образом, можно считать, что дефект (трещина) малой толщины при непрерывной УЗ стимуляции является постоянно действующим источником тепла, и, следовательно, такая задача становится чисто теплофизической. При этом сам дефект может либо выходить на поверхность рисунок 3.1б, либо быть скрытым внутри объекта контроля рисунок 3.1в.

Такая модель позволяет оценить мощность, генерируемую дефектом, путем сравнения расчетных и экспериментальных данных.

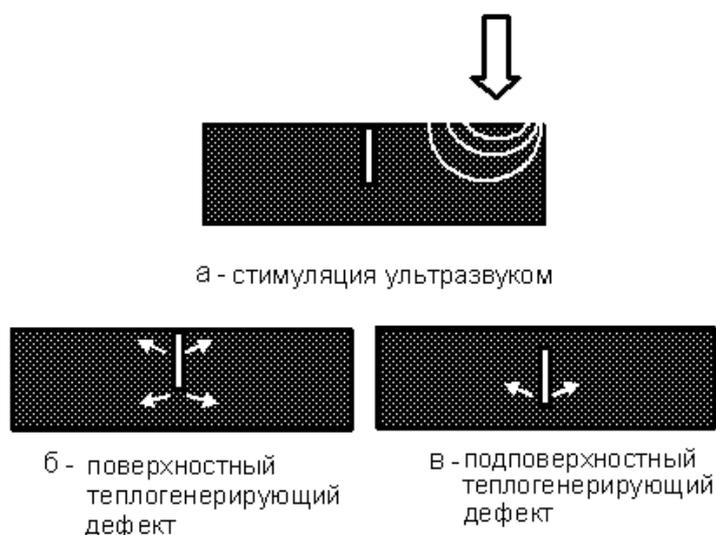


Рисунок 3.1 - Теплофизическая модель генерации тепла при УЗ стимуляции

Для решения трехмерной задачи генерации тепла внутренними дефектами использован метод конечных элементов при неявной схеме вычислений (алгоритм разработан М.С.Сухановым). Физическая модель постоянно действующего в теле источника тепла сводится к решению уравнения теплопроводности в трехмерной

декартовой системе координат для шестислойного тела, имеющего форму параллелепипеда, содержащего до девяти внутренних активных источников тепла или пассивных дефектов, имеющих форму параллелепипедов. В общем случае тело нагревается либо за счет включения внутренних источников, либо за счет поверхностного нагрева внешним источником тепла, а также окружающей средой (рисунок 3.2). Данная модель является дальнейшим развитием известной компьютерной программы Национального исследовательского Томского политехнического университета ThermoCalc-6L, в которой пассивные дефекты заменены на активные. Поверхностный поток тепла может быть однородным или распределенным в пространстве по гауссовскому закону. Центр гауссовского пучка при этом может быть расположен в любой точке на передней поверхности. Внутренние источники тепла равномерно распределены в задаваемых прямоугольных областях и задаются плотностью мощности, Вт/м³, поэтому полная мощность источника определяется произведением плотности мощности на объем дефекта. Введение мощности источника означает его работу в течение всего анализируемого теплового процесса. Передняя и задняя поверхности тела охлаждаются по закону Ньютона (согласно этому закону механизмы теплообмена, такие как конвекция и излучение, объединены общим коэффициентом теплообмена h). Теплофизические характеристики тела и источников (дефектов) могут быть заданы отдельно по трем пространственным координатам, таким образом, моделируя анизотропный материал. Боковые поверхности тела являются адиабатическими. На границах между слоями тела, а также между слоями и дефектами, имеют место условия непрерывности потока тепла и температуры. В рассмотренной математической модели принята концепция так называемых емкостных источников (дефектов). Это означает, что в расчетах участвуют все ТФХ источников (дефектов). Математическая постановка решаемой задачи описывается следующими выражениями:

$$\frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = a_i^x \cdot \frac{\partial^2 T_i(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + a_i^y \cdot \frac{\partial^2 T_i(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + a_i^z \cdot \frac{\partial^2 T_i(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} + \frac{w(x, y, z, \tau)}{C\rho} \quad (3.1)$$

где $i = 1-15$ (6 слоев + 9 источников дефектов);

$$T_i(\tau = 0) = T_{in} ; \quad (3.2)$$

$$-\lambda_1^z \cdot \frac{\partial T_1(x, y, z=0, \tau)}{\partial z} = Q(x, y, \tau) - h_F \cdot [T_1(x, y, z, \tau) - T_{amb}]; \quad (3.3)$$

$$\lambda_3^z \cdot \frac{\partial T_3(x, y, z=L_z, \tau)}{\partial z} = -h_R \cdot [T_3(x, y, z, \tau) - T_{amb}]; \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial x} = 0 \quad \text{для } x=0, y=0 \div L_y; x=L_x, y=0 \div L_y; \quad (3.5)$$

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

на границах слоев, а также на границах источников (дефектов) и основного материала:

$$T_i(x, y, z, \tau) = T_{i\pm 1}(x, y, z, \tau) \text{ и}$$

$$\lambda_i^{q_j} \cdot \frac{\partial T_i(x, y, z, \tau)}{\partial q_j} = \lambda_{i\pm 1}^{q_j} \cdot \frac{\partial T_{i\pm 1}(x, y, z, \tau)}{\partial q_j}. \quad (3.6)$$

Здесь; T_i - температура в i -й области, отсчитанная от заданной начальной температуры ($i=1 \div 6$ соответствует 6-ти слоям, $i=7 \div 15$ соответствует 9-ти источникам или дефектам);

T_{in} - начальная температура изделия;

$\alpha_i^{q_j}, \lambda_i^{q_j}$ - 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); изменяется во времени и в пространстве;

C - теплоемкость; ρ - плотность;

$Q(x, y, \tau)$ - плотность мощности внешнего потока нагрева, изменяется во времени и в пространстве;

h_F, h_R - коэффициенты теплообмена на передней и задней поверхностях;

T_{amb} - температура окружающей среды;

L_x, L_y, L_z - размеры изделия.

Физический смысл вышеприведенных выражений:

(3.1) - трехмерное уравнение теплопроводности параболического типа;

(3.2) - начальное условие;

- (3.3) - граничное смешанное условие теплообмена на поверхности (нагрев + охлаждение);
- (3.4) - граничное условие на задней поверхности (только охлаждение);
- (3.5) - условие адиабатического теплообмена на боковых поверхностях по x и y ;
- (3.6) - условия неразрывности тепловых потоков и температур на границах слоев и источников (дефектов).

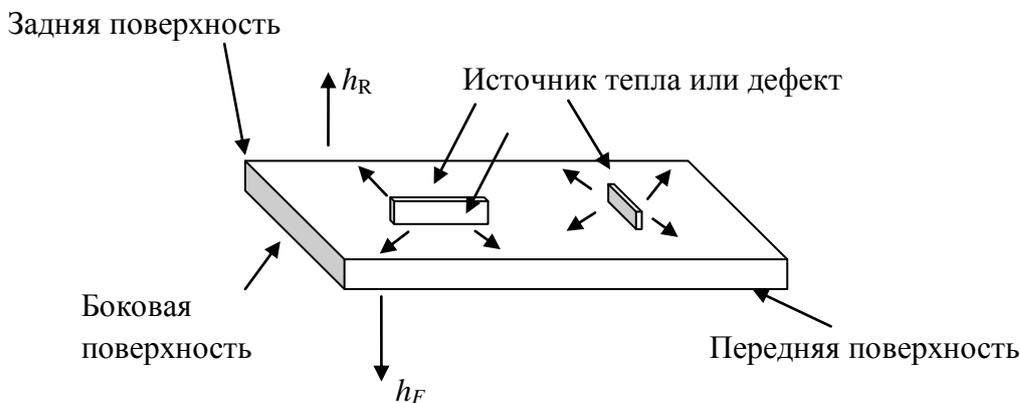


Рисунок 3.2 - Трехмерная декартова модель многослойного тела

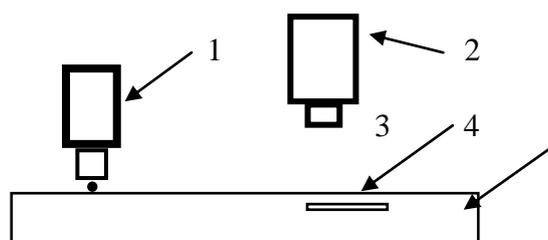
Отметим, что при моделировании анизотропных твердых тел предполагается, что анизотропна только теплопроводность, а теплоемкость и плотность постоянны по всем координатам. Таким образом, анизотропная температуропроводность задается следующей формулой:

$$\alpha^{q_j} = K^{q_j} / (C\rho) \quad (3.7)$$

В зависимости от того, как заданы источники и определены параметры в вышеприведенных выражениях, разработанный алгоритм реализует различные условия теплообмена на передней поверхности образца, включая внутренний нагрев, а также принудительный нагрев и охлаждение на поверхности [55-63].

3.2 Термомеханическая модель УЗ ИК термографии

Схема ТК твердых тел на наличие дефектов в виде трещин путем УЗ стимуляции в общем виде показана на рисунке 3.3



1 - источник УЗ стимуляции; 2 - тепловизор; 3 - дефекты (трещины); 4 - объект контроля
Рисунок 3.3 - Схема ТК при УЗ стимуляции

Моделирование ТК в этом случае состоит из двух этапов:

1) решение трехмерной задачи распространения УЗ колебаний в пластине и вычисление мощности, генерируемой дефектом с нулевой толщиной вследствие внутреннего трения.

2) решение трехмерной задачи распространения тепла от источника (дефекта), мощность которого определена на первом этапе.

Рассмотрим каждый из этих этапов реализации предложенной модели [64-67].

3.2.1 Решение трехмерной задачи распространения механических колебаний в твердом теле

В элементарном объеме твердого тела действуют силы механического напряжения, изображенные на рисунке 3.4. На каждой грани параллелепипеда действует: напряжение, нормальное к данной плоскости (нормальное напряжение), и напряжения, касательные к данной плоскости (касательные напряжения). В каждой плоскости действуют две составляющие касательного напряжения, параллельные координатным осям. В результате, на каждой грани параллелепипеда действуют три составляющие. Например, на грани, перпендикулярной оси X , действуют нормальная составляющая σ_x , и две касательных - τ_{xy} и τ_{xz} . (первый индекс указывает ось, параллельно которой направлена внешняя нормаль к площадке, а второй индекс указывает ось, параллельно которой направлена составляющая касательного напряжения)

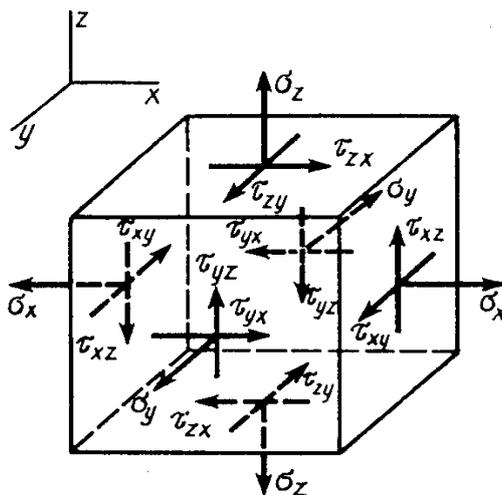


Рисунок 3.4 - Напряжения, действующие в элементарном объеме

Баланс сил по оси X для такого элемента бесконечно малых размеров записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \left(\sigma_{x+0} - \sigma_{x-0} \right) \Delta y \Delta z + \left(\tau_{y+0,x} - \tau_{y-0,x} \right) \Delta x \Delta z + \\ & + \left(\tau_{z+0,x} - \tau_{z-0,x} \right) \Delta x \Delta y + X \cdot \Delta x \Delta y \Delta z = 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

где Δx , Δy , Δz - линейные размеры параллелепипеда;

x - проекция объемных сил (если они есть) на ось X .

Индекс $x+0$ означает, что соответствующее напряжение выбирается на грани, где координата x максимальна, и, наоборот, индекс $x-0$ означает, что соответствующее напряжение берется на грани, где координата x минимальна. Аналогичное соглашение действует и в отношении индексов по другим координатам. Для балансов сил по осям y и z можно записать следующие выражения:

$$\begin{aligned} & \left(\sigma_{y+0} - \sigma_{y-0} \right) \Delta x \Delta z + \left(\tau_{x+0,y} - \tau_{x-0,y} \right) \Delta y \Delta z + \\ & + \left(\tau_{z+0,y} - \tau_{z-0,y} \right) \Delta x \Delta y + Y \cdot \Delta x \Delta y \Delta z = 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} & \left(\sigma_{z+0} - \sigma_{z-0} \right) \Delta x \Delta y + \left(\tau_{x+0,z} - \tau_{x-0,z} \right) \Delta y \Delta z + \\ & + \left(\tau_{y+0,x} - \tau_{y-0,x} \right) \Delta x \Delta z + Z \cdot \Delta x \Delta y \Delta z = 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

После сокращения в уравнениях (3.8-3.10) на произведение линейных размеров $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$, получим дифференциальные уравнения:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + X = 0, \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + Y = 0, \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + Z = 0. \quad (3.13)$$

Механические напряжения в твердом теле приводят к линейным деформациям ε_i и угловым деформации γ_{ij} . Эти деформации согласно закону Гука выражаются через нормальные σ_i и касательные τ_{ij} напряжения в следующем виде формула (3.14):

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \cdot \sigma_y - \nu \cdot \sigma_z); \\
\varepsilon_y &= \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \cdot \sigma_x - \nu \cdot \sigma_z); \\
\varepsilon_z &= \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu \cdot \sigma_x - \nu \cdot \sigma_y); \\
\gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}; \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G};
\end{aligned}
\tag{3.14}$$

где E - модуль упругости при растяжении (модуль Юнга);

G - модуль упругости при сдвиге;

ν - коэффициент Пуассона.

Для изотропного материала данные коэффициенты связаны зависимостью:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{3.15}$$

Обратные зависимости выражаются в виде:

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= \lambda e + 2G\varepsilon_x, \\
\sigma_y &= \lambda e + 2G\varepsilon_y, \\
\sigma_z &= \lambda e + 2G\varepsilon_z, \\
\tau_{xy} &= G\gamma_{xy}, \\
\tau_{yz} &= G\gamma_{yz}, \\
\tau_{zx} &= G\gamma_{zx},
\end{aligned}
\tag{3.16}$$

где объемную деформацию e и постоянную Ламе λ вычисляют по формулам:

$$\begin{aligned}
e &= \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z, \\
\lambda &= \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}
\end{aligned}
\tag{3.17}$$

Деформации можно выразить через компоненты поля перемещений всех элементарных объемов в пространстве U, V, W :

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{\partial U}{\partial x}, \\
\varepsilon_y &= \frac{\partial V}{\partial y}, \\
\varepsilon_z &= \frac{\partial W}{\partial z}, \\
\gamma_{xy} &= \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}, \\
\gamma_{xz} &= \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x}, \\
\gamma_{yz} &= \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y},
\end{aligned} \tag{3.18}$$

где U - проекция перемещений на ось X ;

V - проекция перемещений на ось Y ;

W - проекция перемещений на ось Z .

Подставив в уравнения (3.11 - 3.13) выражения для напряжений (3.16), получим:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial(\lambda e + 2G\varepsilon_x)}{\partial x} + \frac{\partial(G\gamma_{xy})}{\partial y} + \frac{\partial(G\gamma_{zx})}{\partial z} + X &= 0 \\
\frac{\partial(\lambda e + 2G\varepsilon_y)}{\partial y} + \frac{\partial(G\gamma_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(G\gamma_{zy})}{\partial z} + Y &= 0 \\
\frac{\partial(\lambda e + 2G\varepsilon_z)}{\partial z} + \frac{\partial(G\gamma_{zx})}{\partial x} + \frac{\partial(G\gamma_{yz})}{\partial y} + Z &= 0
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Теперь, подставив в уравнения (3.19) деформации, выраженные через перемещения формула (3.18), получим уравнения Ламе в перемещениях формулы (3.20)- (3.22):

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial \left[\lambda \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \right) + 2G \frac{\partial U}{\partial x} \right]}{\partial x} + \\
&+ \frac{\partial \left[G \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right]}{\partial y} + \frac{\partial \left[G \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \right]}{\partial z} + X = 0
\end{aligned} \tag{3.20}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \left[\lambda \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \right) + 2G \frac{\partial V}{\partial y} \right]}{\partial y} + \\ & + \frac{\partial \left[G \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left[G \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right]}{\partial z} + Y = 0 \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \left[\lambda \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \right) + 2G \frac{\partial W}{\partial z} \right]}{\partial z} + \\ & + \frac{\partial \left[G \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left[G \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right]}{\partial y} + Z = 0 \end{aligned} \quad (3.22)$$

В каждом из уравнений (3.20 - 3.22) в левой части имеется три слагаемых, содержащих частные производные от перемещений. Первое слагаемое выражает нормальные напряжения, действующие вдоль соответствующей оси, а два других - касательные напряжения на площадках, параллельных этой оси. После дифференцирования и приведения подобных представим уравнения Ламе в следующем виде:

$$\begin{aligned} & (\lambda + 2G) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + G \left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) + \\ & + (\lambda + G) \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} + (\lambda + G) \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} = 0 \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} & (\lambda + 2G) \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + G \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) + \\ & + (\lambda + G) \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} + (\lambda + G) \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} = 0 \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} & (\lambda + 2G) \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + G \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) + \\ & + (\lambda + G) \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial z} + (\lambda + G) \frac{\partial^2 V}{\partial y \partial z} = 0 \end{aligned} \quad (3.25)$$

Если, как в нашем случае, рассматриваются упругие колебания в твердом теле, то правые части уравнений (3.23 - 3.25) следует заменить на соответствующие составляющие сил инерции элементарного объема:

$$F_{ин,x} = \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, F_{ин,y} = \rho \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}, F_{ин,z} = \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}, \quad (3.26)$$

где ρ - плотность рассматриваемого тела.

Чтобы найти приближенное численное решение уравнений (3.23 - 3.26), проведем их конечно-разностную аппроксимацию (на примере первого из этих уравнений). Для этого также составим баланс сил, действующих в элементарном объеме (рисунок 3.4) с конечными размерами (рассматриваем неопределенный случай, когда размеры устремляются к нулю). Предположим, что мы разбили всё пространство твердого тела конечной сеткой по координатам X, Y, Z с пространственными шагами $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ и временным шагом $\Delta \tau$. Рассмотрим элементарный объем конечных размеров с центром в точке i, j, k численной сетки (такой элементарный объем называется ячейкой Дирихле). Временной индекс n будем указывать вверху. Тогда конечно-разностную аппроксимацию уравнения (3.23) можно представить в следующем виде (временной индекс n является верхним):

$$\begin{aligned} & (\lambda + 2G) \left(\frac{U_{i+1,j,k}^n - 2U_{i,j,k}^n + U_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} \right) + \\ & + G \frac{U_{i,j+1,k}^n - 2U_{i,j,k}^n + U_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \\ & + G \frac{U_{i,j,k+1}^n - 2U_{i,j,k}^n + U_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} + \\ & + (\lambda + G) \frac{V_{i+1,j+1,k}^n - V_{i-1,j+1,k}^n + V_{i-1,j-1,k}^n - V_{i+1,j-1,k}^n}{4\Delta x\Delta y} + \\ & + (\lambda + G) \frac{W_{i+1,j,k+1}^n - W_{i-1,j,k+1}^n + W_{i-1,j,k-1}^n - W_{i+1,j,k-1}^n}{4\Delta x\Delta z} = \\ & = \rho \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - 2U_{i,j,k}^n + U_{i,j,k}^{n-1}}{\Delta t^2} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Формулы в вышеприведенной записи обозначают явную схему, поскольку, зная значения перемещений на текущем временном шаге U^n, V^n, W^n , а также их значения на предыдущем шаге $U^{n-1}, V^{n-1}, W^{n-1}$, можно сразу вычислить значения перемещений на следующем временном шаге $U^{n+1}, V^{n+1}, W^{n+1}$.

Для того, чтобы вычисления по явной схеме были численно устойчивыми необходимо выполнить условия устойчивости:

$$(\lambda + 2G)\Delta t^2 \leq \rho h^2 \quad (3.28)$$

или

$$\Delta t \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \leq h \quad (3.29)$$

где за h взято минимальное значение из пространственных шагов Δx , Δy , Δz .

Для проведения вычислений необходимо задать граничные условия (ГУ). В нашем случае это будет отсутствие касательных и нормальных напряжений на верхней и боковых границах пластины, нулевые вертикальные перемещения на нижней границе и заданный закон вынужденных колебаний в точках соприкосновения пластины с источником УЗ колебаний. На внутренних поверхностях трещин ГУ - нелинейны. При сжатии трещин целесообразно принять условие отсутствия касательных напряжений, а при растяжении - дополнительно условие отсутствия напряжений, нормальных к поверхности трещин. Все эти условия легко учитываются обнулением соответствующих слагаемых в уравнениях (3.8 - 3.10). В качестве начальных условий примем отсутствие перемещений в нулевой момент времени, а также в момент времени, предворяющий нулевой на величину временного шага. При такой постановке вычисление перемещений на следующем временном шаге будет производиться из формулы (3.8) для перемещений по оси X и из аналогичных формул для перемещений по осям X и Y . Вынужденные колебания поверхности пластины в точке соприкосновения с УЗ вибратором зададим в виде следующей формулы:

$$W = A \cdot [1 - \cos(2\pi ft)] / 2, \quad (3.30)$$

где W - вертикальное смещение в точке соприкосновения;

A - амплитуда вибрации (паспортная характеристика);

f - частота вибрации (паспортная характеристика);

t - время.

Мощность нагрева в трещине, перпендикулярной оси X будем вычислять по формуле:

$$P = \frac{\mu \sigma_x S_{mp}}{T} \int_0^T \left| \frac{\partial U}{\partial t} \right| \partial t \quad (3.31)$$

где μ - коэффициент трения стенок трещины;

S_{mp} - площадь трещины;

σ_x - нормальное к поверхности трещины напряжение, вычисляемое по формуле (3.1).

Для трещин, поверхность которых перпендикулярна другим осям, формулы аналогичны. При конечно разностной аппроксимации формула (3.12) будет иметь вид:

$$P_{i,j,k}^{n+1} = \frac{\mu\sigma_x S_{mp}}{T} \left(U_{i,j,k+1}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k+1}^n + U_{i,j,k}^n \right) \quad (3.32)$$

На этом заканчиваются вычисления первого этапа. Ниже рассмотрена реализация предложенного алгоритма на втором этапе вычислений.

3.2.2 Решение трехмерной задачи распространения тепла в дефектных зонах

Моделирование тепловых процессов будем проводить методом расщепления. При таком методе модель тепловых процессов расщепляется на три независимых модели - модели распространения тепла вдоль осей X, Y, Z .

Для получения конечно - разностных уравнений записываем уравнение теплового баланса для каждой области, окружающей какой-либо узел трехмерной сетки (ячейки Дирихле). Узлы сетки выбираем таким образом, чтобы поверхности раздела слоев и дефектов проходили в точности по линиям сетки. Рассмотрим ячейку Дирихле для узла i, j, k (рисунок 3.4) и запишем для нее уравнения теплового баланса. Тепловой баланс для прогонки вдоль оси Z запишем в виде формулы:

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta z_{k-1} C_{k-1} \rho_{k-1} + \Delta z_k C_k \rho_k}{2} \Delta x \Delta y \frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \\ & = \Delta x \Delta y \left(\lambda_{k-1} \frac{U_{i,j,k-1}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z_{k-1}} + \lambda_k \frac{U_{i,j,k+1}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z_k} \right), \end{aligned} \quad (3.33)$$

где $U_{i,j,k}^n$ - температура в узле i, j, k на временном слое n ;

C_k - теплоемкость слоя между узлами i, j, k и $i, j, k+1$;

ρ_k - плотность слоя;

λ_k - теплопроводность слоя;

Δz_k - шаг сетки по Z между узлами i, j, k и $i, j, k+1$;

$\Delta x, \Delta y$ - шаги сетки по X и по Y (по этим координатам сетка равномерна);

Δt - шаг по времени.

После сокращения обеих частей баланса на величину $\Delta x / \Delta y$ уравнение баланса примет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{(\Delta z_{k-1} C_{k-1} \rho_{k-1} + \Delta z_k C_k \rho_k)}{2} \frac{(U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^n)}{\Delta t} = \\ & = \lambda_{k-1} \frac{U_{i,j,k-1}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z_{k-1}} + \lambda_k \frac{U_{i,j,k+1}^{n+1} - U_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z_k} \end{aligned} \quad (3.34)$$

Такая конечно-разностная аппроксимация уравнения теплопроводности носит название неявной схемы, поскольку для вычисления температуры на следующем временном шаге приходится решать систему линейных уравнений.

Уравнение (3.34) имеет место для любых узлов, находящихся вне дефектов. Таким образом, если на вертикальной линии, параллельной оси z дефекты отсутствуют, то систему разностных уравнений для прогонки вдоль этой линии можно записать в виде:

$$a_k U_{i,j,k-1}^{n+1} + b_k U_{i,j,k}^{n+1} + c_k U_{i,j,k+1}^{n+1} = f_k \quad k = 0, N_k \quad (3.35)$$

где

$$a_k = -\frac{\lambda_{k-1}}{\Delta z_{k-1}}, \quad (3.36)$$

$$c_k = -\frac{\lambda_k}{\Delta z_k}, \quad (3.37)$$

$$b_k = \frac{\Delta z_{k-1} C_{k-1} \rho_{k-1} + \Delta z_k C_k \rho_k}{2\Delta t} - a_k - c_k, \quad (3.38)$$

$$f_k = \frac{\Delta z_{k-1} C_{k-1} \rho_{k-1} + \Delta z_k C_k \rho_k}{2\Delta t} U_{i,j,k}^n. \quad (3.39)$$

Для случая $k = 0$ имеем:

$$a_k = 0; \quad b_k = \frac{\Delta z_k C_k \rho_k}{2\Delta t} - c_k + \alpha_1 \quad (3.40)$$

(α_1 – коэффициент теплоотдачи на нагреваемой стороне);

$$f_k = \frac{\Delta z_k C_k \rho_k}{2\Delta t} U_{i,j,k}^n + q_{i,j} \quad (3.41)$$

($q_{i,j}$ – мощность излучения нагрева). Для случая $k = N_k$ имеем: $c_k = 0$,

$$b_k = \frac{\Delta z_{k-1} C_{k-1} \rho_{k-1}}{2\Delta t} - a_k + \alpha_2 \quad (3.42)$$

(α_2 – коэффициент теплоотдачи на охлаждаемой стороне),

$$f_k = \frac{\Delta z_{k-1} C_{k-1} \rho_{k-1}}{2\Delta t} U_{i,j,k}^n. \quad (3.43)$$

Если в ячейке Дирихле для узла i,j,k присутствует дефект, то необходима коррекция уравнений (3.15 - 3.18) с учетом различия теплофизических свойств слоя и

дефекта. Примем, что дефект расположен по оси Z , начиная с узловой плоскости k_0 и заканчивая узловой плоскостью kk . По осям X и Y имеем аналогичные ограничения $i0, j0$ и ik, jk . Тогда к коэффициентам a, b, c, f , вычисленным по формулам (3.34 - 3.37), необходимо прибавить корректирующие добавки:

$$a_k^* = -\frac{\lambda_{def}^*}{\Delta z_{k-1}}, \quad (3.44)$$

$$c_k^* = -\frac{\lambda_{def}^*}{\Delta z_k}, \quad (3.45)$$

$$b_k^* = \frac{\Delta z_{k-1} C_{def}^* \rho_{def}^* + \Delta z_k C_{def}^* \rho_{def}^*}{2\Delta t} - a_k^* - c_k^*, \quad (3.46)$$

$$f_k^* = \frac{\Delta z_{k-1} C_{def}^* \rho_{def}^* + \Delta z_k C_{def}^* \rho_{def}^*}{2\Delta t} U_{i,j,k}^n. \quad (3.47)$$

где $C_{def}^*, \rho_{def}^*, \lambda_{def}^*$ - не абсолютные значения теплофизических характеристик дефекта, а их превышения над соответствующими характеристиками слоя, содержащего этот дефект. Для случая $k=k_0$ имеем:

$$a_k^* = 0, \quad (3.48)$$

$$c_k^* = -\frac{\lambda_{def}^*}{\Delta z_k},$$

$$b_k^* = \frac{\Delta z_k C_{def}^* \rho_{def}^*}{2\Delta t} - c_k^*,$$

$$f_k^* = \frac{\Delta z_k C_{def}^* \rho_{def}^*}{2\Delta t} U_{i,j,k}^n. \quad (3.49)$$

Для случая $k=k \bullet k$:

$$a_k^* = -\frac{\lambda_{def}^*}{\Delta z_{k-1}},$$

$$c_k^* = 0, \quad (3.50)$$

$$b_k^* = \frac{\Delta z_{k-1} C_{def}^* \rho_{def}^*}{2\Delta t} - a_k^*,$$

$$f_k^* = \frac{\Delta z_{k-1} C_{def}^* \rho_{def}^*}{2\Delta t} U_{i,j,k}^n. \quad (3.51)$$

Если $i=i_0$, то поправки для этого узла нужно разделить на два. То же самое следует сделать и при выполнении одного из условий: $i=ik$, $j=j_0$, $j=jk$. Если выполняются оба таких условия (то есть, узел расположен на углу дефекта), то поправки следует поделить на четыре.

Сам процесс прогонки делится на прямую прогонку и обратную. Прямая прогонка заключается в исключении из уравнений переменных, имеющих индекс $k-1$ (для примера рассмотрена прогонка по оси Z).

Предположим, что мы уже провели процесс прямой прогонки в первых уравнениях ($k=0, k$). Тогда приводим диагональный член k -го уравнения к единице:

$$c_k = \frac{c_k}{b_k}, \quad f_k = \frac{f_k}{b_k}, \quad (3.52)$$

после чего исключаем неизвестное с индексом k в следующем уравнении:

$$b_{k+1} = b_{k+1} - c_k a_{k+1}, \quad f_{k+1} = f_{k+1} - f_k a_{k+1}. \quad (3.53)$$

После завершения прямой прогонки для функции f_N получаем значение последнего неизвестного. В процессе обратной прогонки получаем значения остальных неизвестных:

$$f_{k-1} = f_{k-1} - c_{k-1} f_k. \quad (3.54)$$

3.3 Приближенная оценка эквивалентного тепловыделения в дефекте (сравнение теории и эксперимента)

Описанный в параграфе 3.1 феноменологический алгоритм был реализован в виде компьютерной программы ThermoSource [68] и применен для моделирования температурных полей в углепластике толщиной 5 мм, содержащем скрытые дефекты (трещины). Толщина (раскрытие) трещин во всех случаях составляла 0,1 мм, длина трещин равнялась 10 мм, высота трещин в направлении, перпендикулярном поверхности образца, составляла 3 и 1 мм, глубина залегания от передней поверхности была выбрана равной 0,1; 0,5 и 1 мм как показано на рисунке 3.5. Считается, что трещина на глубине 0,1мм может рассматриваться близкой к поверхностной. Теплофизические характеристики углепластикового композита: теплопроводность 0,64 Вт/(м·К), плотность 500 кг/м³, удельная теплоемкость 2462 Дж/кг·К. Соответственно для воздушных дефектов: теплопроводность 0,07Вт/(м·К), плотность 1,3 кг/м³, удельная теплоемкость 928,4 Дж/(кг·К). На поверхности образца имеют место неадиабатические граничные условия с интенсивностью линейного теплообмена 10 Вт/(м²·К). Принято, что внутри каждого

дефекта действует постоянный равномерный источник тепла с плотностью мощности $3,33 \cdot 10^7$ Вт/м³. Соответственно, полная мощность, выделяемая дефектом 10x3x0,1 мм равна 0,1 Вт и дефектом 10x1x0,1мм равна 0,033 Вт. На рисунке 3.5 показано расчетное температурное поле образца с 6-ю дефектами через 1,5 и 10 секунд после начала стимуляции. Изменение расчетной температуры над центрами дефектов показано на рисунке 3.6а. Например, видно, что над дефектом 1 (10x3x0,1мм) избыточный температурный сигнал через 10с стимуляции составляет 2,134°С.

Разработанная компьютерная модель позволяет оценить сигнал от дефекта 1, выходящего на поверхность. Для этого на рисунке 3.7 построены кривые изменения температуры в зависимости от глубины залегания дефекта для различных моментов времени. Очевидно, что путем простой экстраполяции (показана пунктирными линиями) можно оценить ожидаемые сигналы для нулевой глубины залегания дефектов (напоминаем, что реализованная в программе ThermoSource модель не позволяет прямо моделировать поверхностные дефекты).

На рисунке 3.8 приведено сравнение экспериментального и расчетного распределения температуры над дефектом типа ударного повреждения в углепластике, которое создавали путем падения металлического шарика известной массы с заданной высоты. При этом на поверхности углепластика (в данном случае толщиной 5 мм) виден только слабый след удара шарика. При УЗ стимуляции отчетливо видны две трещины, распространяющиеся вдоль волокон углепластика от места удара. Экспериментально установлено, что через 5 секунд после начала стимуляции максимальный избыточный температурный сигнал в зоне дефекта составил 7,1°С при электрической мощности ультразвукового возбуждения 100Вт (см. рисунок 3.6б). Соответственно, при использованной в расчетах мощности 0,1Вт, выделяемой в дефекте размером 10x3x0,1мм, величина температурного сигнала составила 4,32°С. Таким образом, используя принцип линейности тепловой модели, можно предсказать, что фактически выделяемая в дефекте мощность равна 0,164 Вт при электрической мощности стимуляции 100 Вт и выбранных геометрических характеристиках дефекта. Последнее утверждение, строго говоря, не является корректным. Тем не менее, описанная методология оценки сигналов создает основу приближенного решения обратной задачи УЗ теплового контроля.

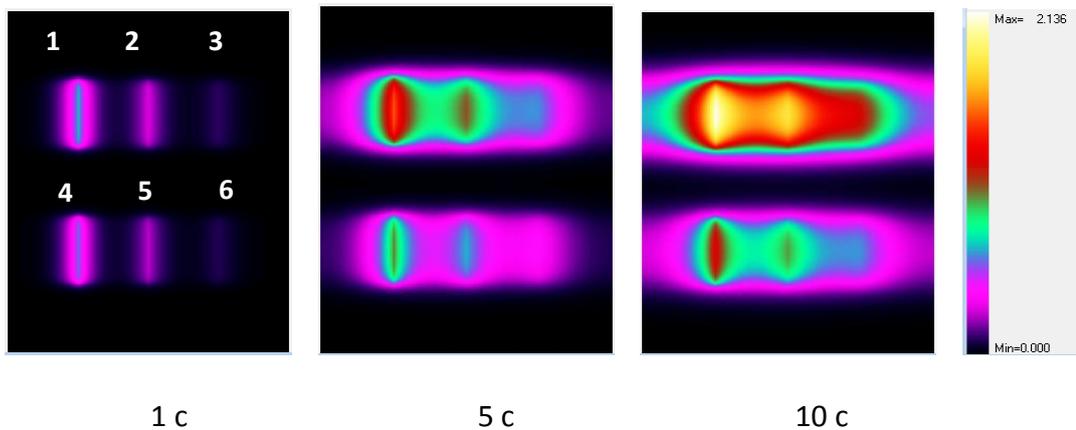
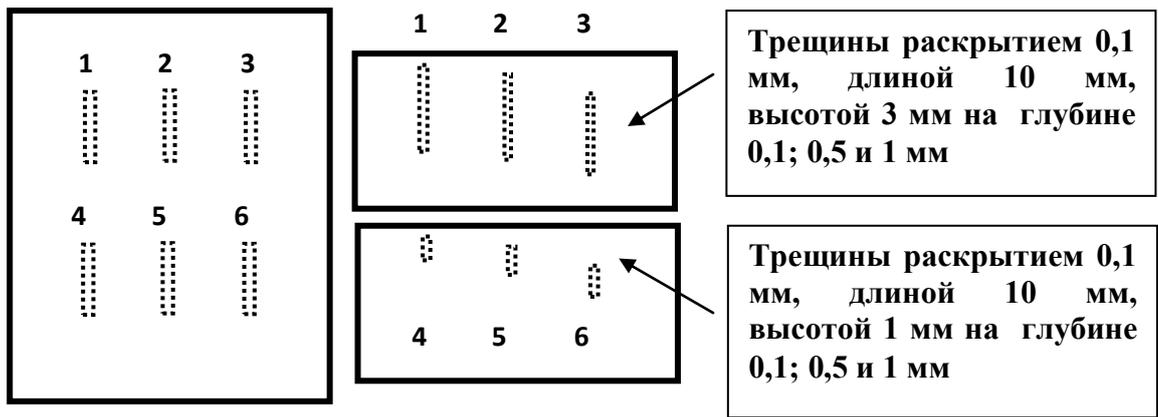
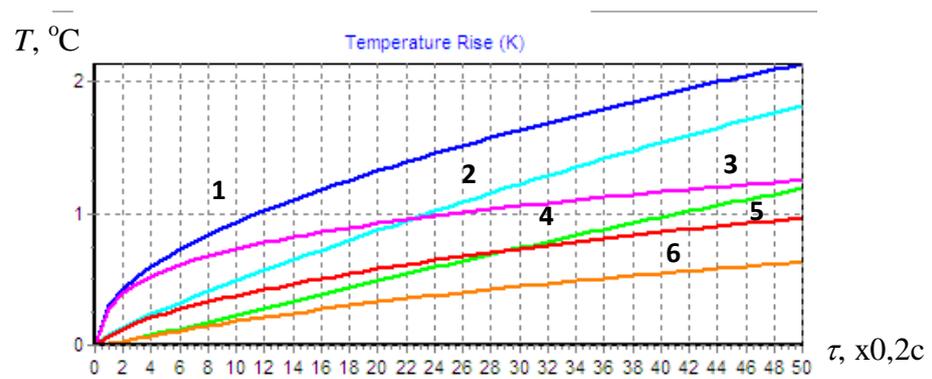


Рисунок 3.5 - Трехмерное компьютерное моделирование генерации тепловой энергии в подповерхностных трещинах в углепластиковом композите толщиной 5 мм



а) расчетные данные для дефектов рисунка 3.5



б) экспериментальные данные (см. также рисунок 3.8)

Рисунок 3.6 - Изменение температуры во времени на поверхности над центрами трещин:

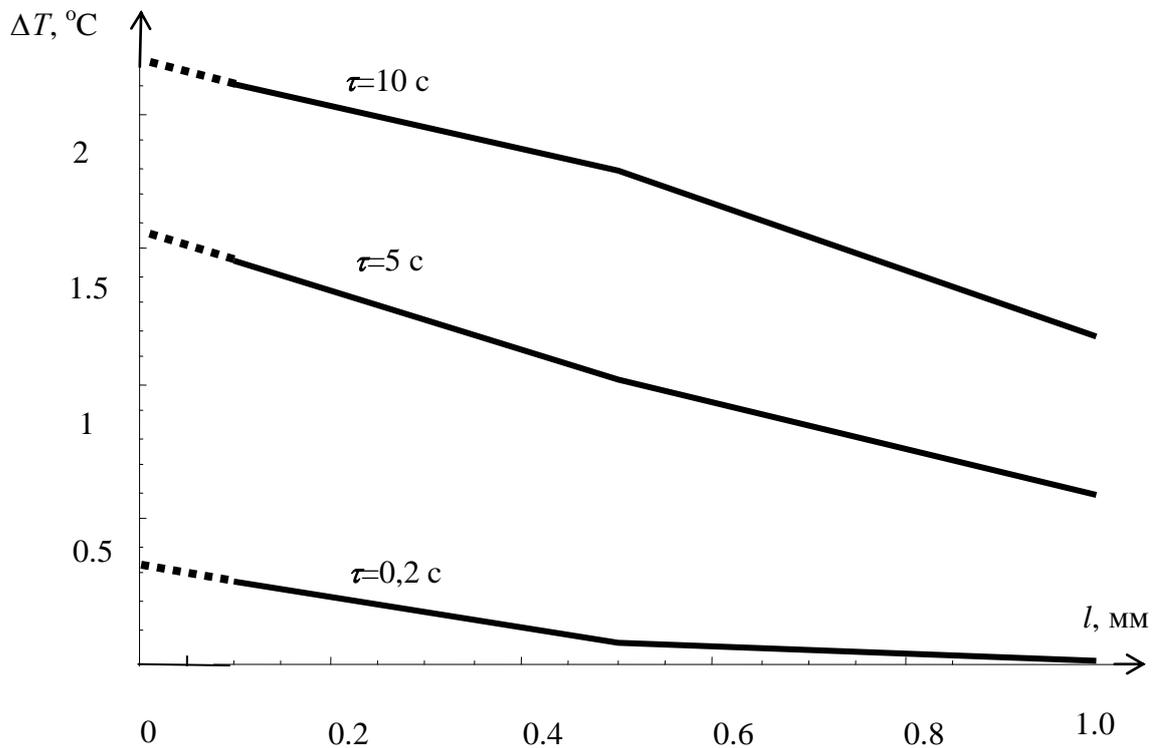


Рисунок 3.7 - Зависимость температурного сигнала от глубины залегания дефекта в различные моменты времени (мощность тепловыделения в дефекте размером $10 \times 3 \times 0,1$ мм равна $0,1 \text{ Вт}$)

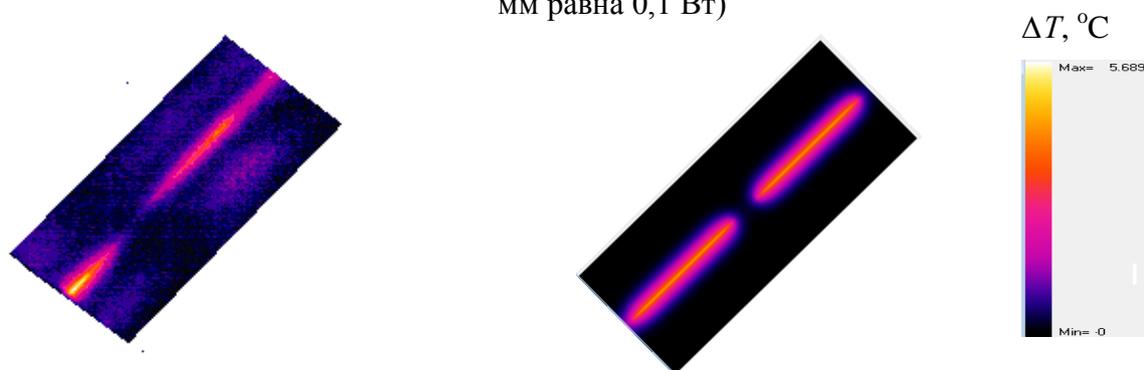
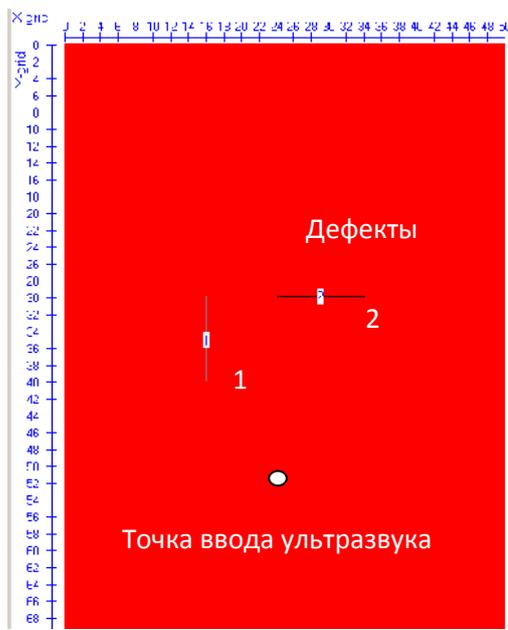


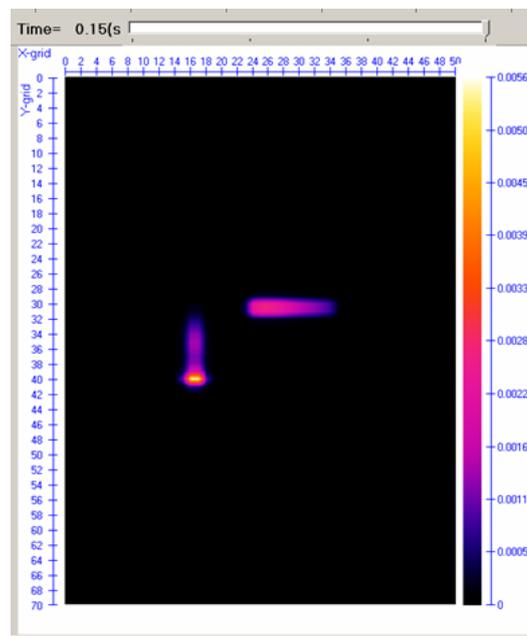
Рисунок 3.8 - Сравнение экспериментальных (слева) и расчетных (справа) температурных распределений через 5 секунд после начала ввода ультразвука в образец из углепластика толщиной 5 мм

3.4 Анализ термомеханической модели на основе ТК углепластикового композита

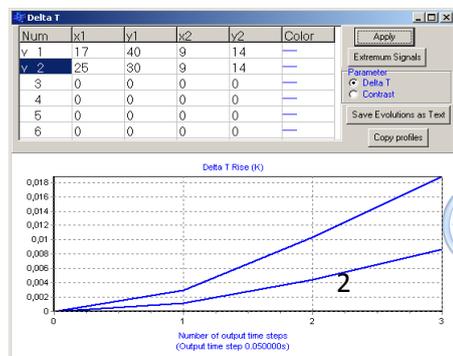
Термомеханическая модель, рассмотренная в параграфе 3.2, была реализована в компьютерной программе ThermoSon (программная реализация М.С.Суханова). На рисунке 3.9 приведены типичные форматы ввода и вывода данных (входные параметры модели описаны в подписи к рисунку 3.9).



а)

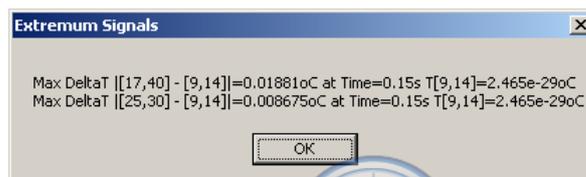


б)



в)

1



г)

а - вид изделия сверху; б - расчетное поле температуры через 0,15 с после начала УЗ стимуляции; в - изменение температуры в дефектной зоне во времени; г - максимальные температурные сигналы и времена их наблюдения

Рисунок 3.9 - Пример выдачи результатов теоретического моделирования термомеханических эффектов с помощью программы ThermoSon (углепластик толщиной 1 мм, ТФХ: коэффициент теплопроводности 0,33; 0,48 и 0,55 Вт/(м·К), плотность 1570 кг/м³, теплоемкость 780 Дж/(кг·К); модуль Юнга 6,8·10¹⁰ Н/м²; коэффициент Пуассона 0,36; два взаимно-перпендикулярных дефекта длиной 5 мм нулевой толщины, коэффициент трения стенок трещины 1, частота УЗ возбуждения 22 кГц, амплитуда колебаний индентора 7 мкм):

Расчет выполнен для длительности УЗ стимуляции 0,15 с; при этом расчет пространственной сетки, состоящей из $50 \times 70 \times 100 = 350000$ узлов, потребовал около 3 часов машинного времени. Видно, что изменение температуры в дефектных зонах близко к линейному, начиная с 0,05 с, поэтому ожидаемые температурные сигналы в течение длительного времени возбуждения могут быть оценены путем пропорционального пересчета. Например, для дефектов № 1 и №2 через 15 секунд УЗ стимуляции ожидаемые значения дифференциальных температурных сигналов составят 1,9 и 0,9°C соответственно, причем максимальный сигнал наблюдается для дефекта №2, расположенного перпендикулярно радиальному направлению акустических волн.

На рисунках 3.10-3.11 показаны основные зависимости температурного сигнала ΔT от параметров УЗ стимуляции.

Весьма важным и до конца не исследованным вопросом УЗ ИК термографического контроля является зависимость температурных сигналов от частоты ультразвука f . Судя по опубликованным в научно-технической литературе данным, однозначного ответа на этот вопрос до сих пор нет, по-видимому, в силу многообразия механизмов образования этих сигналов и факторов, на них влияющих. Например, если в процессе УЗ стимуляции преобладает механический гистерезис, то величина ΔT прямо пропорциональна f . Согласно определению вибрационных энергопотерь, с учетом того, что действует принцип суперпозиции при стимуляции различными частотными модами, энергия, рассеянная трещиной, определяется следующей общей формулой [69]:

$$W = 2\pi \sum_n \eta_{crack,n} f_n V_n, \quad (3.55)$$

где $\eta_{crack,n}$ - так называемый *фактор энергопотерь в трещине*;

f_n - частота моды;

V_n - модальная энергия растяжения.

Заметим, что, за исключением частоты, два других параметра в формуле (3.55) определены достаточно приближенно.

Очевидно, что ситуация может быть существенно отличной, если в структурно-однородном теле появляются структурно-неоднородные дефекты (трещины). При этом в теле возникают резонансные явления, порождаемые многократными отражениями ультразвука от плоских поверхностей дефектов и самого изделия. Наиболее заметен резонанс в металлах, в то время как в неоднородных композитах эти явления менее заметны [70]. С помощью программы ThermoSon получены предварительные данные для углепластика, представленные на рисунке 3.10. Видно, что для данной конфигурации

дефектов рисунка 3.9 максимальные сигналы должны наблюдаться на частоте около 21 кГц. Качественно полученные результаты совпадают с данными, приведенными в [70, 71.]. Отметим, что в работе [71] графики типа рисунка 3.10 названы *температурно-акустическим спектром*.

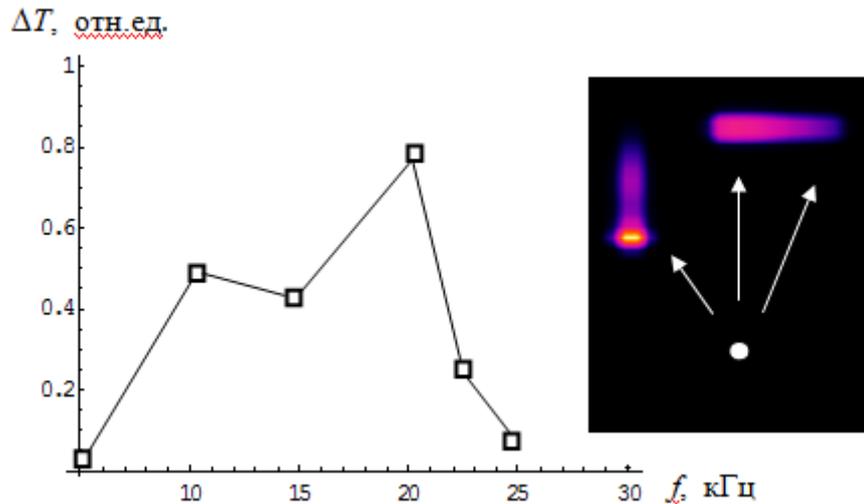


Рисунок 3.10 - Изменение температурного сигнала над дефектом при изменении частоты ультразвука (углепластик толщиной 4 мм, дефектная ситуация рисунка 3.9)

В той же работе [69] вводится так называемый энергетический индекс EI :

$$EI = \sum_n \frac{f_n}{f_0} \varepsilon_n^2, \quad (3.56)$$

где f_n / f_0 - «вес» n -й частоты по отношению к эталонной частоте;

ε_n - амплитуда акустических колебаний.

Наиболее существенный вывод из формулы (3.56) состоит в том, что энергетические проявления акустической стимуляции должны быть пропорциональны квадрату амплитуды УЗ колебаний.

Квадратическая зависимость ΔT от амплитуды акустических колебаний на инденторе ε (в экспериментальных исследованиях, описанных ниже, $\varepsilon = \pm 7$ мкм) была определена расчетным путем. Соответствующие данные, представленные на рисунке 3.11, находятся в полном согласии с формулой (3.56).

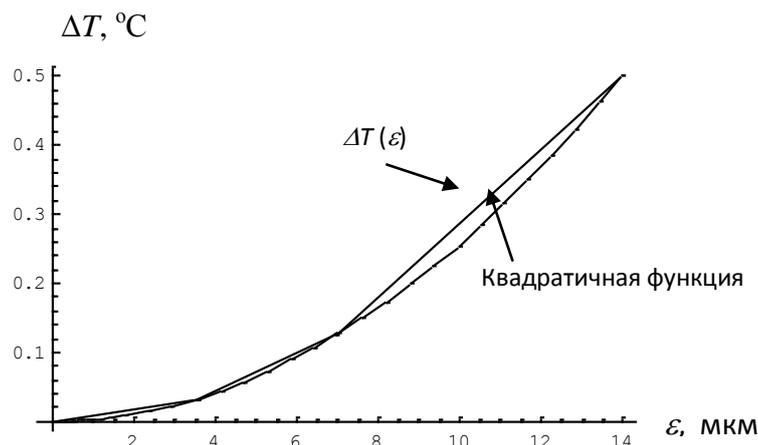


Рисунок 3.11 – Зависимость дифференциального температурного сигнала над дефектом №1 (рисунок 3.9) от амплитуды акустических колебаний (на инденторе)

Зависимость ΔT от коэффициента трения k_{fr} , показанная на рисунке 3.12а, является линейной, что также соответствует теоретическим воззрениям, которые сводятся к следующей формуле [72]:

$$q_{fr} = k_{fr} p v, \quad (3.57)$$

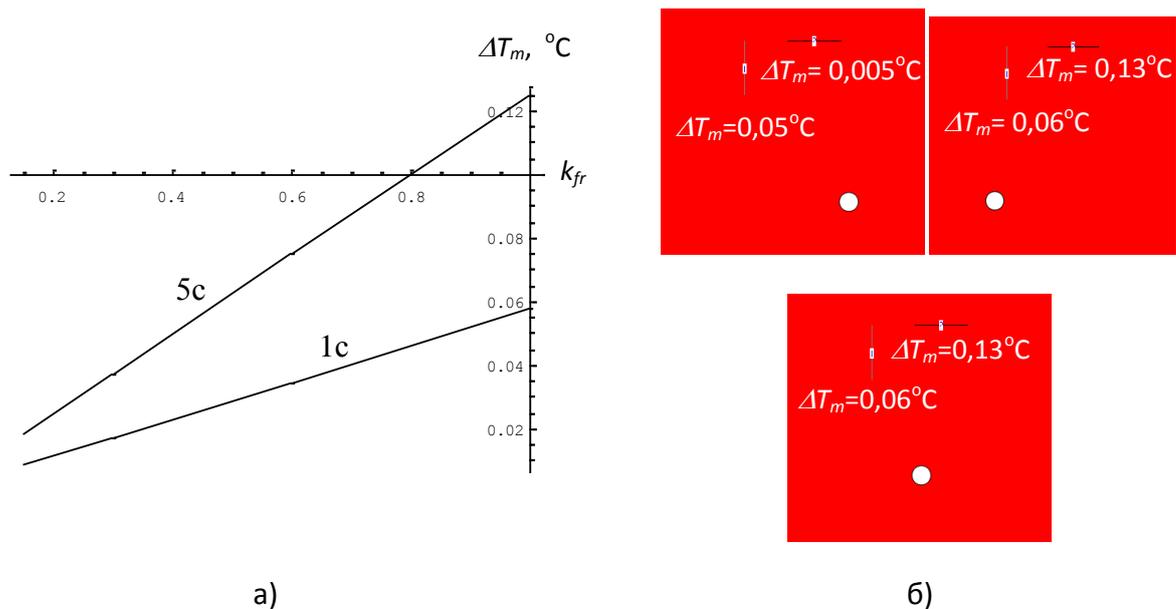
где q_{fr} - энергия трения;

k_{fr} - коэффициент трения;

p - контактное давление;

v - скорость взаимного смещения стенок трещины.

Очевидно, что расположение точки ввода УЗ колебаний относительно ориентации трещин должно оказывать существенное влияние на амплитуду температурных сигналов, что, в принципе, уже проиллюстрировано данными рисунка 3.9. Изменение ΔT в зависимости от положения точки ввода ультразвука показано на рисунке 3.12б. Интерпретация полученных сигналов не является простой, поскольку нужно принимать во внимание как расстояние между точкой ввода и дефектами, так и возможные многократные отражения между плоскими трещинами и краями образца.



а - $\Delta T_m(k_{fr})$; б – влияние ориентации дефектов

Рисунок 3.12 – Расчетные температурные сигналы в углепластике в зависимости от основных дефектных параметров (для дефектной геометрии рисунка 3.9, длина трещин 5 мм, длительность УЗ стимуляции 1с и 5с)

3.5 Выводы к третьей главе

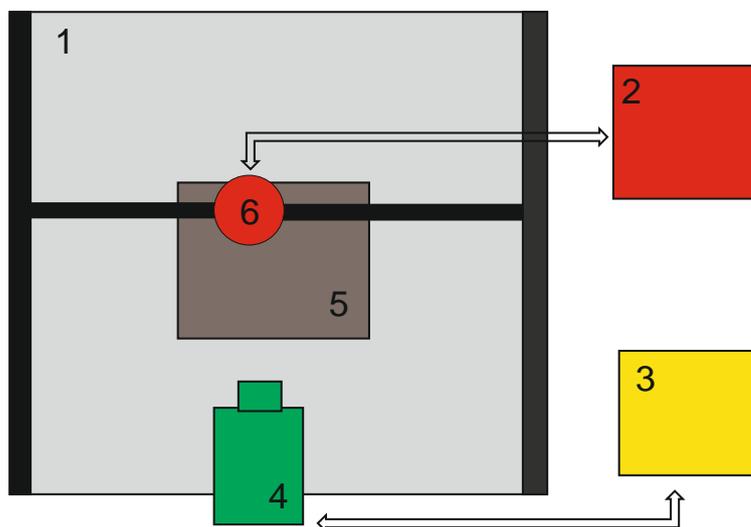
- Предложена теплофизическая модель оценки тепловыделения в дефектных зонах при УЗ стимуляции, в рамках которой предполагается, что трещина феноменологически проявляет себя в поверхностном температурном поле как источник внутреннего тепловыделения. Таким образом, путем сопоставления теоретических и экспериментальных данных возможна оценка мощности рассеяния УЗ энергии на дефектах, которая, например, для трещин в композиционных материалах достигает сотен милливатт.
- Разработана более строгая термомеханическая модель тепловыделения в дефектных зонах, реализацию которой проводят в два этапа: 1) решение трехмерной задачи распространения УЗ колебаний в пластине и вычисление мощности, генерируемой дефектом с нулевой толщиной вследствие внутреннего трения; 2) решение трехмерной задачи распространения тепла от источника, мощность которого определены на первом этапе.
- С помощью вышеуказанной модели исследованы зависимости температурных сигналов в дефектных зонах от механических свойств материала (коэффициента Пуассона и модуля Юнга), частоты акустических волн, амплитуды колебаний

магнитостриктора, расстояния между точкой УЗ стимуляции и точкой наблюдения, а также их взаимной ориентации.

- Амплитуда температурных сигналов пропорциональна коэффициенту трения и эффективной (поглощенной) акустической энергии. В диапазоне исследованной электрической мощности УЗ стимуляции (до 2,5 кВт), температурные сигналы пропорциональны электрической мощности на магнитострикторе.
- Расчетным путем получены оценки так называемого температурно-акустического спектра, вид которого для композитов типа углепластика показывает существенную зависимость температурных сигналов от частоты ультразвука, что, по-видимому, связано с комбинированным проявлением эффектов механического гистерезиса и резонансных явлений.
- Наибольшие температурные сигналы возникают при перпендикулярном расположении дефектов типа трещин относительно преимущественного направления распространения ультразвука. Поэтому при проведении сплошного контроля изделий из композиционных материалов целесообразна последовательная УЗ стимуляция изделий в различных точках, или одновременная стимуляция нескольких точек.

4 Аппаратура для экспериментальных исследований в области УЗ ИК термографии

Аппаратурная схема проводимых исследований представлена на рисунке 4.1. Используемое оборудование и его характеристики описаны ниже.

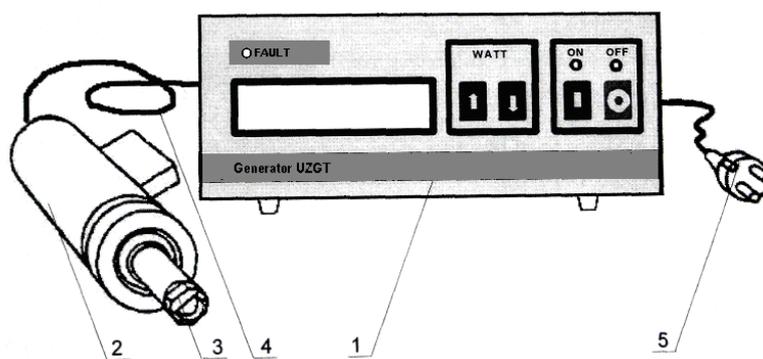


1 - Оснастка для крепления излучателя; 2 - ультразвуковой генератор; 3 - компьютер; 4 - тепловизор FLIR Systems P65; 5 - образец; 6 - УЗ излучатель

Рисунок 4.1 - Аппаратурная схема испытаний материалов с использованием метода УЗ ИК термографии:

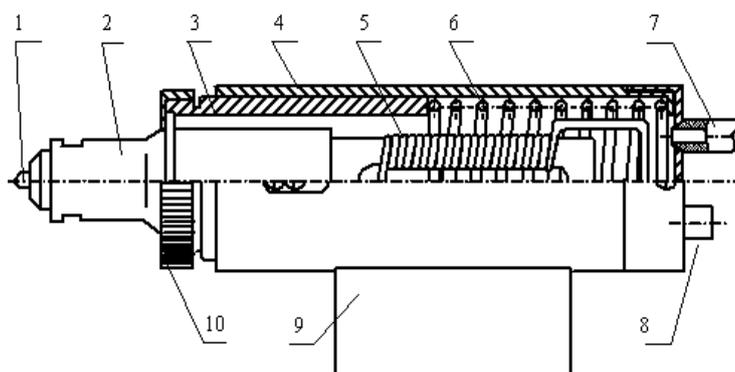
4.1 Установка для непрерывной УЗ стимуляции дефектов

На первом этапе исследований для непрерывной УЗ стимуляции дефектов использован стандартный комплекс УЗ финишной обработки (УФО) металлов с УЗ генератором УЗГТ-02/22 и магнитострикционным преобразователем, разработанный в ИФПМ СО РАН, г. Томск. Данное устройство (см. рисунок 4.2) предназначено для получения заданной шероховатости и повышения износоустойчивости поверхности при механической обработке изделий из металлов и сплавов методом поверхностного пластического деформирования на ультразвуковой частоте [73].



1 - ультразвуковой генератор; 2 - инструмент; 3 - индентор;
4 - соединитель; 5 - сетевой кабель

Рисунок 4.2 - Общий вид установки для ультразвуковой финишной обработки



1 - индентор; 2 - волновод; 3 - гильза; 4 - корпус; 5 - ультразвуковой преобразователь; 6 - возвратная пружина; 7 - штуцер подвода сжатого охлаждающего воздуха; 8 - электрический разъем; 9 - кронштейн для крепления на станке; 10 - гайка

Рисунок 4.3 - Устройство магнестрикционного излучателя

Инструментом УФО является магнестрикционный излучатель в корпусе с волноводом и индентором (см. рисунок 4.3). Технические параметры УФО следующие.

Генератор УЗГТ-02/22: потребляемая мощность $P_{пот} = 400$ Вт, шаг дискретизации выходной мощности ΔP равный 10 Вт, выходная мощность $P_{вых} = 250$ Вт, выходное напряжение $U_{вых} = 200$ В, частота генерации УЗ колебаний $f_{вых} = 22,0$ кГц, ток подмагничивания $I_{подмаг} = 2 - 4,5$ А, режим работы - непрерывный.

Магнестрикционный преобразователь: частота генерации УЗ колебаний $f_{вых} = 22,0$ кГц, амплитуда колебаний от 5 до 20 мкм, статическое усилие прижима преобразователя $P = 60 - 100$ Н, охлаждение – воздушное/водяное.

С помощью вышеописанного прибора можно вводить в объект контроля УЗ колебания с регулируемой мощностью от 50 до 300 Вт с шагом 10 Вт. Для проведения исследований была собран тепловый дефектоскоп с УЗ стимуляцией. Дефектоскоп (см. рисунок 4.4) состоит из комплекса УЗ стимуляции, включающего УЗ генератор УЗГТ-02/22 и магнитострикционный УЗ-излучатель), а также блока управления дефектоскопом на базе модуля Ке-USB24R (разработка В.В.Ширяева и Д.А.Нестерука), персонального компьютера, тепловизора и соответствующего программного обеспечения. Модуль Ке-USB24R предназначен для программного управления силовыми и слаботочными приборами и имеет в своем составе 4-х канальный аналого-цифровой преобразователь, 18 бинарных каналов ввода/вывода и 4 мощных электромагнитных реле.

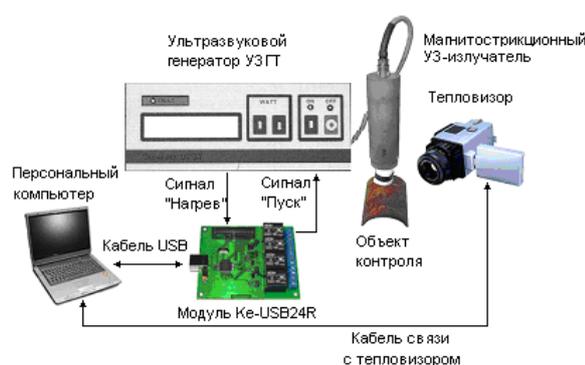
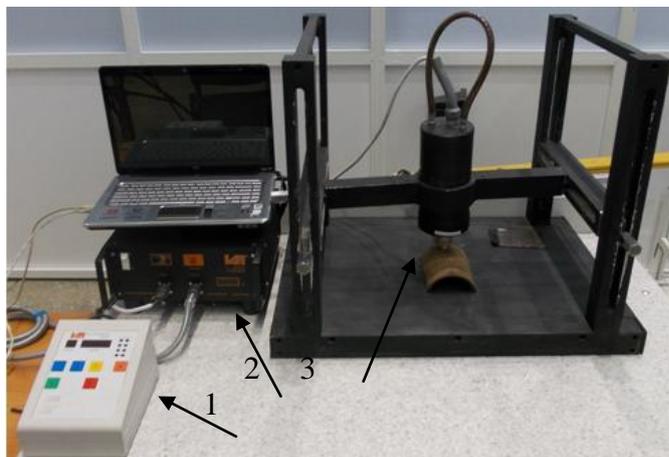


Рисунок 4.4 - Структура тепловизионного дефектоскопа с УЗ стимуляцией

Программное управление состоит в следующем. После подачи программой команды «Пуск» модуль Ке-USB24R вырабатывает релейный сигнал «Пуск» и включает УЗ-генератор. После некоторого задержки, вызванной техническими особенностями магнитострикционного излучателя, генератор вырабатывает сигнал «Нагрев», который запускает программный таймер на первый заданный интервал времени. Одновременно программой включается запись термограмм тепловизором, также подключенным к персональному компьютеру, в течение второго заданного интервала времени [73].

4.2 Установка для импульсной УЗ стимуляции дефектов

На базе экспериментальных исследований, выполненных с помощью вышеописанной установки непрерывной УЗ стимуляции, было разработано техническое задание и изготовлено силами ООО «Инлаб» (г.Санкт-Петербург) устройство для генерации импульсных акустических волн, показанное на рисунке 4.5. Основные характеристики приведены в таблице 4.1[74]



1- панель управления; 2 - блок питания; 3 - магнитострикционный преобразователь.
Рисунок 4.5 - Внешний вид установки для генерации импульсных акустических волн

Таблица 4.1 - Технические характеристики установки для импульсной УЗ стимуляции

Компоненты системы ТК	Технические характеристики	
Технологическая оснастка для крепления излучателя 	Габаритные размеры	600x800x700мм
	Используемый материал	Сплав Д-16Т
	Материал основания	ПВХ
	Снаряженная масса, кг	20
Устройство для ультразвуковой стимуляции ИЛ10-2.5М 	Технические характеристики генератора	
	Выходная мощность	2,5 кВт
	Регулировка мощности, ступенчатая	100%, 75%, 50%
	Рабочая частота, кГц	22
	Потребляемая мощность, кВт	3,5
	Качающаяся частота (девиация), Гц	±150 от рабочей частоты
	Время одиночного импульса, сек	0,1-50
	Дискретность установки времени импульса, сек	0,1
	Технические характеристики преобразователя	
	Потребляемая мощность, кВт	2,5
	Электроакустический КПД, %	58
Ток подмагничивания, А	7	
Охлаждение	Жидкостное	

4.3 Тепловизионная система

В настоящих диссертационных исследованиях использованы две тепловизионные системы высокого уровня: ThermaCAM P65 производства фирмы FLIR Systems (США) и NEC TH-9100 производства фирмы NEC Avio (Япония). Технические характеристики систем приведены в таблице 4.2 [75,76].

Таблица 4.2 - Технические характеристики тепловизионных систем

Компоненты системы ТК	Технические характеристики	
 <p>Тепловизор ThermaCam P65 HS</p>	Поле зрения/минимальное фокусное расстояние	24° x 18°/0,3 м
	Пространственное разрешение (мгновенное поле зрения - IFOV)	1,3 мрад
	Температурная чувствительность	0,05°С при 30°С
	Частота кадров	50/60 Гц, с прогрессивной разверткой
	Фокусировка	Автоматическая или ручная
	Тип детектора	Плоская фокальная матрица (FPA), неохлаждаемый микроболометр, 320x240 пикселей
	Спектральный диапазон	От 7,5 до 13 мкм
	Видеоизображение от встроенной цифровой видеокамеры	640 x 480 пикселей, с полным набором цветов
	Интервал температур	диапазон 1: -40°С...+120°С; диапазон 2: 0°С...+500°С; опция: до +1500°С или до +2000°С
	Точность	±2°С, ±2% от показания
Форматы файлов - тепловые изображения	Стандарт JPEG, включаются 14-битовые данные измерений	
 <p>Тепловизор NEC Avio TH-9100</p>	Поле зрения/минимальное фокусное расстояние	21,7°x16,4°
	Температурная чувствительность	0,08/0,1°С - при измерении с частотой 60 Гц; 0,04/0,05°С - при осреднении 16 измерений
	Частота кадров	60 Гц
	Фокусировка	Полностью автоматическая, минимальное расстояние 30 мм
	Тип детектора	Неохлаждаемая микроболометрическая матрица 320x240 элементов

Продолжение таблица 4.2

Спектральный диапазон	8-14 мкм
Видеоизображение от встроенной цифровой видеокамеры	Встроенная цветная цифровая видеокамера 752 x 480 элементов
Интервал температур	Диапазон 1: -20...+100°C/ -40...+120°C Диапазон 2: 0...+250°C/0...500°C Диапазон 3: 100...800°C / 200...2000°C Диапазон 4: 200...2000°C
Точность	±2°C, но не менее ±2%
Форматы файлов - тепловые изображения	Стандарт JPEG, включаются 14-битовые данные измерений
Устройство памяти	Сменная карта памяти Compact flash
Дополнительные функции тепловизора	Встроенная цветная цифровая видеокамера 752x480 элементов 2-х и 4-х кратный оптический «ум»

4.4 Выводы к четвертой главе

- В четвертой главе описана экспериментальная аппаратура, разработанная в рамках настоящей диссертационной работы для исследований по УЗ ИК термографическому контролю композиционных материалов.
- Для УЗ возбуждения твердых тел использованы две установки. Для непрерывного возбуждения акустических волн использована стандартная установка финишной обработки металлов (частота 22 кГц, электрическая мощность на магнитоотрикторе до 300 Вт, длительность стимуляции композиционных материалов без охлаждения до 20 с).
- Для импульсной УЗ стимуляции по техническому заданию исполнителя разработана специализированная установка (изготовитель ООО «Инлаб»): частота 22 кГц, электрическая мощность на магнитоотрикторе до 2,5 кВт, минимальная длительность импульса 0,1 с, шаг дискретизации 0,1 с, длительность стимуляции композиционных материалов без охлаждения до 20 с). В данной установке, с целью предотвращения образования стоячих волн, предусмотрена девиация частоты ±150Гц.

- Для ИК термографической регистрации динамических температурных сигналов использованы стандартные ИК тепловизоры высокого уровня ThermoCAM P65 и NEC TN-9100.
- Для экспериментальных исследований композиционных материалов разработан экспериментальный комплекс, включающий вышеупомянутые устройства УЗ стимуляции, ИК тепловизоры, компьютер типа «лэп-топ» и устройство управления на базе модуля Ke-USB24R и оригинального программного обеспечения.

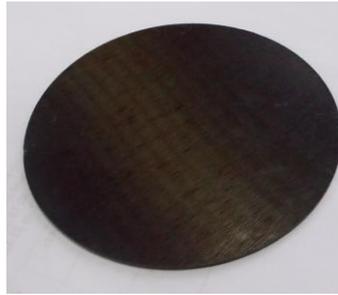
5 Экспериментальные исследования УЗ ИК термографического контроля полимерных композиционных материалов

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований, выполненных в Национальном исследовательском Томском политехническом университете на образцах из композиционных материалов, содержащих искусственные и естественные дефекты [77-84]

Цель выполненных исследований заключалась в анализе феноменологических особенностей УЗ ИК термографического контроля структурных дефектов и количественной оценке ряда показателей процедур контроля.

Для изготовления экспериментальных образцов использовали материалы, применяемые в современной авиакосмической промышленности и предоставленные отечественными и зарубежными изготовителями авиационной и ядерной техники. Образцы показаны на рисунке 5.1.





ж)

з)

и)

а - углепластиковая панель толщиной 2 мм; б - углепластиковая панель толщиной 1 мм;
в - углепластиковая панель толщиной 5 мм; г - углепластиковая панель толщиной 0,8 мм;
д - теплозащитное покрытие толщиной 0,3 мм на никеле; е - углепластиковый цилиндр
(толщина стенки 5 мм); ж - органопластиковый цилиндр (толщина стенки 5 мм);
з - углепластиковая панель толщиной 3 мм; и - углепластиковая панель толщиной 3 мм

Рисунок 5.1 - Образцы композиционных материалов, использованных в экспериментальных исследованиях:

5.1 Влияние мощности и длительности УЗ стимуляции на температурные сигналы

Серия экспериментальных исследований была проведена с целью определить оптимальный способ УЗ стимуляции композиционных материалов с учетом имевшихся в наличии УЗ магнитострикционных систем, описанных выше. Оптимальность УЗ воздействия определяли с точки зрения его длительности и количества вводимой акустической энергии. При этом в качестве регистрируемых критериев оптимизации использовали дифференциальный температурный сигнал ΔT и отношение сигнал/шум SNR как два естественных параметра, широко применяемых в ТК.

Осуществляли контроль экспериментальных образцов из углепластика с дефектами в виде продольных трещин ударного происхождения (энергия воздействия 4-6 Дж). Образец устанавливали на основание технологической оснастки и крепили к основанию оснастки экспериментальной установки. Давление, создаваемое индентором на экспериментальные образцы, в каждой серии экспериментов обеспечивалось собственной массой головки (5,2 кг) и было относительно постоянным. Расстояние от точки ввода ультразвука до дефектного участка поддерживалось постоянным в экспериментах, направленных на сравнение длительного и импульсного нагрева. Стимуляцию выполняли «короткими» (единицы секунды) и «длинными» (до 15 с) импульсами, а также пакетами импульсов, что создавало чередующиеся периоды «нагрева» и «охлаждения».

5.1.1 Дифференциальный температурный сигнал

Дифференциальный температурный сигнал ΔT является естественной характеристикой сравнения процедур ТК, поскольку он легко сопоставляется с паспортным температурным разрешением современных ИК тепловизоров (10-100 мК). Результаты испытаний композиционных материалов по данному критерию представлены в таблице 5.1. Для обработки тепловизионных изображений использовалось программное обеспечение ThermoFit Pro, ранее разработанное в Томском политехническом университете [85].

Таблица 5.1- Результаты экспериментов по выбору оптимальной типа УЗ стимуляции

Электрическая мощность излучателя	$N_{имп} - 5$ шт $T_{имп} - 0.2$ с $T_{общ} - 1$ с	$N_{имп} - 10$ шт $T_{имп} - 0.2$ с $T_{общ} - 2$ с	$N_{имп} - 15$ шт $T_{имп} - 0.2$ с $T_{общ} - 3$ с	$N_{имп} - 20$ шт $T_{имп} - 0.2$ с $T_{общ} - 4$ сек.	$N_{имп} - 25$ шт. $T_{сек} - 0.2$ с $T_{общ} - 5$ с
Органопластик - стимуляция пакетом импульсов					
1.25кВт $T_{нач}/T_{кон}$	30.2/26.6	32.1/27.4	33.3/27.6	33.2/26.7	34.1/27.0
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	3.6	4.7	5.7	6.5	7.1
Органопластик - импульсная стимуляция					
Электрическая мощность излучателя	$T - 1$ сек	$T - 2$ сек	$T - 3$ сек	$T - 4$ сек	$T - 5$ сек
1.25кВт $T_{нач}/T_{кон}$	29.4/26.6	33.5/26.1	32.7/26.1	33.8/26.7	34.2/26.7
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	2.8	5.4	6.6	7.1	7.5
Углепластик - стимуляция пакетом импульсов					
Электрическая мощность излучателя	$N_{имп} - 5$ шт $T_{имп} - 0.2$ с $T_{общ} - 1$ с	$N_{имп} - 10$ шт $T_{имп} - 0.2$ с $T_{общ} - 2$ с	$N_{имп} - 15$ шт $T_{имп} - 0.2$ с $T_{общ} - 3$ с	$N_{имп} - 20$ шт $T_{имп} - 0.2$ с $T_{общ} - 4$ сек.	$N_{имп} - 25$ шт. $T_{сек} - 0.2$ с $T_{общ} - 5$ с
1,875кВт $T_{нач}/T_{кон}$	27,3/30.2	28.0/31.4	28.0/32.0	28.0/32.8	28.0/33.6
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	2.9	3.4	4.0	4.8	5.6
Углепластик - импульсная стимуляция					
Электрическая мощность излучателя	$T - 1$ сек	$T - 2$ сек	$T - 3$ сек	$T - 4$ сек	$T - 5$ сек
1,875кВт $T_{нач}/T_{кон}$	29.0/31.0	28.5/31.2	28.7/32.2	29.0/33.1	29.0/34.0
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	3.0	3.2	3.5	4.1	5.0

Полученные данные представлены графически на рисунках 5.2 - 5.3.

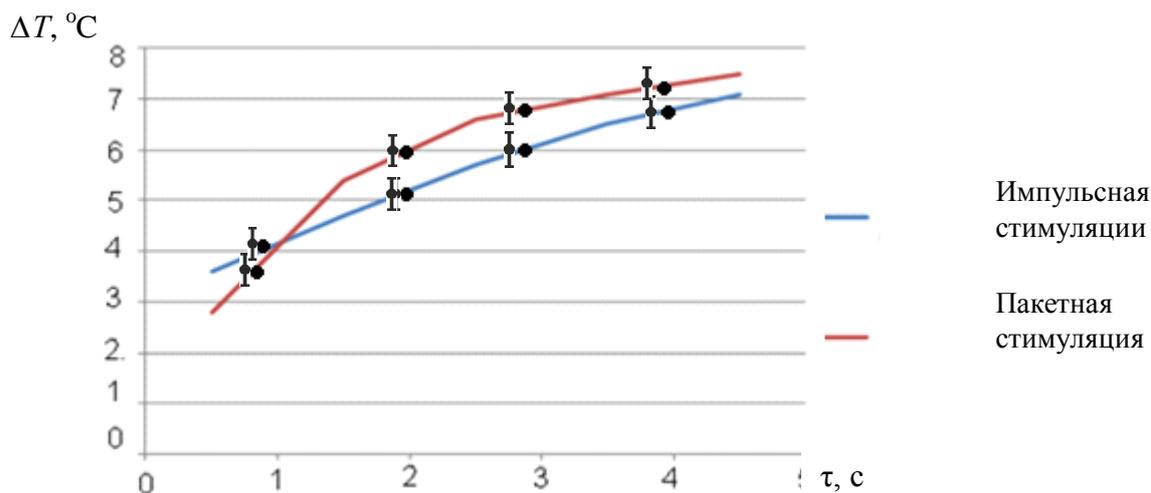


Рисунок 5.2 - Эволюция температурных сигналов (ΔT) в зоне дефектов при УЗ стимуляции органопластика (см. данные таблицы 5.2)

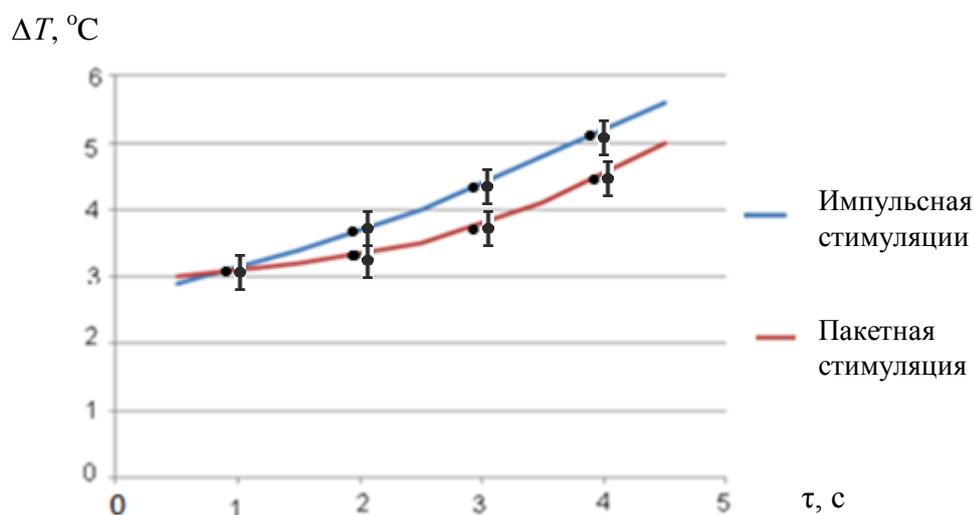


Рисунок 5.3 - Эволюция ΔT в зоне дефектов при УЗ стимуляции углепластика (см. данные таблицы 5.2)

Термограммы, иллюстрирующие вышеприведенные результаты, представлены на рисунках 5.4 - 5.5. Анализ результатов приводит к следующим выводам.

- Изменение дифференциальных температурных сигналов во времени $\Delta T(\tau)$ описывается приблизительно линейными функциями независимо от типа УЗ стимуляции, что хорошо согласуется с теоретическими предположениями о линейности термомеханического процесса, приведенными во второй главе.
- Интуитивно ожидалось, что импульсное возбуждение может обеспечить более четкое выявление формы дефектов по сравнению с постоянной стимуляцией за счет меньшей диффузии тепла в материале. Фактически, максимальные

температурные сигналы, в основном, соответствуют мощным коротким импульсам УЗ стимуляции, однако основным фактором, влияющим на величину ΔT , является общая энергия ультразвуковых колебаний, введенная в материал.

- При ультразвуковой стимуляции пакетом УЗ импульсов температурное поле на поверхности образца характеризуется более высоким визуальным контрастом между дефектными и бездефектными участками, по - видимому, благодаря более короткому времени УЗ стимуляции и, следовательно, меньшей диффузии тепловой энергии в материале (аналогично тому, как это имеет место при оптической стимуляции на поверхности).

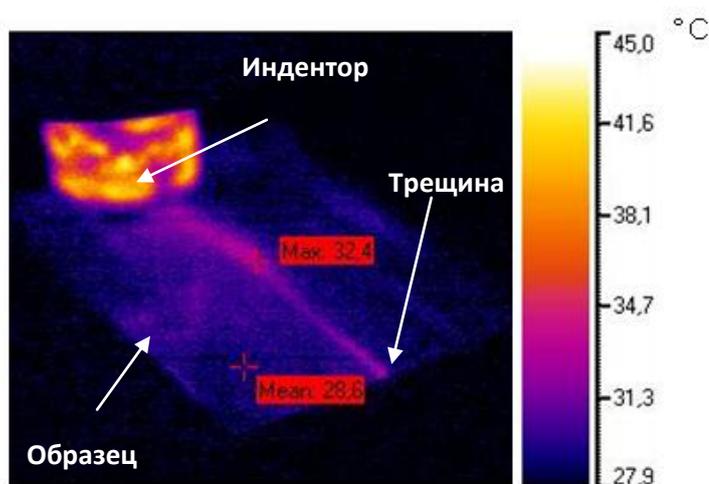


Рисунок 5.4 - Термограмма углепластикового образца толщиной 2 мм при пакетной стимуляции (число импульсов - 10, длительность импульса 0,2 с; общее время УЗ стимуляции 2 с)

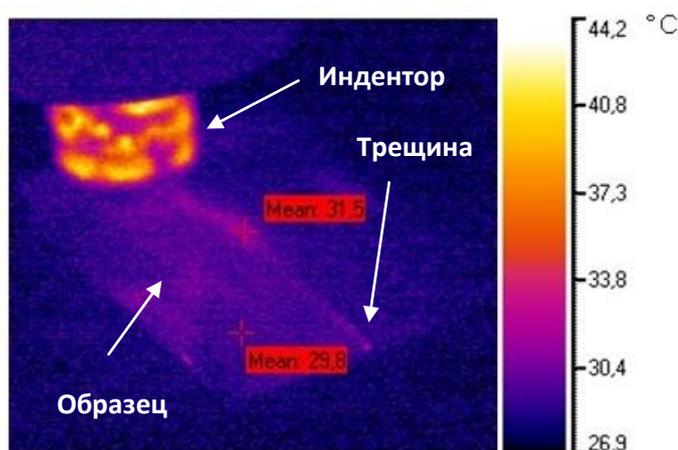


Рисунок 5.5 - Термограмма углепластикового образца при УЗ стимуляции в течение 1 с

5.1.2 Отношение дифференциального температурного сигнала к электрической мощности на инденторе

Для более объективного сравнения процедур УЗ ИК термографии целесообразно применить нормирование регистрируемых сигналов ΔT на мощность УЗ возбуждения (электрическую мощность на магнитоотрикторе) P :

$$K = \Delta T / P, \quad (5.1)$$

где K можно назвать относительным температурным сигналом, °С/Вт.

Рассмотрим качественную связь электрической мощности на магнитоотрикторе экспериментальной установки с акустической мощностью в точке ввода акустической энергии колебаний.

В состав любой УЗ технологической установки входят источник энергии и УЗ колебательная система, преобразующая электрическую энергию в энергию механических УЗ) колебаний. Наиболее распространенным типом преобразователей являются электроакустические (источником энергии является генератор УЗ частоты), а также механоакустические источники УЗ колебаний, преобразующие механическую энергию в ультразвук. При заданном значении акустической мощности на входе преобразователя амплитуда колебаний определяется сопротивлением нагрузки. В тех случаях, когда преобразователь является частью колебательной системы, определяется значение приведенного сопротивления нагрузки с учетом её трансформации волноводной системы. При этом исходной величиной для расчетов служит сопротивление нагрузки технологической среды. Сопротивлением нагрузки является отношение мгновенных значений сил и скорости.

При гармонических колебаниях с учетом сдвига фаз это отношение имеет активную и реактивную компоненты [86]:

$$Z_n = R_n + iX_n \quad (5.2)$$

где R_n - активная составляющая;

X_n - реактивная составляющая.

Реактивная составляющая приводит к изменению частоты резонанса, активная составляющая связана со снижением амплитуды колебательной скорости. В линейном приближении, то есть в случае, когда сила и скорость изменяется по гармоническому закону и амплитуда силы пропорциональна амплитуде колебательной скорости, акустическая мощность излучаемая в нагрузку, пропорциональна произведению активной составляющей нагрузки на квадрат амплитуды колебательной скорости формула:

$$W_a = 1/2 R_n U_m^2, \quad (5.3)$$

где R_n - произведению активной составляющей нагрузки;

U_m^2 - квадрат амплитуды колебательной скорости.

Приведенный выше анализ показывает, что акустическая мощность, как излученная, так и поглощенная контролируемым материалом, нелинейно связана с электрической мощностью на магнитоэлектрике, тем не менее, можно считать, что оценка по формуле (5.2) может быть полезна вследствие нормирования регистрируемых сигналов на электрическую мощность. Некоторые результаты приведены в таблице 5.2 и на рисунке 5.6.

Таблица 5.2 - Влияние типа и длительности УЗ стимуляции на относительный температурный сигнал материал углепластик (рисунок 5.1 а)

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

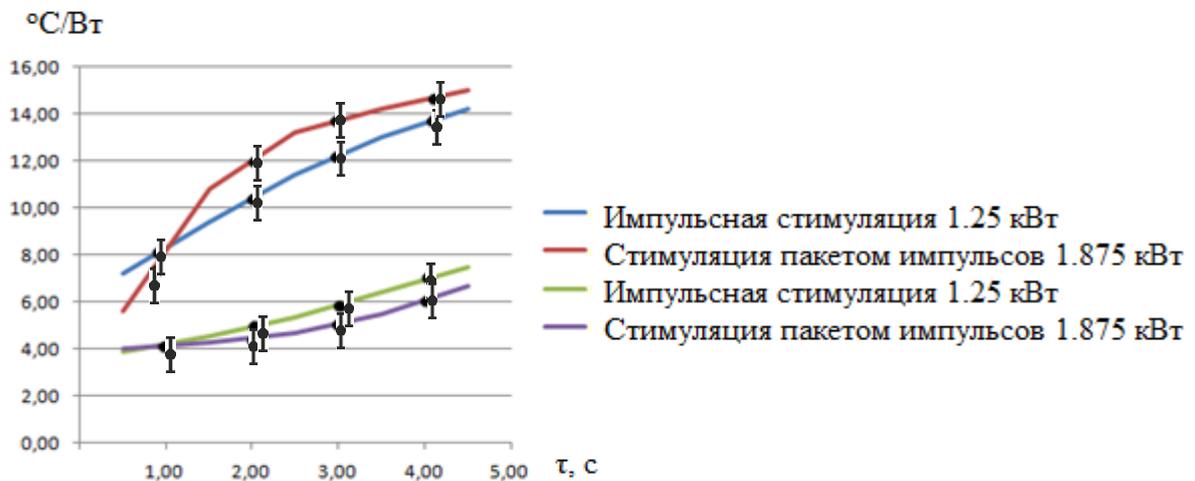


Рисунок 5.6 - Влияние типа и длительности УЗ стимуляции на относительный температурный сигнал материал углепластик (рисунок 5.1а)

Качественное поведение полученных результатов аналогично описанным выше, иллюстрируя приблизительно линейный рост параметра K с увеличением длительности УЗ стимуляции композиционных материалов. При этом максимальные значения K наблюдались при использовании сравнительно маломощной непрерывной стимуляции, что, по - видимому, объясняется нелинейным характером преобразования электрической энергии в акустическую.

5.1.3 Отношение сигнал/шум

Поскольку величина ΔT пропорциональна поглощенной энергии стимуляции, более подходящим критерием сравнения процедур ТК является отношение сигнал/шум SNR , которое учитывает не только амплитуды «полезных» температурных сигналов, но и помехи, сопутствующие той или иной процедуре испытаний. Величина SNR описывается стандартной формулой:

$$S = \frac{T_d - T_{nd}}{\sigma} \quad (5.3)$$

где T_d и T_{nd} - средние температуры в дефектной (d) и бездефектной (nd) зонах;

σ - стандартное отклонение температуры в бездефектной зоне.

Экспериментальные оценки параметра SNR были получены на образцах рисунка 5.1. Для получения максимального объема информации ИК термограммы записывали с частотой 60 Гц, при этом общее количество записанных и далее анализируемых изображений достигало 1200. Результаты приведены в таблице 5.3 и на рисунках 5.7-5.11, где также показаны графики изменения температуры во времени. Отношение сигнал/шум вычисляли с помощью программы ThermoFit Pro в зоне белого цвета (рисунок 5.8).

Таблица 5.3 - Оценка отношения сигнал/шум SNR в зависимости от длительности УЗ стимуляции (углепластиковый образец толщиной 2 мм с ударным повреждением)

Время стимуляции, с	Условная мощность, %	Значение сигнал/шум (SNR)
1	75	2,91
2	75	6,24
3	75	7,94
4	75	10,39
5	75	12,21

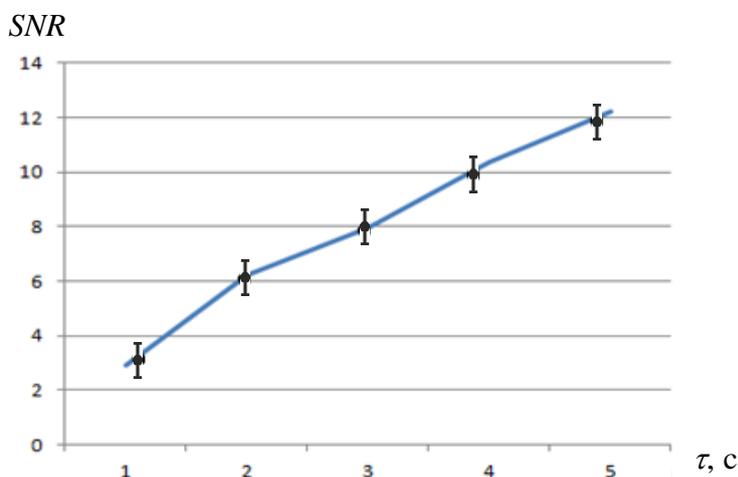


Рисунок 5.7 - График изменения SNR в зависимости от времени УЗ стимуляции

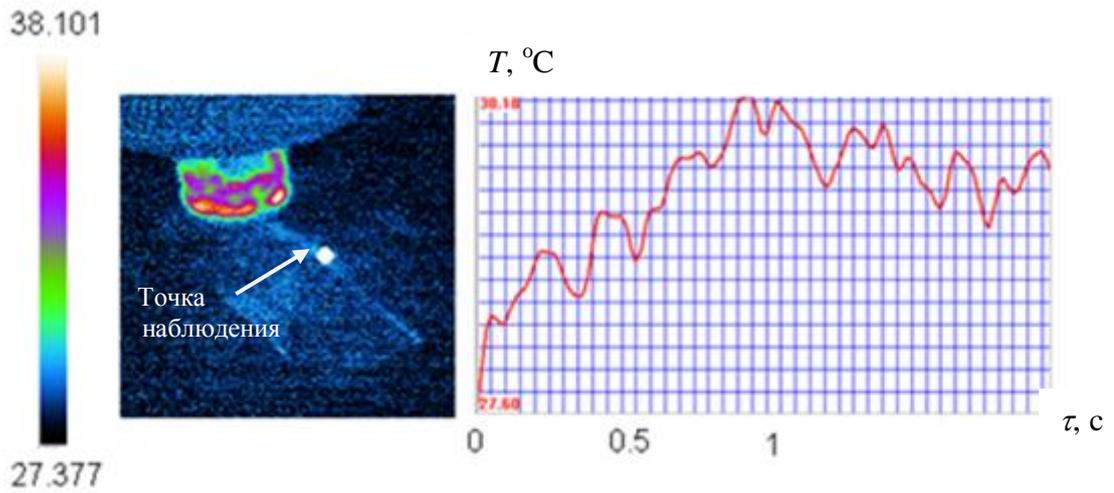


Рисунок 5.8 - Термограмма с визуально наблюдаемым дефектным участком и график изменения температуры во времени (углепластиковый образец, время стимуляции 1 с)

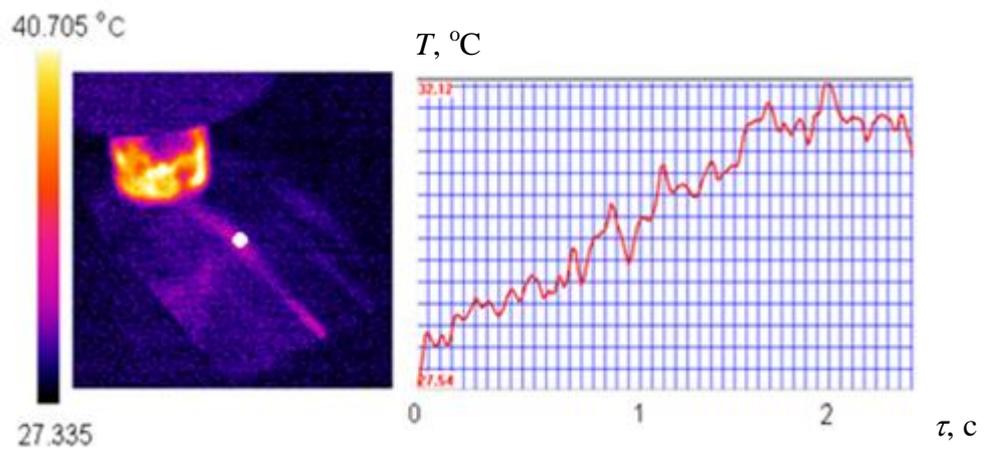


Рисунок 5.9 - Термограмма с визуально наблюдаемым дефектным участком и график изменения температуры во времени (углепластиковый образец, время стимуляции 2 с)

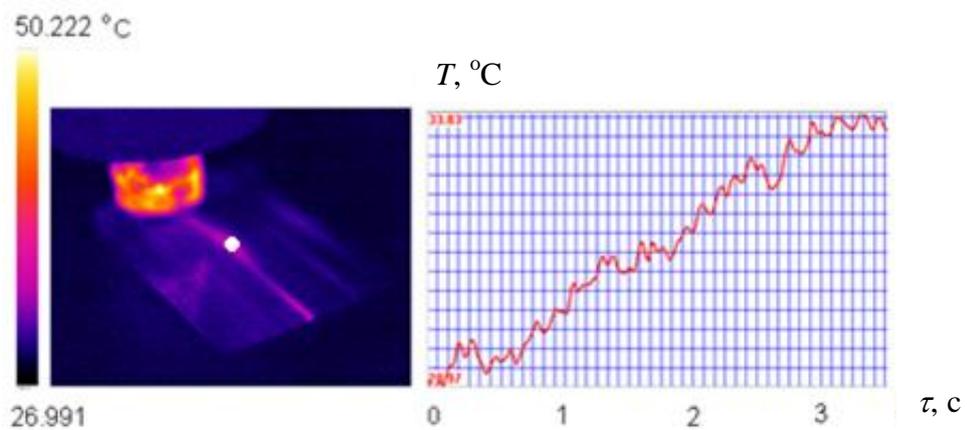


Рисунок 5.10 - Термограмма с визуально наблюдаемым дефектным участком и график изменения температуры во времени (углепластиковый образец, время стимуляции 3 с)

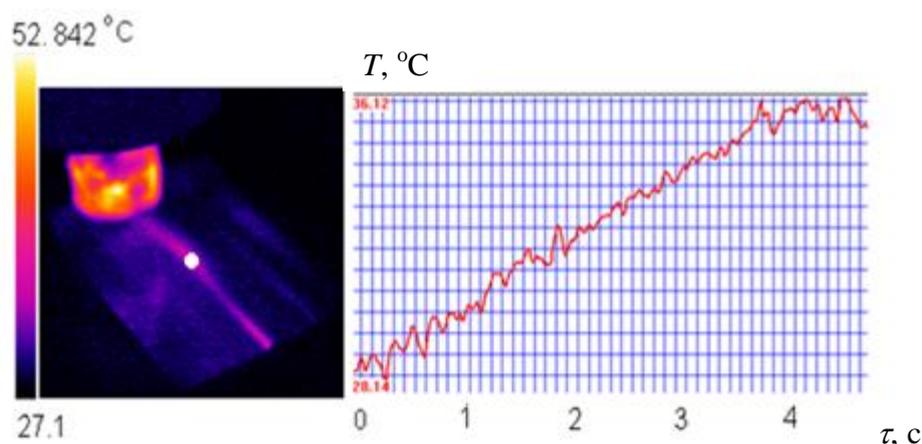


Рисунок 5.11 - Термограмма с визуально наблюдаемым дефектным участком и график изменения температуры во времени (углепластиковый образец, время стимуляции 4 с)

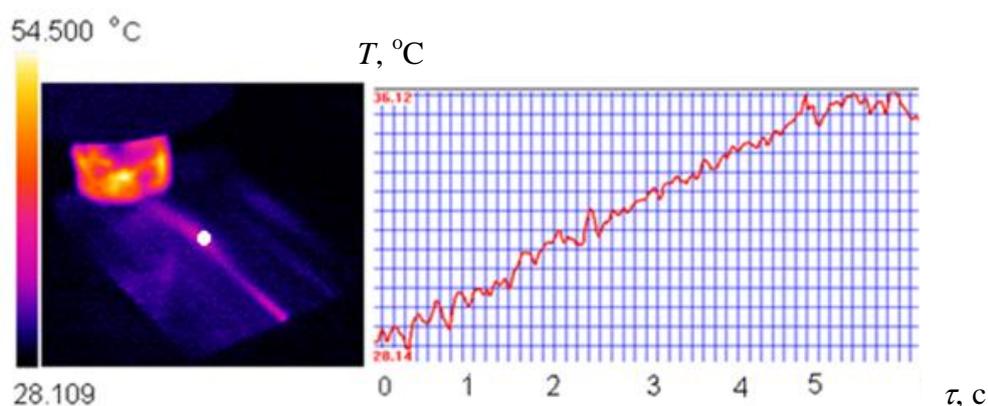


Рисунок 5.12 - Термограмма с визуально наблюдаемым дефектным участком и график изменения температуры во времени (углепластиковый образец, время стимуляции 5 с)

Из рисунков 5.8 - 5.12 следует, что избыточная температура изделия линейно возрастает во времени, а отношение сигнал/шум увеличивается с ростом времени УЗ стимуляции. Физически это объясняется тем, что дифференциальные сигналы ΔT линейно возрастают, а дисперсия температурного шума σ остается постоянной. При этом диффузия тепла в «поперечных» направлениях относительно невелика вследствие сравнительно низкой теплопроводности композита (в случае ТК металлов, по-видимому, существует оптимальное время стимуляции, после которого распространение тепла по основному материалу будет «смазывать» температурные сигналы от дефектов).

Линейный характер тепловыделения в дефекте при его УЗ стимуляции в обобщенном виде проиллюстрирован данными в таблице 5.4 и на рисунке 5.13, где значения SNR показаны в зависимости от электрической (условной) мощности на инденторе и длительности УЗ стимуляции. Для того, чтобы сделать результаты более однородными, предложено ввести электрическую энергию УЗ стимуляции W как

произведения мощности на длительность воздействия. Зависимость SNR от W показана на рисунке 5.13.

Таблица 5.4 - Зависимость отношения сигнал/шум SNR от времени и мощности УЗ стимуляции

Электрическая мощность стимуляции, Вт	Время стимуляции, с	Условная энергия стимуляции, Дж	Отношение сигнал/шум (SNR)
1000	3	3000	16,3
1500	3	4500	23,0
2000	3	6000	69,4
1000	4	4000	17,8
1500	4	6000	27,7
2000	4	8000	57,3
1000	5	5000	24,1
1500	5	7500	60
2000	5	10000	71,2

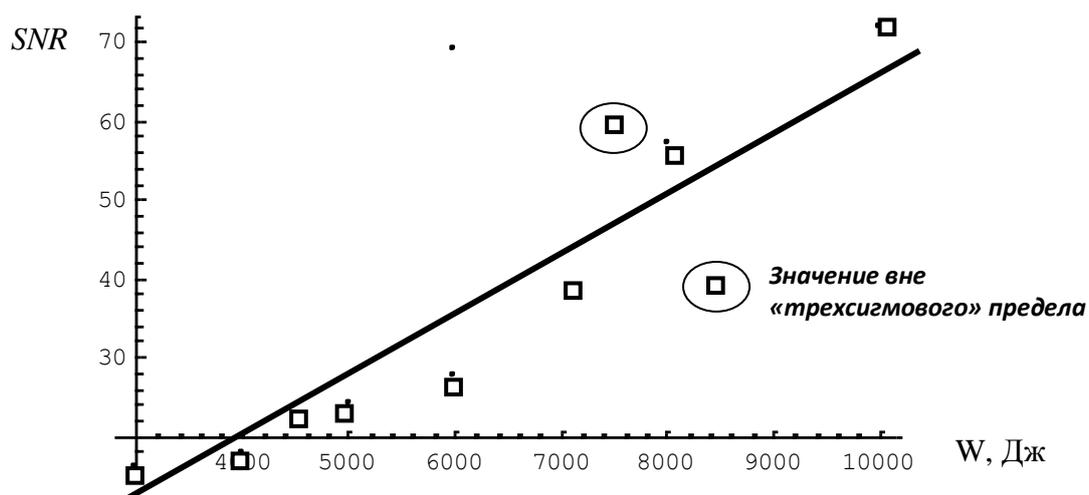


Рисунок 5.13 - Зависимость отношения сигнал/шум от электрической (условной) энергии УЗ стимуляции при ТК углепластиковой пластины толщиной 1 мм

5.2 Температурные распределения в дефектных зонах

В данном эксперименте изучали особенности распределения температуры в дефектной зоне. Целью исследований являлся анализ текстуры температурного поля в зоне трещин, стимулируемых ультразвуком, а также оценка возможного нагрева бездефектного материала.

Режимы УЗ стимуляции выбирали из условий достижения наибольшего отношения сигнал/шум согласно данным, полученным ранее. Обработку ИК термограмм проводили с помощью программного обеспечения ThermoFit Pro. Высокочастотные

шумы сглаживали с помощью низкочастотного и медианного фильтров размером 3x3 как во времени, так и по пространству. Температуру фиксировали в точках 1-4 (см. термограммы). Результаты приведены на рисунках 5.14, 5.15 и в таблице 5.5.

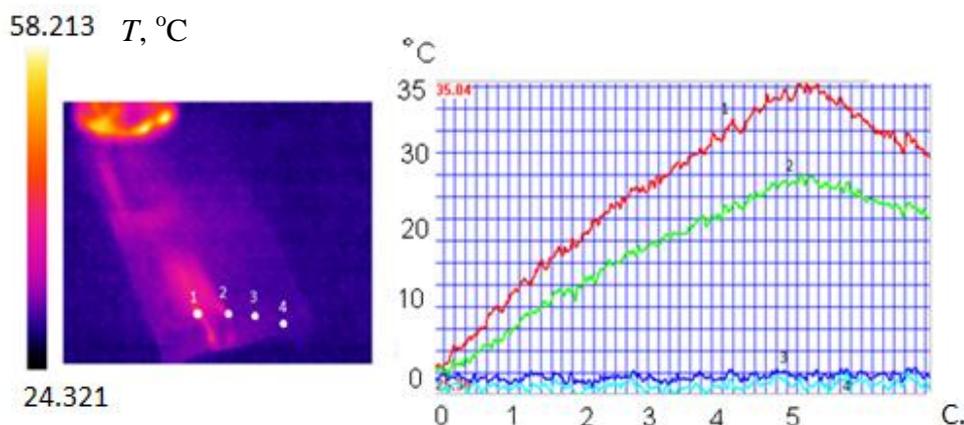


Рисунок 5.14 - Изменение температуры во времени в различных точка поверхности образца из углепластика при УЗ стимуляции мощностью 1 кВт в течение 5 с

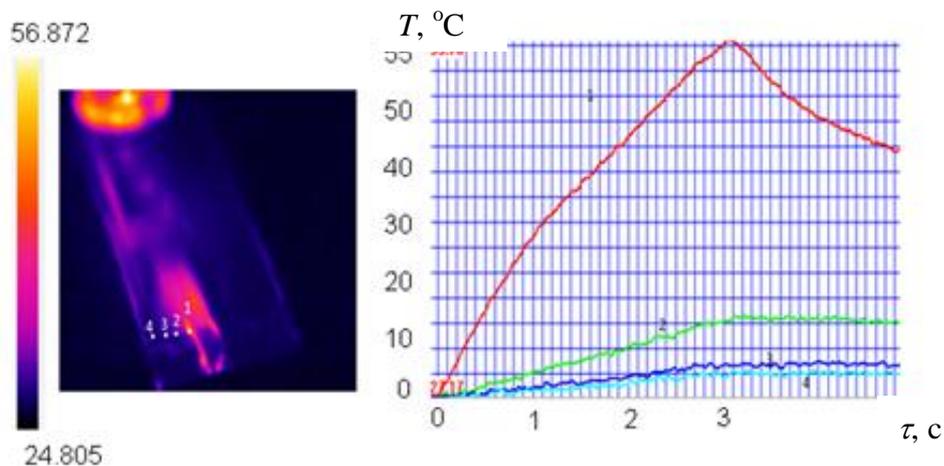


Рисунок 5.15 - Изменение температуры во времени в различных точка поверхности образца из углепластика при УЗ стимуляции мощностью 2 кВт в течение 3 с

Таблица 5.5 - Оценка температуры в различных точках поверхности образца из углепластика толщиной 1 мм при УЗ стимуляции

Координаты точки наблюдения на термограмме	Номер температурной кривой	Максимальная температура в точке, °C	Время достижения максимальной температуры в заданной точке, с
Электрическая мощность 1 кВт, время стимуляции 5 с, см. рисунок 5.14			
140/190	1	37,4	5,1
146/185	2	33,13	5,12
180/177	3	27,00	нет данных
207/107	4	26,73	нет данных
Электрическая мощность 2 кВт, время стимуляции 3 с, см. рисунок 5.15			
140/190	1	60,3	192
124/190	2	35,18	193
109/189	3	31,1	193
84/184	4	29,11	194

Очевидно, что максимальный рост температуры происходит непосредственно над дефектом. При длительной УЗ стимуляции наблюдается незначительный рост температуры в бездефектной области, что можно объяснить диффузией тепла за счет теплопроводности, а не поглощением УЗ энергии. Иными словами, УЗ стимуляция не вызывает нагрева основного материала изделия и, следовательно, надежность обнаружения дефектов в виде трещин возрастает по мере увеличения УЗ энергии, рассеянной на структурных неоднородностях материала, то есть электрической мощности на инденторе и времени стимуляции.

5.3 Исследование влияния иммерсионной жидкости на интенсивность УЗ стимуляции

Контактные жидкости используются практически во всех УЗ технологиях для облегчения передачи звукового импульса от датчика в контролируемый объект. В качестве иммерсионных сред применяют вязкие нетоксичные жидкости, гели или пасты (пропиленгликоль, глицерин, гель, силиконовое масло.). Их использование обусловлено тем фактом, что звуковые волны используемых для НК частот, практически не распространяются в воздухе. Помимо эффекта затухания, воздух обладает акустическим импедансом, не соответствующим импедансу поверхности датчика или объекта контроля. Поэтому тонкие воздушные прослойки между датчиком и контролируемым материалом препятствует передаче звукового импульса в тестовый образец и делают невозможным проведение контактных исследований.

Пропиленгликоль является контактной жидкостью общего назначения, используемой при проведении измерений на гладких поверхностях в условиях нормальных температур. Он хорошо смачивает поверхность, не разъедает обычные конструкционные материалы и хорошо смывается водой. Пропиленгликоль химически неактивен и долгое время не испаряется. Глицерин также является контактной жидкостью общего назначения. По сравнению с пропиленгликолем глицерину присущи как достоинства, так и недостатки. Преимуществами являются бóльшая вязкость и бóльший акустический импеданс глицерина, что дает возможность использовать его на шероховатых поверхностях и материалах с высоким коэффициентом затухания. Силиконовое масло используется в качестве контактной жидкости между датчиком и призмой при проведении измерений наклонными датчиками. Силиконовое масло не испаряется и не растворяется в воде. Гель в качестве контактной жидкости рекомендуется для использования на таких шероховатых поверхностях, как литейно-формовочные металлы и прессованное стекловолокно. Высокая вязкость и относительно высокий

акустический импеданс позволяет эффективно передавать звуковой импульс в ситуациях, когда датчик не может быть прикреплен к гладкой поверхности.

В процессе экспериментов с иммерсионными жидкостями, между индентором и экспериментальным образцом размещали слой жидкости, высотой от одного до двух миллиметров. Стимуляцию проводили как «короткими», так и «длинными» импульсами.

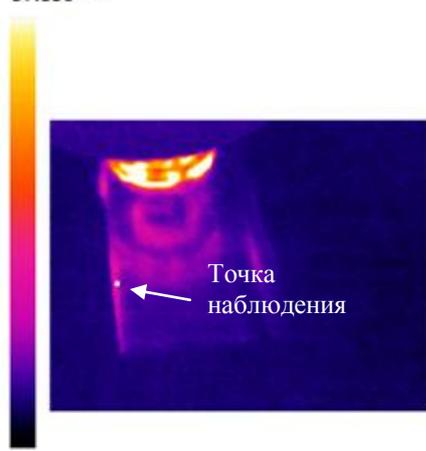
После нанесения иммерсионного слоя на образец индентор прижимался с постоянной силой, регистрацию параметров осуществляли в одних и тех же точках. Влияние иммерсионной жидкости на результаты ТК с использованием метода УЗ ИК термографии проиллюстрировано данными таблицы 5.6 а также термограммами рисунков 5.17 - 5.20. Видно, что, вследствие механизма магнитострикционного возбуждения ультразвука за счет ударных колебаний шарика индентора с амплитудой 7 мкм, наличие и тип иммерсионной жидкости не оказывают существенного влияние на отношение сигнал/шум [87-91].

Таблица 5.6 - Влияние иммерсионной жидкости на отношение сигнал/шум при обнаружении трещин в углепластике толщиной 3 мм (мощность на инденторе 1,9 кВт)

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

* Сигнал ниже уровня шума

57.850 °C



24.328

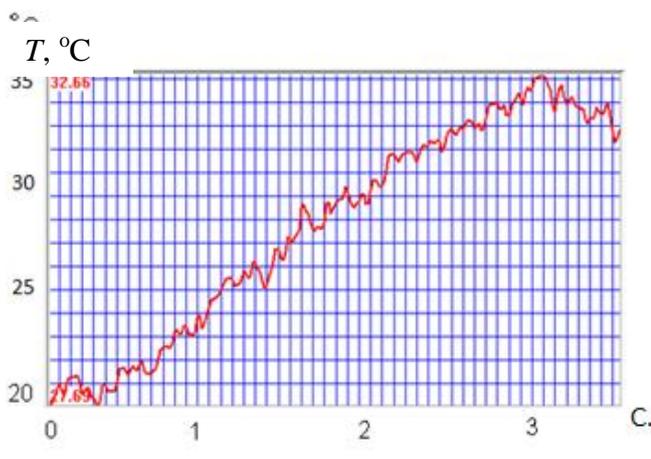


Рисунок 5.17 - Профиль температуры в зоне трещины (длительность стимуляции 3 секунды, иммерсионная жидкость - глицерин)

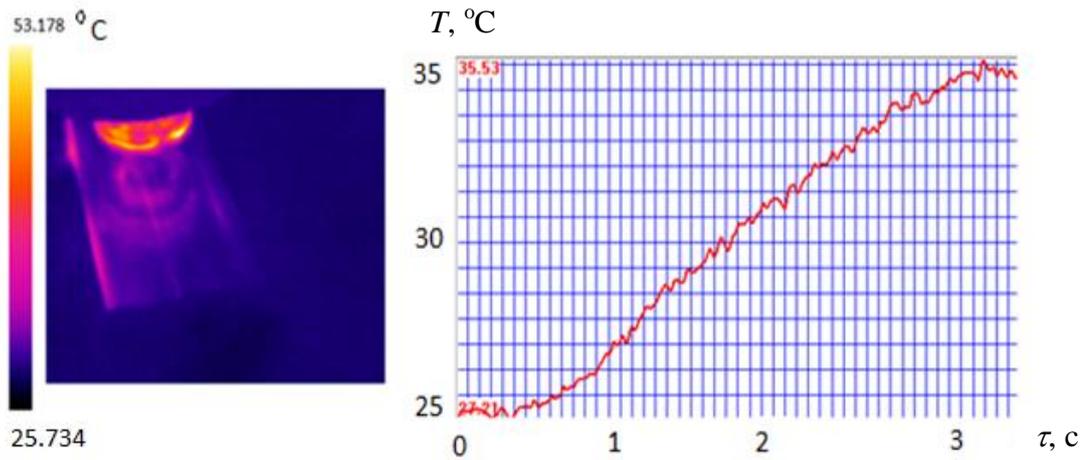


Рисунок 5.18 - Профиль температуры в зоне трещины (длительность стимуляции 3 секунды, сухой контакт)

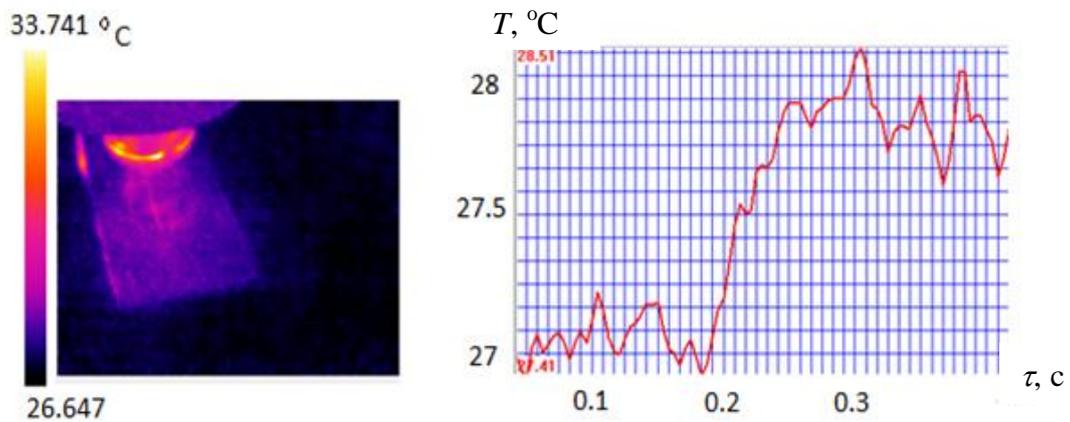


Рисунок 5.19 - Профиль температуры в зоне трещины (длительность стимуляции 0,3 секунды, иммерсионная жидкость - глицерин)

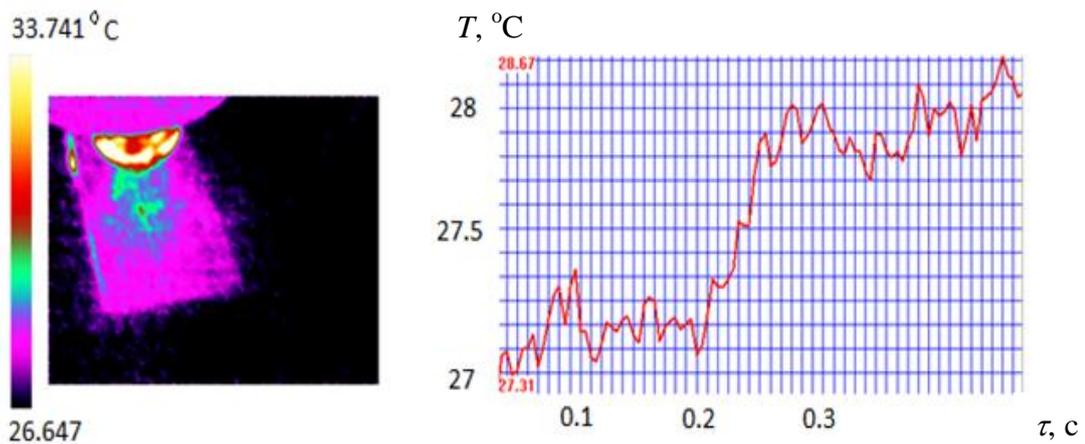


Рисунок 5.20 - Профиль температуры в зоне трещины (длительность стимуляции 0,3 секунды, сухой контакт)

5.4 Угол УЗ облучения и расстояние между точкой ввода ультразвука и точкой наблюдения

5.4.1 Взаимная ориентация точки ввода ультразвука и дефектов

Как интуитивно ожидалось, ориентация точки ввода ультразвука относительно трещин весьма существенно влияет на ΔT . Эксперимент проводили на образце из углепластика толщиной 2 мм круглой формы с искусственной боковой трещиной в виде пропила (см. рисунок 5.1.ж и таблицу 5.7). Максимальные сигналы наблюдались при угле 90° , что соответствовало перпендикулярному облучению трещины ультразвуком.

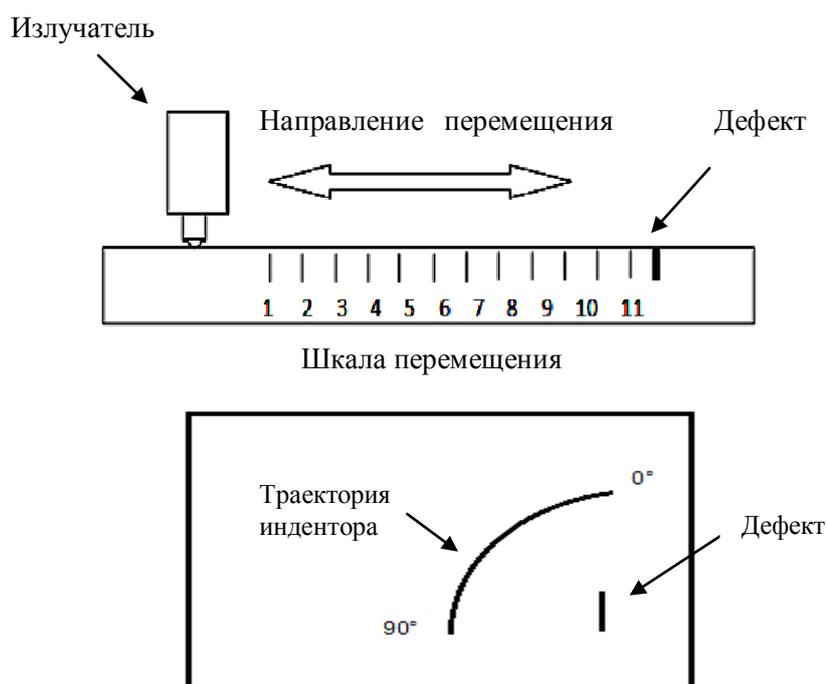


Рисунок 5.21 - Схема экспериментов по анализу влияния расстояния от точки ввода ультразвука до трещины и их взаимной ориентации на амплитуду

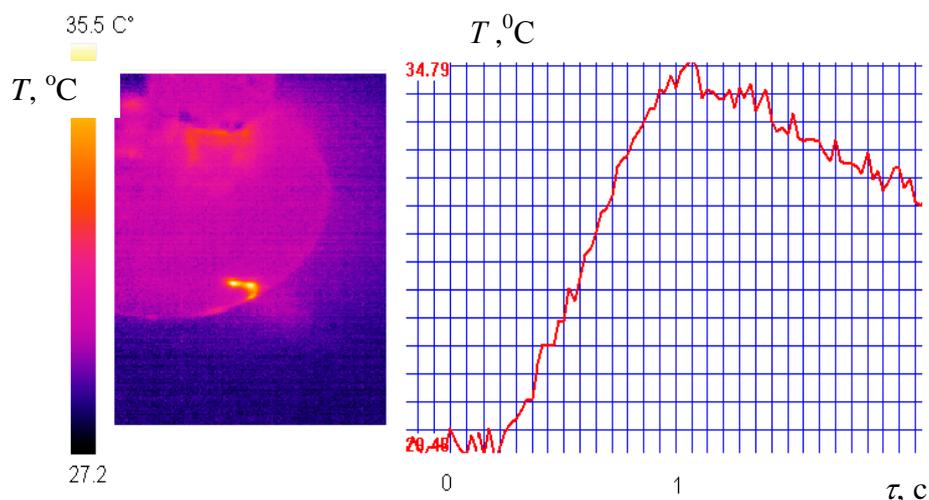


Рисунок 5.22 - УЗ стимуляция образца круглой формы толщиной 2 мм с боковой трещиной и профиль температуры во времени

Таблица 5.7 - Влияние взаимной ориентации точки ввода ультразвука и дефекта на амплитуду температурных сигналов (мощность УЗ стимуляции 1,3 кВт, длительность импульса 1 с, расстояние до точки ввода 5 см)

Угловое положение точки ввода ультразвука, угл. град	Сигнал/шум, SNR	Дифференциальный температурный сигнал ΔT , °C
0	- *	- *
20	6,3	1,9
70	31,8	6,2
90	49	7,1

* Сигнал ниже уровня шума

Дополнительные иллюстрации к влиянию взаимной ориентации и расстояния между точками ввода и наблюдения приведены на рисунках 5.23 - 5.25

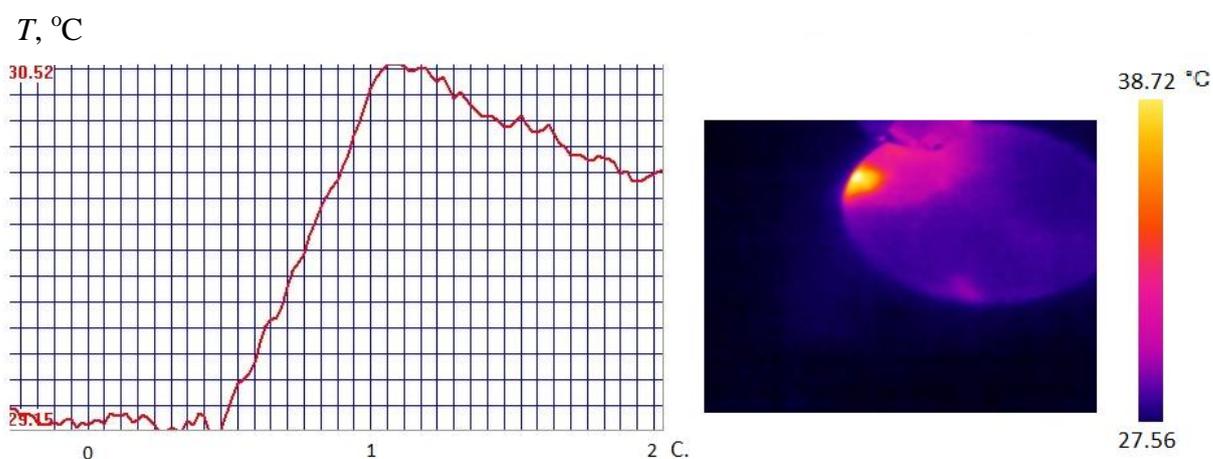


Рисунок 5.23 - Распределение температуры в дефектной точке при мощности импульсной УЗ стимуляции 1,5 кВт на расстоянии 5 см от точки ввода ультразвука под углом 20°

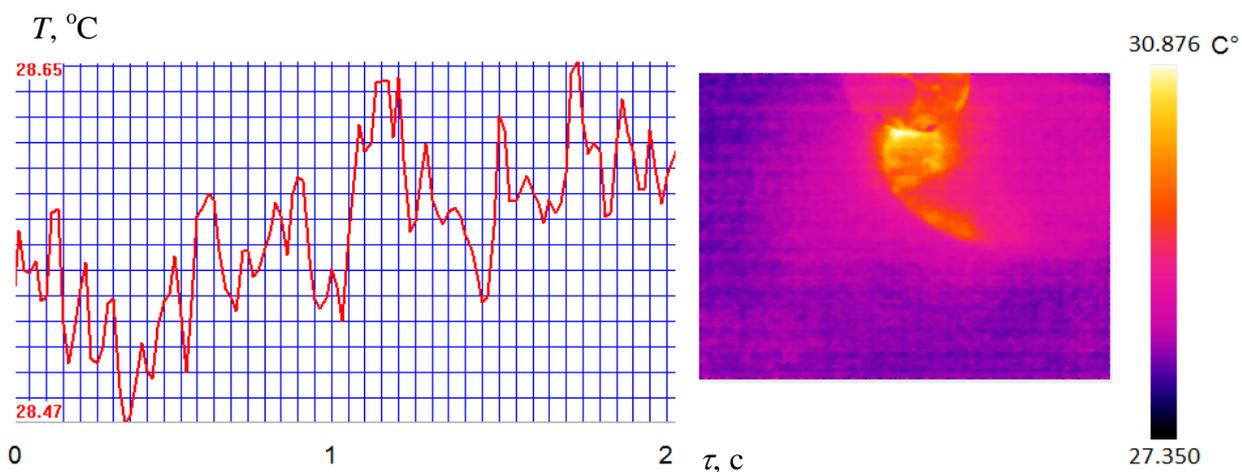


Рисунок 5.24 - Распределение температуры в дефектной точке при мощности импульсной УЗ стимуляции 1,5 кВт на расстоянии 5 см от точки ввода ультразвука под углом 0°

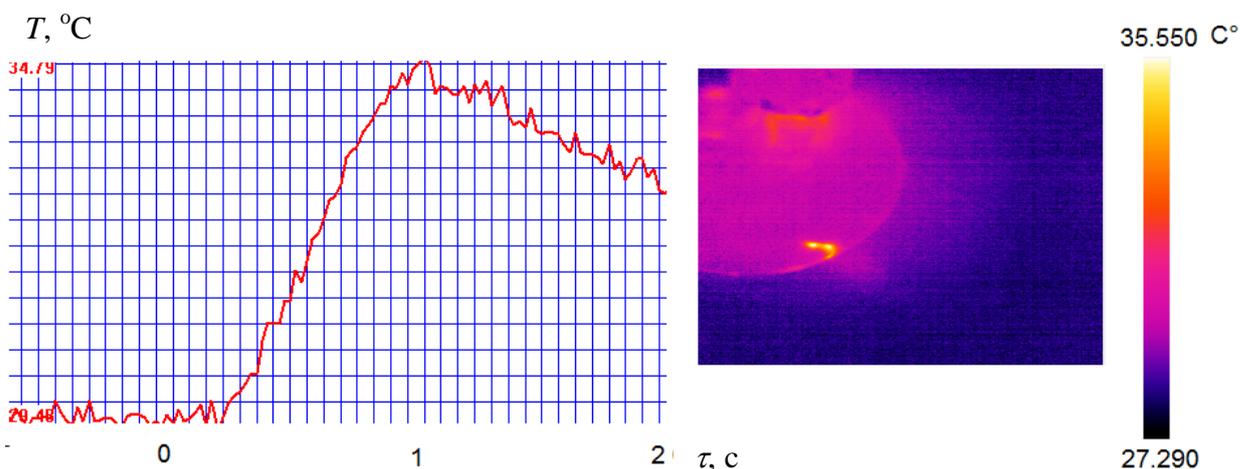


Рисунок 5.25 - Распределение температуры в дефектной точке при мощности импульсной УЗ стимуляции 1,5 кВт на расстоянии 5 см от точки ввода ультразвука под углом 70°

В результате вышеописанных исследований можно сделать вывод о существенном влиянии взаимной ориентации точки ввода ультразвука и узкого протяженного дефекта (трещины). Лучше всего обнаруживаются трещины, расположенные перпендикулярно радиальному распространению ультразвука, тогда как параллельные дефекты создают весьма слабые сигналы. Феноменологически, это легко объясняется эффектами дифракции и отражением акустических волн на стенках газонаполненных дефектов, вследствие чего «параллельные» акустические волны не вызывают трения стенок трещин. Аналогичный вывод был сделан выше в результате теоретического трехмерного анализа процесса тепловыделения в дефектах при их УЗ облучении.

Таким образом, при ТК ортотропных композитов имеется вероятность пропуска дефектов, расположенных параллельно основной УЗ волне. В анизотропных композитах такой эффект может играть меньшую роль из-за того, что дефекты (трещины) имеют преимущественное направление вдоль волокон композита, например, в случае углепластика с мононаправленными волокнами. Тем не менее, в общем случае, очевидно, что наиболее эффективен ТК с помощью последовательно перемещающейся точки ввода ультразвука, или путем одновременного ввода ультразвука в нескольких точках.

Особенности выявления двух трещин одновременно были исследованы в эксперименте, схема которого показана на рисунке 5.26, а результаты приведены в таблице 5.8 и на рисунках 5.27 - 5.29. Был использован элемент авиационной панели из углепластика толщиной 5 мм с ребрами жесткости, в который, в силу значительного количества повернутых друг относительно друга слоев композита, было возможно ввести два перпендикулярно расположенных дефекта (ударных повреждения).

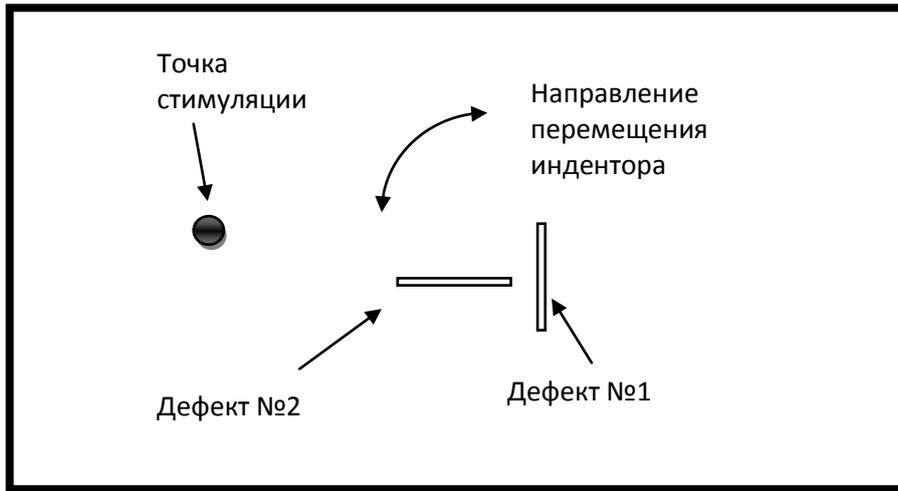


Рисунок 5.26 - Схема эксперимента по выявлению двух перпендикулярно расположенных дефектов в углепластике

Таблица 5.8 - Результаты эксперимента по выявлению двух перпендикулярно расположенных дефектов в углепластике

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

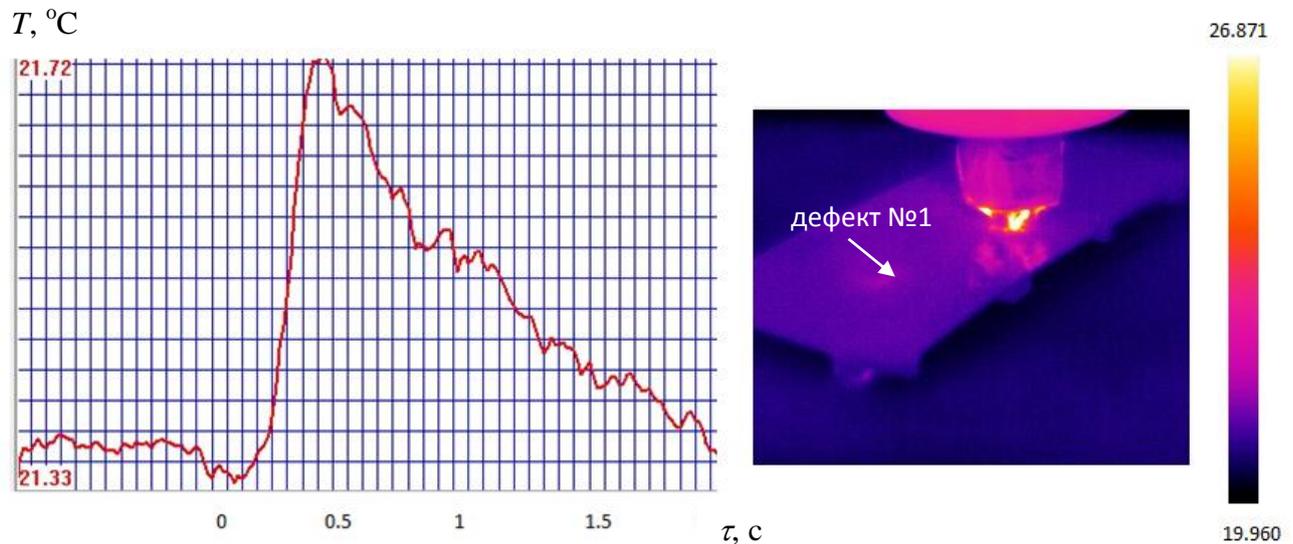


Рисунок 5.27 - Термограмма экспериментального образца из углепластика и график изменения температуры (угол ввода ультразвука 0°)

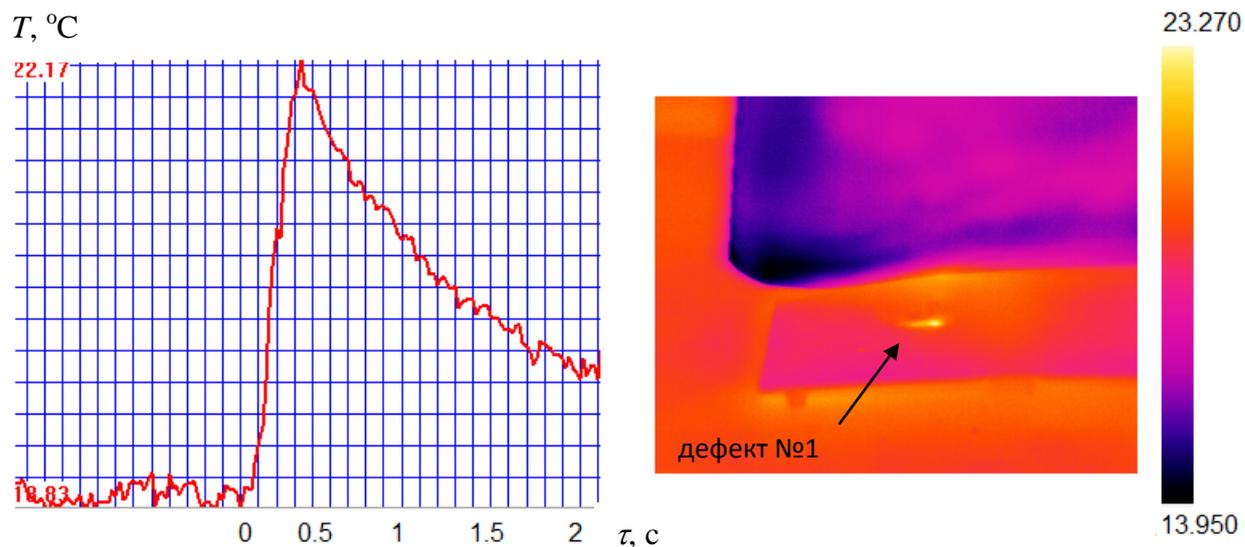


Рисунок 5.28 - Термограмма экспериментального образца из углепластика и график изменения температуры (угол ввода ультразвука 45°)

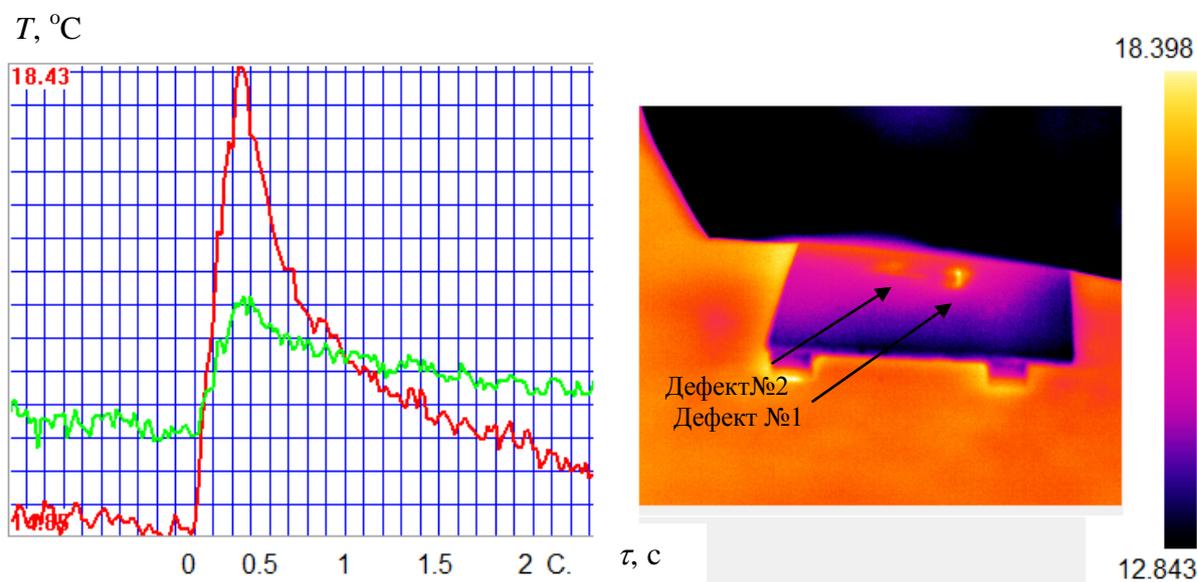


Рисунок 5.29 - Термограмма экспериментального образца из углепластика и график изменения температуры (угол ввода ультразвука 90°)

Термограммы рисунков 5.27 - 5.29 наглядно иллюстрируют приведенное выше положение о связи амплитуды регистрируемых температурных сигналов и взаимной ориентации точки ввода ультразвука и трещин.

Анализируя вышесказанное можно сделать вывод, что для наиболее достоверного обнаружения дефектов в композиционных материалах, необходимо выполнять стимуляцию объекта контроля с помощью двух и более источников акустической энергии одновременно.

Следует заметить, что в процессе выполнения экспериментов в местах конструктивного соединения материалов (ребра жесткости) в момент стимуляции наблюдались зоны с повышенной температурой. Таким образом, метод УЗ

вибротермографии может применяться для контроля качества механических соединений деталей и изделий из композиционного материала.

5.4.2 Расстояние от точки ввода ультразвука до дефектов

Исследования проведены на сотовой панели и изделии из углепластика, (возбуждение ультразвуком 22 кГц, электрическая мощность 50 - 300 Вт). Результаты приведены ниже на рисунках 5.30 - 5.33 и в таблице 5.9.

Исследовали зависимость амплитуды температурного сигнала от расстояния между источником УЗ стимуляции и дефектной структурой.

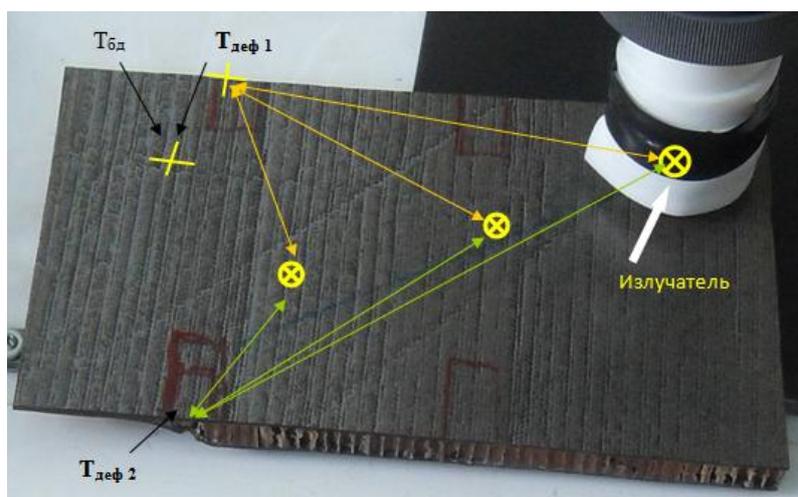


Рисунок 5.30 - Схема эксперимента по анализу влияния расстояния между точками стимуляции и дефектом в сотовой панели (стрелками показаны места регистрации температуры $T_{\text{деф1}}$, $T_{\text{деф2}}$ и $T_{\text{бд}}$; точки ввода УЗ излучения в панель показаны символом \otimes)

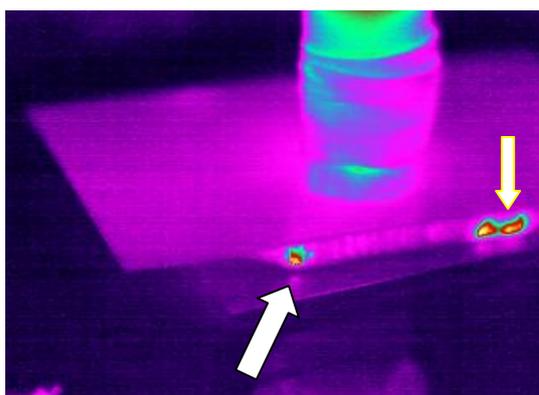


Рисунок 5.31 - Термограмма сотовой панели, нагреваемой ультразвуком мощностью 50 Вт в точке нагрева $\otimes 1$

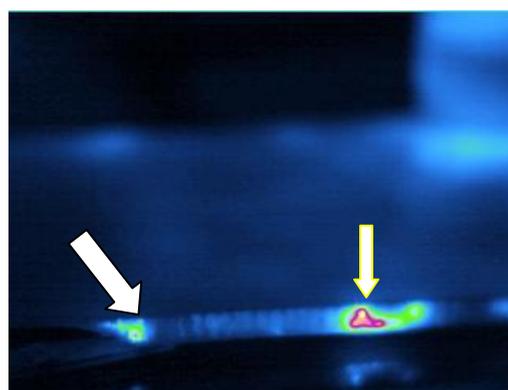


Рисунок 5.32 - Термограмма сотовой панели, нагреваемой ультразвуком мощностью 300 Вт в точке нагрева $\otimes 3$

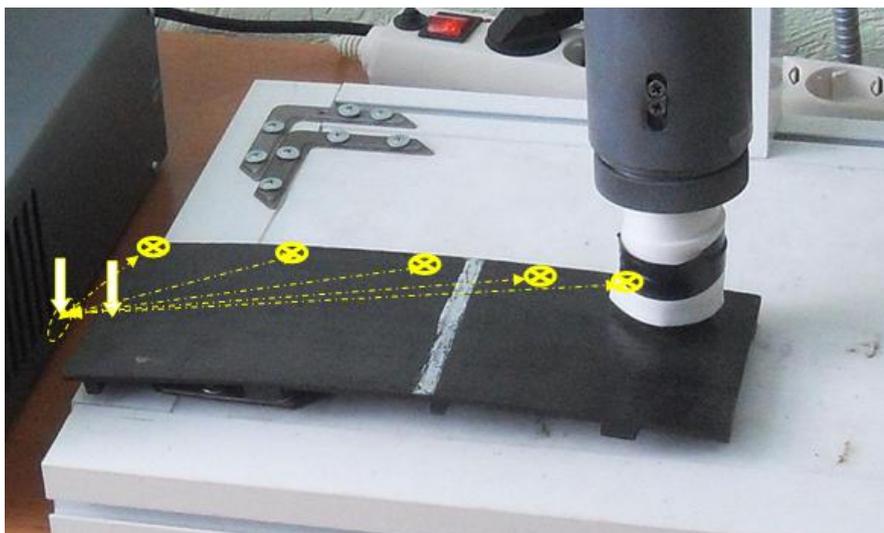


Рисунок 5.33 - Схема эксперимента по анализу влияния расстояния между точками стимуляции и дефектом при контроле углепластиковой панели (стрелками показаны места регистрации температуры $T_{\text{деф}}$ и $T_{\delta d}$; точки ввода УЗ излучения в панель показаны символом \otimes)

Таблица 5.9 - Оценка температурных сигналов в зависимости от мощности и расположения точки УЗ стимуляции (сотовая панель)

Мощность излучателя, Вт	Расстояние от излучателя до дефекта L , мм	$T_{\text{деф } 1}$, °C	$T_{\delta d}$, °C	ΔT_1 , °C
Дефект №1				
50	80	28,54	27,6	0,94
	95	28,59	27,64	0,95
	140	27,83	27,28	0,18
300	80	33,58	29,57	4,01
	95	30,06	28,98	1,08
	140	28,9	27,91	0,99
Дефект №2				
50	70	40,51	27,6	12,91
	120	44,87	27,64	17,23
	170	37,65	27,28	10,37
300	70	55,96	29,57	26,39
	120	53,0	28,98	24,02
	170	47,05	27,91	17,14

Следующий эксперимент был проведен на авиационной панели из углепластика показанной на рисунке 5.33. Результаты УЗ ИК термографического контроля данной панели приведены в таблице 5.10 и на рисунке 5.34. Видно, что амплитуда температурного сигнала спадает приблизительно по обратному квадратическому закону с увеличением расстояния между точкой ввода УЗ колебаний и дефектом

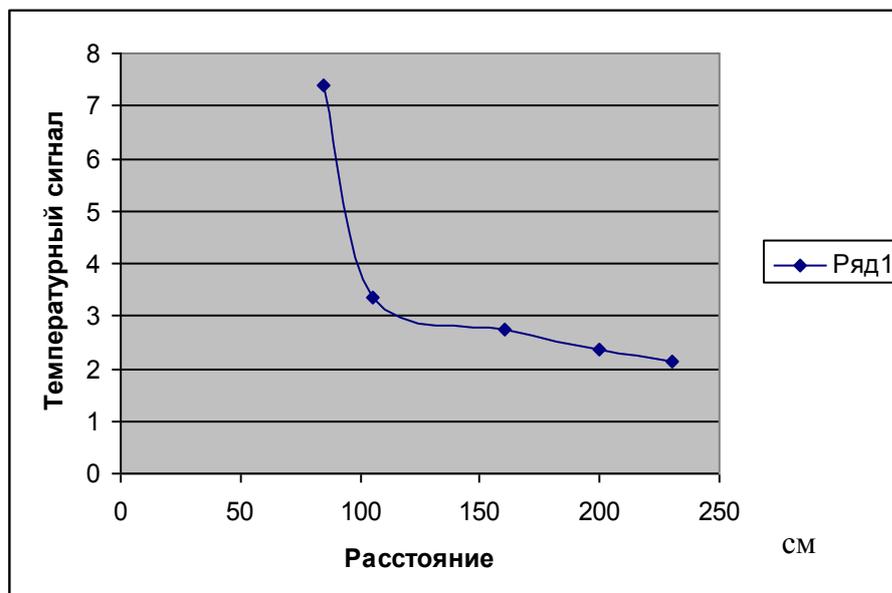
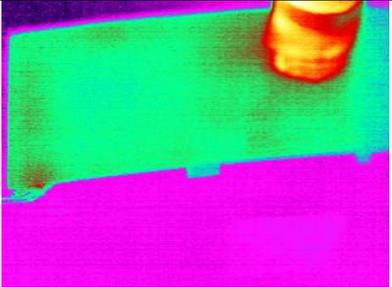
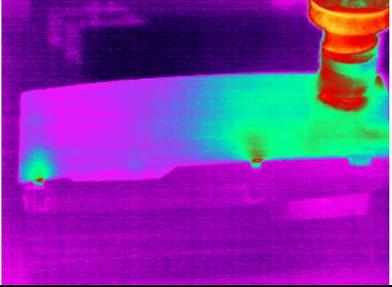


Рисунок 5.34. Зависимость амплитуды температурного сигнала над дефектом в углепластиковой панели от расстояния от точки ввода ультразвука

Таблица 5.10 - Оценка температурных сигналов в зависимости от мощности и расположения точки УЗ стимуляции (углепластиковая панель)

№ п/п	Расстояние от излучателя до дефекта L , мм	$T_{\text{деф } 1}$, °C	$T_{\text{бд}}$, °C	ΔT_1 , °C	Термограммы
1	85	39,69	32,31	7,38	
2	105	33,47	30,13	3,34	
3	160	33,55	30,82	2,73	

4	200	32,41	30,06	2,35	
5	230	32,19	30,04	2,15	

5.4.3 Производительность УЗ ИК термографического контроля

Факт обратной квадратической зависимости амплитуды температурных сигналов от расстояния, что характерно для случая точечной стимуляции, позволяет предположить, что площадь одновременного контроля, а, следовательно, и производительность испытаний, пропорциональна квадрату мощности УЗ излучения. С другой стороны, мощность вводимой акустической энергии пропорциональна квадрату амплитуды колебаний магнитостриктора. Ее увеличение может привести к появлению дополнительных дефектов и разрушению объекта контроля в точке ввода ультразвука. Фактически, во многих выполненных экспериментах увеличение электрической мощности на магнитострикторе приводило к появлению характерной отметки в зоне удара контролируемого материала шариком индентора. Степень опасности такого ударного воздействия, а также строгое обоснование достижимой производительности неразрушающего контроля в каждом конкретном случае не входило в задачи данного исследования. На примере испытаний углепластиковых панелей установлено, что максимальное расстояние от точки ввода ультразвука до зоны уверенного обнаружения дефектов составило около 0,3 м при слабых видимых нарушениях структуры материала в зоне ввода ультразвука. Производительность УЗ ИК термографического контроля характеризуется площадью однократного контроля около 0,1 м² при длительности испытаний до 10 с. Следовательно, максимальная ожидаемая производительность испытаний составляет около 0,01 м²/с, или 36 м²/час без учета времени подготовки и переоснастки оборудования, а также обработки данных.

5.5 Стоячие УЗ волны

В данном эксперименте исследованы стоячие волны в образцах правильной формы. Теоретически ожидалось появление чередований теплых и холодных участков на поверхности объекта контроля, что можно объяснить появлением стоячих волн в изделиях правильной формы [92-96].

По определению, стоячие волны возникают в распределённых колебательных системах, представляя собой чередующиеся максимумы (пучности) и минимумы (узлы) амплитуды механических волн. Практически такие волны возникают при отражениях от преград и неоднородностей, в результате наложения отражённых волн на падающие. При этом важное значение имеет частота, фаза и коэффициент затухания волны в месте отражения. В случае гармонических колебаний в одномерной среде стоячая волна описывается следующей формулой:

$$U = U_0 \cos(kx) \cos(\omega\tau - \phi), \quad (5.4)$$

где U - возмущения в точке x в момент времени τ ;

U_0 - амплитуда стоячей волны;

ω - частота;

k - волновой вектор;

ϕ - фаза.

Если в среде возникает стоячая волна, то в некоторых точках амплитуда колебаний равна нулю. Такие точки называются узлами стоячей волны, в то время как точки с максимальной амплитудой колебаний называются пучностями. В узлах стоячей волны не происходит переноса энергии [97]. Опираясь на вышесказанное, можно предположить, что при УЗ ИК термографическом контроле в некоторых образцах (преимущественно, правильной формы) будет наблюдаться чередование теплых и холодных участков. Следовательно, в принципе возможно наложение друг на друга холодного участка и дефекта. Данный эффект является частотно-зависимым, носит непостоянный характер и проявляется не на каждом экспериментальном образце. В наших экспериментальных исследованиях, стоячие волны наблюдались, например, на углепластиковом образце прямоугольной формы рисунок 5.34.

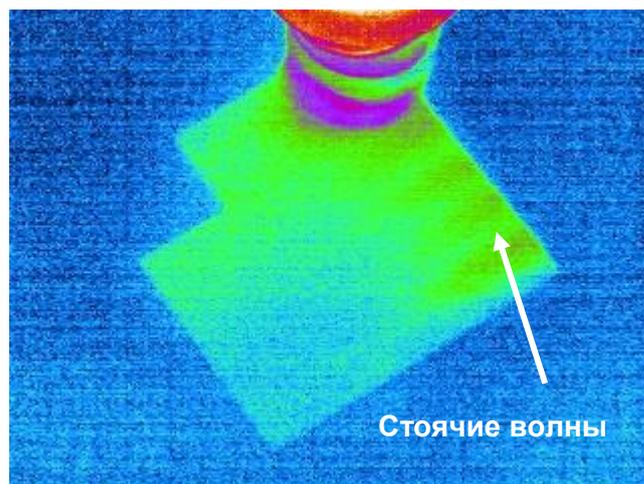
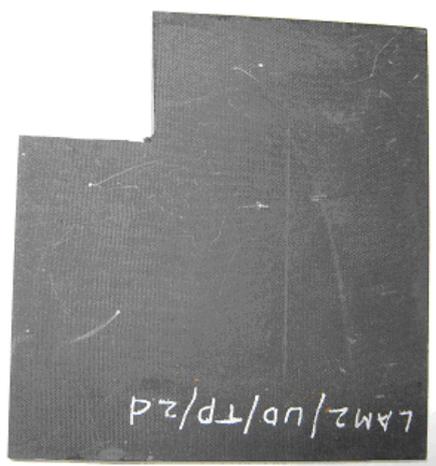


Рисунок 5.34 - К образованию стоячих волн в образце из углепластика толщиной 3 мм (экспериментальный образец)

Интересно отметить, что стоячие волны в данном образце подавлялись при внесении в образец ударных повреждений, по-видимому, вследствие изменения геометрии распространения УЗ волн. В последнем варианте УЗ прибора для УЗ стимуляции ИЛ10 - 2.5М предусмотрено изменения частоты колебаний индентора на уровне $22 \pm 0,15$ кГц. За счет включения режима девиации индентор начинает работать в режиме качающейся частоты (изменение частоты колебания индентора в процессе стимуляции); таким образом, подавляется эффект образования стоячих волн.

5.6 Экспериментальные иллюстрации применения УЗ ИК термографии к неразрушающему контролю полимерных композиционных материалов, используемых в авиакосмической промышленности

5.6.1 Цилиндрические образцы из углепластика

Углепластиковые композиты в расширяющемся масштабе начинают использоваться для производства труб, используемых в ядерной энергетике. В Томском политехническом университете совместно с ООО «ННКЦ» (г. Новоуральск) предложена технология «классического» ТК таких труб с использованием оптического нагрева. В рамках настоящих диссертационных исследований исследованы возможности УЗ стимуляции расслоений в таких изделиях. УЗ излучение с частотой 22 кГц и электрической мощностью 200 Вт вводили непрерывно в течение 10 секунд в одну из точек образующей цилиндрического образца с толщиной стенки 5 мм (рисунок 5.35).

При данном расположении точки ввода ультразвука отчетливо выявлялся дефект, как на исходной термограмме, так и после обработки (рисунок 5.36). Тем не менее, исследование ограничили одним экспериментом из-за опасения разрушения образца;

кроме того, по-видимому, необходима специальная оснастка для предотвращения проскальзывания образца в процессе стимуляции.



Рисунок 5.35 - УЗ стимуляция цилиндрического изделия из углепластика

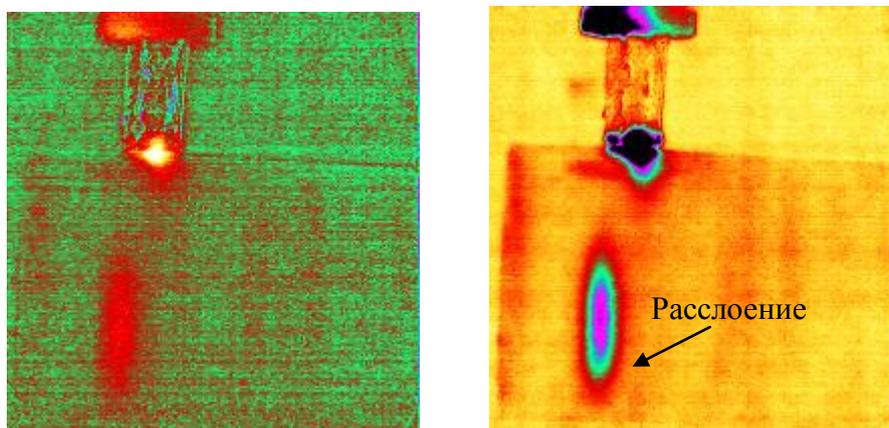
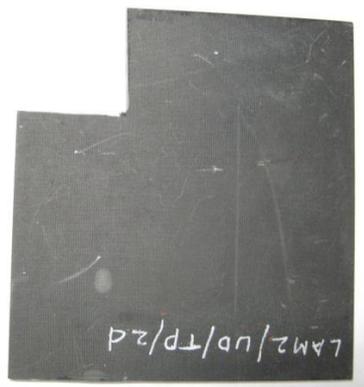


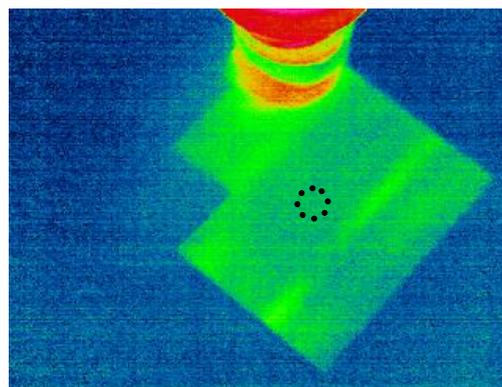
Рисунок 5.36 - УЗ ИК термографический контроль углепластикового цилиндра (точка ввода ультразвука 200 Вт в течение 10 с над дефектом, находящимся на глубине 1 мм); слева - исходная термограмма, амплитуда аномалии около 1°C, справа - изображение главной компоненты

5.6.2 Ударные повреждения в углепластике

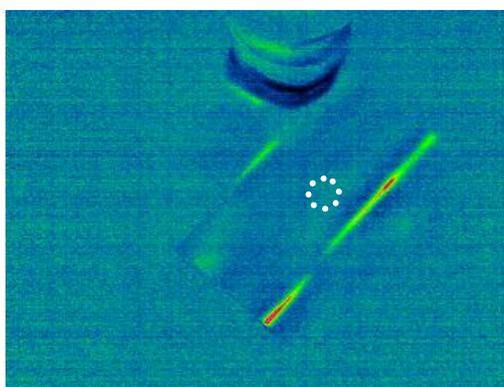
Мононаправленный углепластиковый композит толщиной 5 мм был поврежден ударным способом с помощью стального шарика с энергией удара 6 Дж. При этом точка удара слабо видна на поверхности композита, а видимые следы трещин отсутствуют (на рисунке 5.37а стрелкой показано местом удара). При УЗ стимуляции с энергией 250 Вт на ИК термограмме появляется отчетливое изображение двух трещин, распространяющихся в обе стороны от точки повреждения, причем в самой точке повреждения, по-видимому, структурные нарушения композита отсутствуют (рисунок 5.37б).



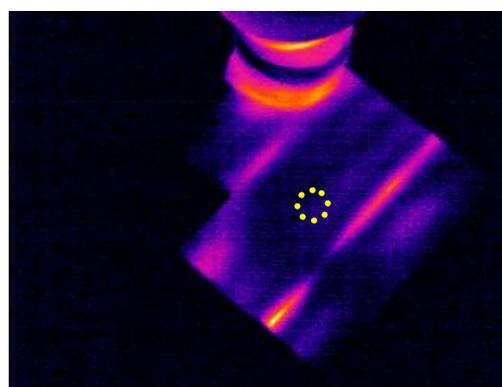
а) фото образца из углепластика размером 100x100x5 мм



б) термограмма образца под воздействием УЗ стимуляции



в) 3-я компонента (после обработки методом главных компонент; место удара отмечено кружком)



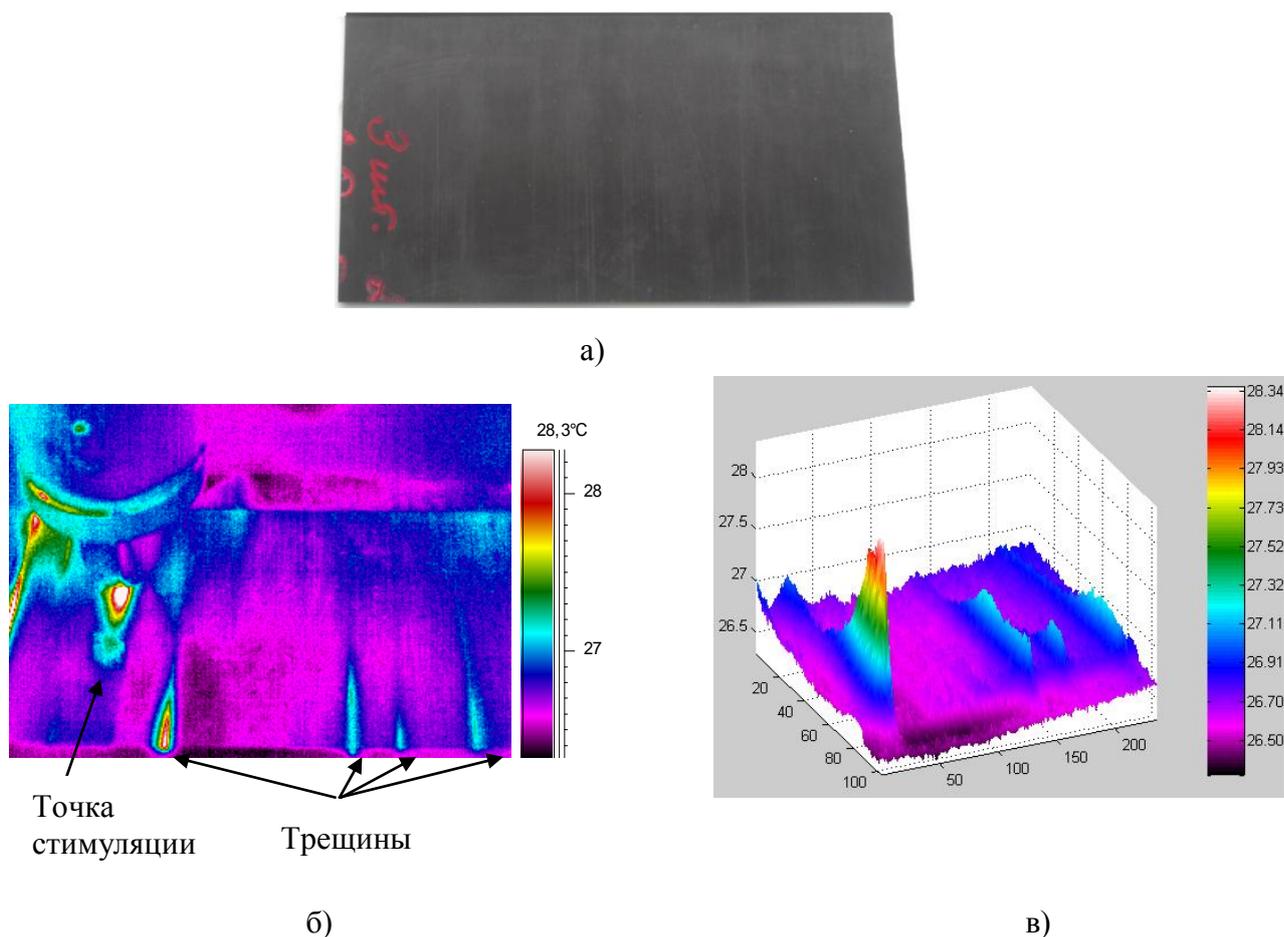
г) изображение магнитуды после комплексного вейвлет-преобразования с использованием материнской функции Морле

Рисунок 5.37 - Контроль образца из углепластика толщиной 5 мм после ударного воздействия

Обработка последовательности ИК термограмм, записанных в течение 10 секунд с частотой 10 Гц, с помощью метода анализа главных компонент и вейвлет-преобразования позволила подчеркнуть изображения трещин рисунки 5.37в и 5.37г (использована компьютерная программа ThermoFit Pro).

Другой образец из углепластика размером 220x110x2 мм (рисунок 5.38а) также был поврежден ударным воздействием с энергией 6 Дж, что привело к образованию четырех трещин длиной до нескольких сантиметров, распространявшихся параллельно друг другу в направлении преимущественной укладки волокон композита. Ввод ультразвука осуществляли в течение 10 с, причем вначале отмечался нагрев головки магнитостриктора и зоны ввода ультразвука, после чего проявлялись трещины с амплитудой температурного сигнала до 2-3°C (рисунок 5.37.б и 5.37.в). Кроме того, типичным для экспериментов

подобного рода было появление теплых зон в бездефектных участках, что обусловлено структурной неоднородностью углепластика. Особенно отчетливо этот эффект проявлялся на краях изделия, где, по-видимому, имело место микрорастрескивание композита (рисунок 5.38).

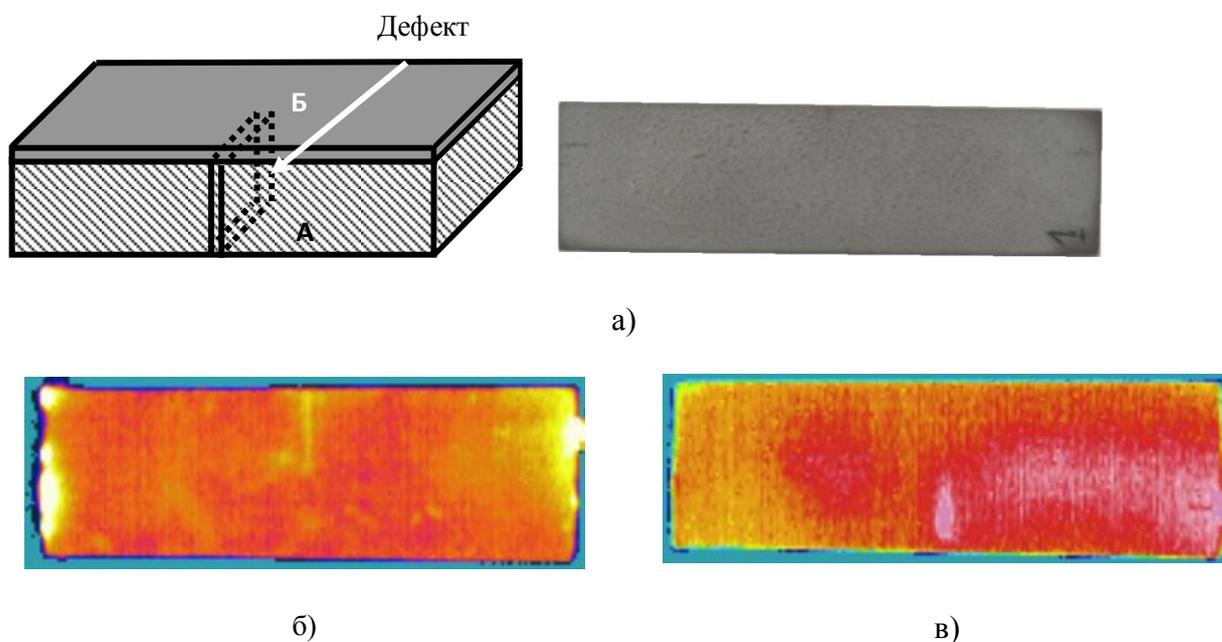


а) фотография образца, б) ИК термограмма образца (слева – магнитострикционная головка), в) ИК термограмма дефектов в 3D представлении
Рисунок 5.38 - Обнаружение трещин ударного повреждения в углепластиковом композите

5.6.3 Теплозащитные покрытия

Образец размером 100x30x12 мм (см. рисунок 5.39) был выполнен из жаропрочного никелевого сплава с теплозащитным покрытием на поверхности **А** толщиной около 0,2 мм и в качестве имитатора усталостной трещины содержал пропилен толщиной 0,15 мм. Дефект распространялся под покрытием на длину 15 мм, выходя на противоположную поверхность **Б** (рисунок 5.39б). Ультразвук вводили в торец образца на расстоянии 50 мм от дефекта, термограммы записывали как в цифровой, так и в видео форме. Заметим, что видеосъемка не сохраняет отсчеты абсолютных температур, но обеспечивает более оперативный предварительный анализ в режиме стоп-кадра, что

позволяет оптимизировать режим цифровой записи. Вид теплового поля в зоне трещины на поверхностях **А** и **Б** (рисунок 5.39а и 5.39б) был существенно различным. На поверхности **Б** отчетливо проявлялась геометрия трещины вследствие действия эффекта полости абсолютно черного тела (АЧТ), что приводило к росту коэффициента излучения трещины (рисунок 5.39б), в то время как на поверхности теплозащитного покрытия в течение нескольких секунд отмечалась размытая зона повышенной температуры амплитудой до 1-2°С (рисунок 5.39в). Таким образом, генерация тепла в зоне дефекта с достаточно большим раскрытием происходила не в результате трения стенок, а вследствие термомеханического эффекта, возникающего в слое теплозащитного покрытия над дефектом. При этом на поверхности **Б** покрытие, которое имело повышенную температуру, «просвечивало» сквозь трещину, играющую роль АЧТ.



а) схема дефекта и фотография образца; б) ИК термограмма поверхности А;
в) ИК термограмма поверхности Б

Рисунок 5.39 - Обнаружение усталостных трещин в стандартном образце из жаропрочного никелевого сплава:

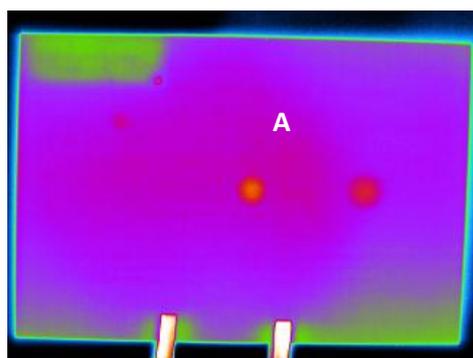
5.6.4 Сравнение оптической и УЗ стимуляции

Импульсный оптический нагрев является наиболее распространенным видом стимуляции композиционных материалов в ТК. Проблемами этой процедуры являются: 1) неравномерность нагрева; 2) низкий контраст температуры вследствие того, что

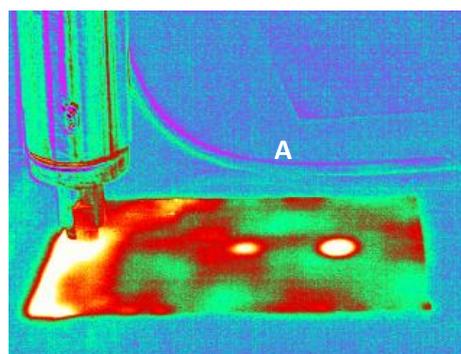
нагреваются как дефектные, так и бездефектные зоны; 3) низкая выявляемость глубинных дефектов, поскольку при этом требуется увеличивать поглощенную энергию, что влечет опасность перегрева изделия в конце действия теплового импульса. Основное отличие УЗ стимуляции от оптической состоит в том, что ультразвук существенно повышает температуру только в зоне дефектов с «трущимися» краями, оставляя бездефектные зоны «холодными», поэтому используемое в теории ТК понятие текущего контраста $\Delta T/T$ становится, по-видимому, неправомерным, поскольку избыточная температура T изделия в процессе контроля близка к нулевой. На данном этапе исследования выполнено сравнение двух типов тепловой стимуляции композиционных материалов типа угле-, стекло- и органопластика. Оптический нагрев осуществляли кольцевой импульсной лампой (энергия 3 кДж, длительность импульса 1 мс). Непрерывную УЗ стимуляцию производили с помощью вышеописанного дефектоскопа. Тепловые поля регистрировали с помощью компьютерной термографической системы ThermaCAM P65 HS (см. рисунки 5.40 и 5.41).



Рисунок 5.40 - Стандартный образец из углепластика



а)



б)

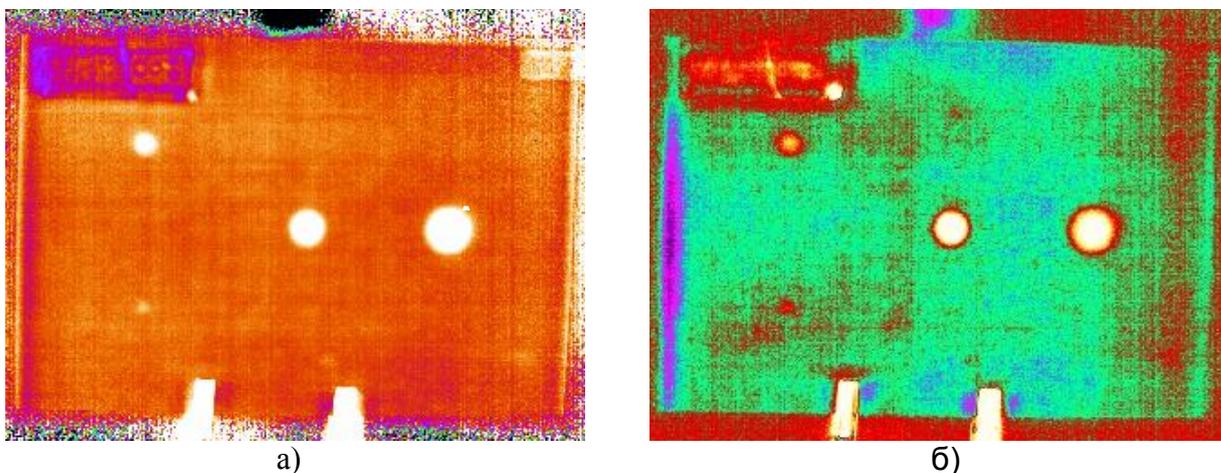
- а) оптическая стимуляция углепластика (максимальный сигнал над дефектом А 1,16°С, средняя избыточная температура изделия 2,2°С, отношение сигнал/шум 18,6, температурный контраст 53%); б) УЗ стимуляция углепластика (максимальный сигнал над дефектом А 2,1°С, средняя избыточная температура изделия 0,6°С, отношение сигнал/шум 32,0, температурный контраст 580%)

Рисунок 5.41 - Сравнение оптической и УЗ стимуляции стандартного образца из углепластика толщиной 1 мм (расслоения имитированы 4-мя фторопластовыми вставками)

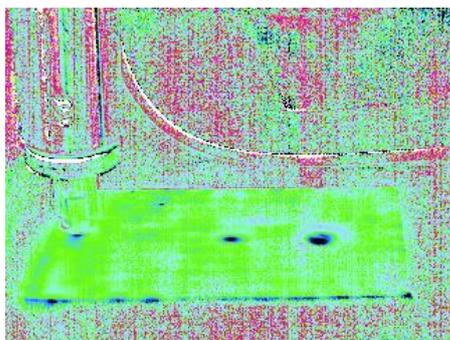
В стандартном образце из углепластика (рисунок 5.40) оптическая стимуляция обеспечивает выявление 3-х дефектов из 4-х при анализе исходных изображений рисунок 5.41а и всех 4-х дефектов после Фурье-анализа или применения метода анализа главных компонент (см. рисунок 5.42). В то же время УЗ стимуляция обеспечивает большее отношение сигнал/шум для дефекта А и в целом создает более сложное для идентификации тепловое поле, что может быть вызвано наличием незапланированных дефектов, не обнаруживаемых при оптическом нагреве рисунок 5.41б и рисунок 5.43.

Результатом исследований явился вывод о том, что преимущества и недостатки каждого вида ТК не являются очевидными. УЗ стимуляция является предпочтительной при выявлении трещин, в частности, расположенных перпендикулярно к контролируемой поверхности. Важным преимуществом УЗ стимуляции является возможность выявления тонких поверхностных трещин в изделиях сложной формы.

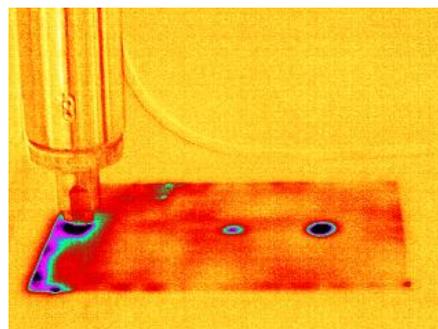
Пример ТК цилиндрического изделия из органопластика[98-100] с трещиной показан на рисунке 5.44. Видно, что в случае оптического нагрева трещина не видна, а само температурное поле изделия неоднородно, что обусловлено неравномерным нагревом. УЗ стимуляция позволяет надежно выявить трещину при отсутствии заметного влияния геометрии изделия на результаты контроля.



а - изображение фазы Фурье (отношение сигнал/шум $S=33$);
б - изображение статистических главных компонент (отношение сигнал/шум $S=24,6$)
Рисунок 5.42 - Эффективность методов обработки ИК термограмм при оптической стимуляции изделий:



а)



б)

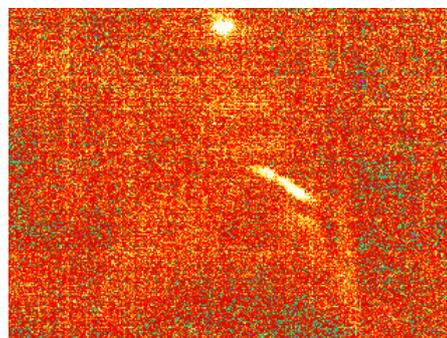
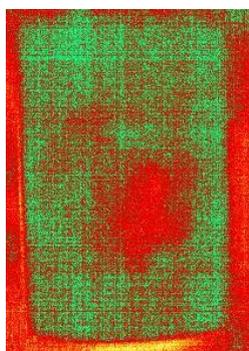
а - изображение фазы Фурье (отношение сигнал/шум $S=11,8$);
 б - изображение статистических главных компонент; (отношение сигнал/шум $S=31,7$)
 Рисунок 5.43 - Эффективность методов обработки ИК термограмм при УЗ стимуляции изделий:

В то же время оптический нагрев может оказаться предпочтительным для обнаружения расслоений, параллельных основным плоскостям объекта контроля, а также для экспрессного определения ТФХ.

Выполненные исследования являются предварительными и иллюстрируют концепцию УЗ ИК термографии. Дальнейшее исследования будут направлены на разработку метода модулированных УЗ волн и импульсного УЗ возбуждения.



а)



б)

а - образец и «оптимальная» ИК термограмма при оптическом нагреве,
 б - ИК термограмма при УЗ стимуляции (отчетливо видна трещина)

Рисунок 5.44 - ТК цилиндрического изделия из органопластика

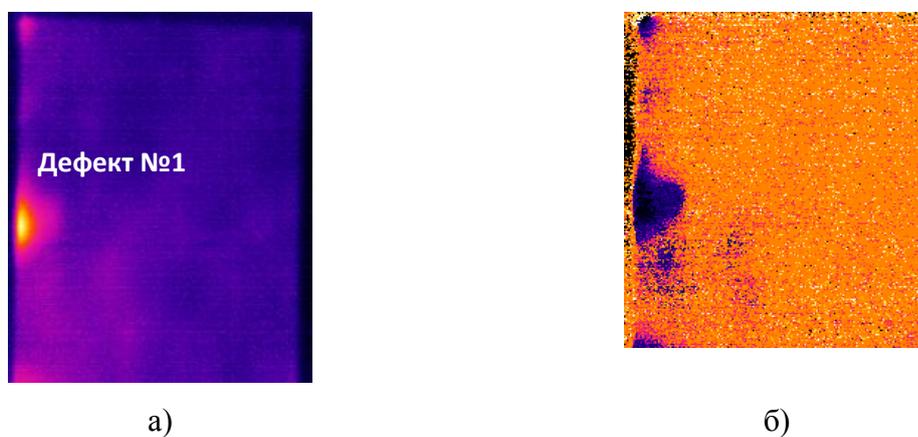
5.6.5 Сотовые структуры

Стандартный образец сотовой панели новейшего российского самолета SuperJet 100 был передан исполнителю ГосНИИ гражданской авиации (ГосНИИ ГА). Панель состояла из углепластиковой обшивки толщиной 0,5 мм и бумажных сот (бумага типа

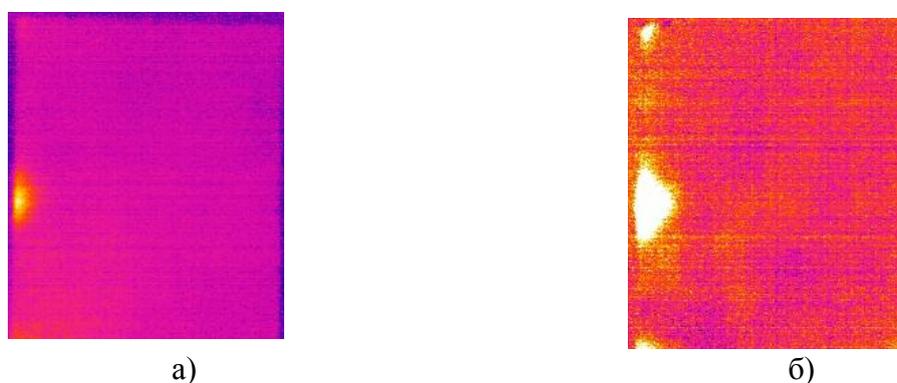
Notex). Четыре искусственных дефекта представляли собой боковые отслоения сот от обшивки.

Прежде всего, к изделию был применен классический активный ТК, используя нагрев с помощью воздушной пушки. Результаты оказались неудовлетворительны, поскольку зоны отслоения бумажных сот ведут себя подобно самим сотам, которые слаботеплопроводны по сравнению с углепластиком.

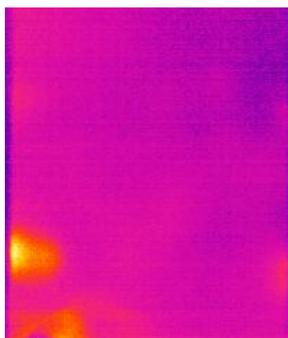
Результаты УЗ ИК термографического контроля оказались многообещающими. При возбуждении ультразвуком частотой 22 кГц (200 Вт электрической мощности) по невыясненным причинам зона смятых сот генерирует значительную тепловую энергию, повышая температуру до +60°C. Все четыре дефекта уверенно обнаруживаются, в особенности, после компьютерной обработки [98]. Результаты приведены на рисунках 5.45 -5.48.



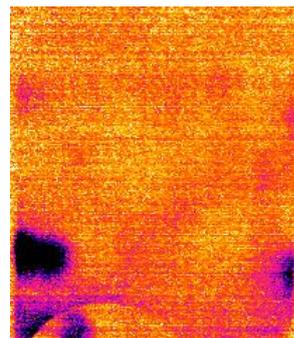
а - оптимальная исходная термограмма; б - результат компьютерной обработки (тепловая томограмма)
Рисунок 5.45 - УЗ ИК термографический контроль отслоений в сотах (Дефект №1)



а - оптимальная исходная термограмма;
б - результат компьютерной обработки (главная статистическая компонента)
Рисунок 5.46 - УЗ ИК термографический контроль отслоений в сотах (Дефект №2)



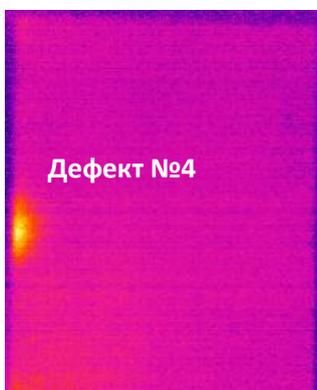
а)



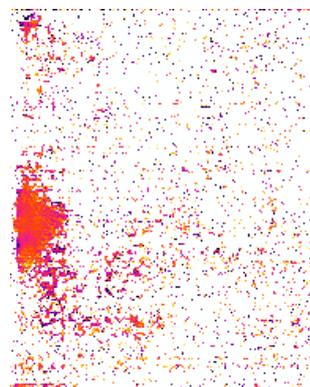
б)

а - оптимальная исходная термограмма; б - результат компьютерной обработки (главная статистическая компонента)

Рисунок 5.47 - УЗ ИК термографический контроль отслоений в сотах (Дефект №3)



а)



б)

а - оптимальная исходная термограмма; б - результат компьютерной обработки (фазограмма)

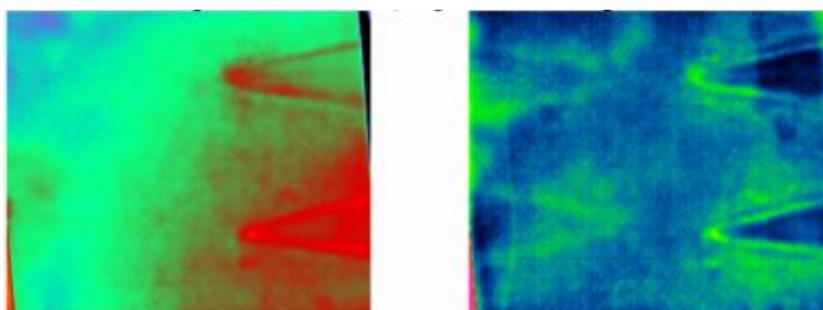
Рисунок 5.48 - УЗ ИК термографический контроль отслоений в сотах (Дефект №4)

В целом, следует констатировать, что применение УЗ стимуляции сотовых изделий при ТК является перспективным, однако, ее особенности требуют дальнейшего изучения; например, во многих случаях, где интуитивно ожидалось возникновение температурных сигналов, такие сигналы не регистрировались. Динамический отклик объектов контроля зависит от энергии возбуждения, наличия надежного контакта между УЗ стимулятором и изделием, способа закрепления объектов контроля, в особенности, тонких изделий, и свойств материала. Частота УЗ стимуляции должна быть близкой к собственным частотам изделия с целью повысить эффективность генерации тепла, а для предотвращения образования стоячих волн рекомендуется использовать «качающиеся» частоты УЗ колебаний.

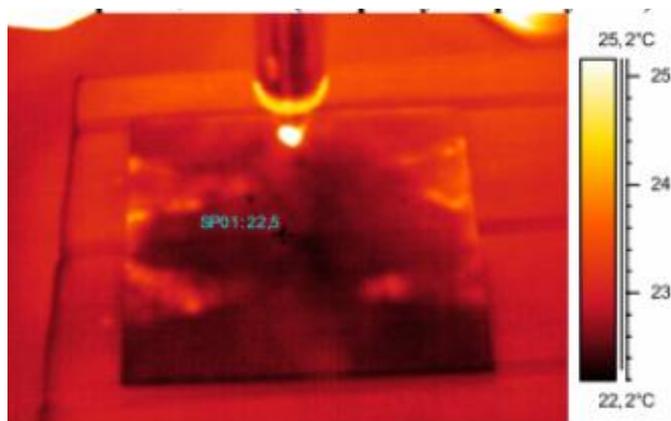
Следующий стандартный образец сотовой панели, используемой в самолете SuperJet 100, содержал 4 краевых расслоения, введенных путем внедрения тонких стальных лезвий, что является стандартной процедурой внесения искусственных дефектов в многослойные и композиционные изделия.

При «классическом» оптическом нагреве в оптимальной ИК термограмме выявлялись 2 краевых дефекта, расположенных в первом слое, то есть непосредственно под обшивкой (рисунок 5.49а слева). Метод анализа главных компонент позволил выявить два слабых отпечатка более глубоких дефектов (рисунок 5.49а справа).

При УЗ стимуляции все четыре дефекта выявлялись наряду с рядом других естественных дефектов (рисунок 5.49б). Данные эксперименты подтвердили, что метод УЗ ИК термографии предпочтительно выявляет расслоения с малым раскрытием, нежели «раскрытые» дефекты, в которых отсутствует трение стенок трещин друг с другом.



а)



б)

а - оптическая стимуляция; б - УЗ стимуляция

Рисунок 5.49 - ТК сотовой панели самолета SuperJet 100 с четырьмя искусственными расслоениями

5.7 Выводы к пятой главе

- В пятой главе описаны результаты экспериментальных исследований, направленных, главным образом, на определение особенностей взаимодействия акустической энергии УЗ диапазона, вводимой с помощью мощного магнитострикционного излучателя в анизотропные композиционные материалы,
- Экспериментальные исследования выполнены с использованием импульсной, периодической и непрерывной УЗ стимуляции. Установлено, что амплитуда температурных сигналов в дефектных зонах пропорциональна поглощенной акустической энергии (электрической мощности на магнитострикторе) и не зависит от характера изменения акустических сигналов во времени. Предпочтительность мощных коротких импульсов по сравнению с маломощной, но длительной стимуляцией, не установлена, по-видимому, вследствие сравнительно низкой интенсивности тепловой диффузии в композиционных материалах, например, по сравнению с металлами.
- Согласно предсказаниям термомеханической теории внутреннего трения максимальные температурные сигналы образуются в зоне трещин с высоким коэффициентом трения стенок. УЗ стимуляция дефектов округлой формы, в частности, уноса материала (коррозии) не привела к положительным результатам.
- Установлено, что наличие иммерсионной жидкости не оказывает существенного влияния на температурные сигналы вследствие того, что в настоящих исследованиях применен магнитострикционный принцип возбуждения акустических волн.
- Эффективность УЗ термографического контроля максимальна при облучении трещин ультразвуком по нормали к трещинам и снижается с увеличением расстояния между точкой ввода ультразвука и дефектами. Поэтому при проведении сплошного контроля изделий из композиционных материалов целесообразна последовательная УЗ стимуляция изделий в различных точках, или одновременная стимуляция нескольких точек.
- Площадь одновременного контроля с использованием метода УЗ ИК термографического метода пропорциональна приблизительно квадрату акустической энергии и ограничена возможной деструкцией контролируемого материала в точке вывода ультразвука. Максимальная ожидаемая производительность испытаний составляет около $0,01 \text{ м}^2/\text{с}$, или $36 \text{ м}^2/\text{час}$ без учета времени подготовки и переоснастки оборудования, а также обработки данных.

- В процессе УЗ стимуляции объектов определенной формы и размеров возможно образование стоячих волн, которые можно подавить, применяя девиацию несущей УЗ частоты. В ряде случаев, наличие протяженных дефектов виде трещин влияет на образование стоячих волн.

Основные результаты диссертационных исследований

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

магнитостриктора, расстояния между точкой УЗ стимуляции и точкой наблюдения, а также их взаимной ориентации.

- Амплитуда температурных сигналов пропорциональна коэффициенту трения и эффективной (поглощенной) акустической энергии. В диапазоне исследованной электрической мощности УЗ стимуляции (до 2,5 кВт), температурные сигналы пропорциональны электрической мощности на магнитострикционном инденторе.
- Расчетным путем получены оценки так называемого температурно-акустического спектра, вид которого для композитов типа углепластика показывает существенную зависимость температурных сигналов от частоты ультразвука, что, по-видимому, связано с комбинированным проявлением эффектов механического гистерезиса и резонансных явлений.
- Наибольшие температурные сигналы возникают при перпендикулярном расположении дефектов типа трещин относительно преимущественного направления распространения ультразвука. Поэтому при проведении сплошного контроля изделий из ПКМ целесообразна последовательная УЗ стимуляция изделий в различных точках, или одновременная стимуляция нескольких точек.
- Для экспериментальных исследований композиционных материалов разработан экспериментальный комплекс, включающий вышеупомянутые устройства УЗ стимуляции, ряд моделей ИК тепловизоров, компьютер типа «лэп-топ» и устройство управления на базе модуля Ke-USB24R, а также оригинальное программное обеспечение.
- Для непрерывного возбуждения акустических волн использована стандартная установка финишной обработки металлов (частота 22 кГц, электрическая мощность на магнитострикторе до 300 Вт, длительность стимуляции композиционных материалов без охлаждения до 20 с). Для импульсной УЗ стимуляции разработана специализированная установка (изготовитель ООО «Инлаб»): частота 22 кГц, электрическая мощность на магнитострикторе до 2,5 кВт, минимальная длительность импульса 0,1 с, шаг дискретизации 0,1 с, длительность стимуляции композиционных материалов без охлаждения до 20 с. В данной установке, с целью предотвращения образования стоячих волн, предусмотрена девиация частоты.
- Экспериментальные исследования выполнены с использованием импульсной, периодической и непрерывной УЗ стимуляции, а также стандартных ИК тепловизоров высокого уровня: ThermoCAM P65 и NEC Avio TH-9100. Предпочтительность применения мощных коротких импульсов по сравнению с маломощной, но длительной стимуляцией, не подтверждена, по-видимому,

вследствие сравнительно низкой интенсивности тепловой диффузии в композиционных материалах, например, по сравнению с металлами.

- Согласно предсказаниям термомеханической теории внутреннего трения максимальные температурные сигналы образуются в зоне трещин с высоким коэффициентом трения стенок. УЗ стимуляция дефектов округлой формы, в частности, попытка контроля уноса материала (коррозии), не привела к положительным результатам.
- Установлено, что наличие иммерсионной жидкости не оказывает существенного влияния на температурные сигналы вследствие того, что в настоящих исследованиях применен магнитострикционный принцип возбуждения акустических волн.
- Эффективность УЗ термографического контроля максимальна при облучении трещин ультразвуком по нормали к трещинам и снижается с увеличением расстояния между точкой ввода ультразвука и дефектами. Поэтому при проведении сплошного контроля изделий из ПКМ целесообразна последовательная УЗ стимуляция изделий в различных точках или одновременная стимуляция нескольких точек.
- Площадь одновременного контроля с использованием метода УЗ ИК термографического метода пропорциональна приблизительно квадрату акустической энергии и ограничена возможной деструкцией контролируемого материала в точке ввода ультразвука. В выполненных исследованиях площадь одновременного контроля составляет 0,1-0,2 кв. м.
- В процессе УЗ стимуляции объектов определенной формы и размеров возможно образование стоячих волн, которые можно подавить, применяя девиацию несущей УЗ частоты. В ряде случаев, наличие протяженных дефектов виде трещин способствует подавлению стоячих волн.
- Результаты данной работы используются в «Новоуральском научно-конструкторском центре» при разработке технологии контроля изделий из углепластика, используемых в ядерной энергетике, а также в МНПО «Спектр» (г. Москва) при испытаниях материалов авиакосмического профиля. Экспериментальная установка УЗ ИК термографического контроля используется в Томском политехническом университете при выполнении выпускных работ бакалавров и магистров и проведении лабораторных работ студентами специальности «Физические методы и приборы контроля качества», а также слушателями курсов повышения квалификации в области теплового контроля.

- По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых изданиях из списка ВАК и 2 зарубежные публикации.

Публикации автора по теме диссертационных исследований

1. Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Хорев В.С. Ультразвуковой инфракрасный метод выявления ударных повреждений и усталостных трещин в металлах и композитах. В мире НК, март 2010. 1(47). С. 36-58.
2. Вавилов В.П., Ширяев В.В., Хорев В.С. Обработка результатов активного теплового контроля методом вейвлет - анализа. Дефектоскопия, 2011. №4. С. 70-79.
3. Вавилов В.П., Чулков А.О., Хорев В.С. Ультразвуковой инфракрасный термографический неразрушающий контроль композиционных материалов. Тезисы докладов международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов. Томск. Россия 5-9 сентября 2011. С. 323-326.
4. Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Khorev V.S. IR Thermographic NDT Research at Tomsk Polytechnic University. Siberia. Russia - Proceedings of the 50th Annual Conference of British Institute of Nondestructive Testing. 12-15 Sept. 2011, Telford. U.K. p. 1C3 (only on CD). 12 p.
5. Ширяев В.В., Хорев В.С. Тепловой контроль ударных повреждений в углепластике с применением ультразвуковой стимуляции. Контроль и Диагностика, 2011. Спецвыпуск. С. 112-114.
6. Нестерук Д.А., Хорев В.С., Коробов К.Н. Инфракрасно - ультразвуковой контроль воды в сотовых панелях самолетов. Контроль и Диагностика, 2011. №11. С. 11-14.
7. Вавилов В.П., Хорев В.С., Чулков А.О. Исследование метода ультразвукового инфракрасного контроля трещин в композитных материалах. Контроль и диагностика, 2012. Спецвыпуск. С. 197-201.
8. Vavilov V.I., Nesteruk D., Khorev V.I. Ultrasonic and inductive IR Thermographic Procedures as Newly - Emerged Techniques in Thermal NDT. - Annual Journal of Electronics. Sofia. 2012. V. 6. № 2. P. 102-109.

Список использованных источников

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД Спектр, 2009. 544 с.
2. Shepard S.M., Ducar R., Quantative Infrared Defect Detection in Composite Aerospace Structures - 45th international SAMPE Symposium, 2000. 10 p.
3. Maldague X. Introduction to NDT by Active Infrared Thermography, Materials Evaluation, V. 6. 2002. P. 1060-1073.
4. Нестерук Д.А. Тепловизионный контроль воды в авиационных сотовых панелях в процессе эксплуатации самолетов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Томск: ТПУ, 2005. 155 с.
5. Nondestructive testing handbook. V.3. Infrared and Thermal Testing. USA. ASNT. 2001. 714 p.
6. Климов А.Г. Разработка методики и аппаратуры активного теплового контроля воды в авиационных сотовых структурах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М: МИХМ, 2002. 138 с.
7. Нестерук Д.А., Вавилов В.П. Тепловой контроль и диагностика. Учебное пособие для подготовки специалистов I, II, III уровня. Томск, 2007. 104 с.
8. Maldague X. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, John Wiley & Sons. New York. U.S.A, 2001. 682 p.
9. Вавилов В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля. Справочник. М.: Машиностроение, 1991. 264 с.
10. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд. 5-е перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
11. Вавилов В.П., Климов А.Г. Тепловизоры и их применение. М.: Интел Универсал, 2002. 86 с.
12. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
13. Карпинос Д.М. Композиционные материалы Справочник. Киев: Наукова думка, 1985. 588 с.
14. Kainer K.U. Metal Matrix Composites. Custom - made Materials for Automotive and Aerospace Engineering. WILEY-VCH. 2006. 15 p.
15. Yamamura T., Tokuse M., Furushima T. Inorganic fiber reinforced metallic composite material. US 4622270. 1986. p.12

16. Капранов Б.И., Коротков М.М. Акустические методы контроля и диагностики. Часть 1. Томск: Изд. ТПУ, 2010. 186 с.
17. Гурвич А.К., Ермолов И.Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. Киев: Техника, 1972. 460 с.
18. Ермолов И.Н., Ермолов М.И. Ультразвуковой контроль. Учебник для специалистов 1 и 2 уровней квалификации. Издание пятое, стереотипное. М.: 2003. 209 с.
19. Инструкция по визуальному и измерительному контролю (РД 03-606-03). Серия 03. Выпуск 39 Колл. авт. М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2004. 52 с.
20. Калиниченко Н.П., Калиниченко А.Н. Визуальный и измерительный контроль. Учебное пособие для подготовки специалистов I, II и III уровня. Томск.: ТПУ, 2009. 311 с.
21. Клюев В.В. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 т. Т.5: В 2 кн. Кн. 1: Тепловой контроль. Вавилов В.П. М.: Машиностроение, 2004. 679 с.
22. ГОСТ 23483-79 Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования.
23. Исаченко В.П. Теплопередача. Учебник для вузов, Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1975. 484 с.
24. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 488 с.
25. Волков Э.П., Гаврилов Е.И., Дужих Ф.П. Газоотводящие трубы ТЭС и АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1987. 340 с.
26. Вавилов В.П., Александров А.Н. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике. Библиотечка электротехника. Прилож. журн. «Энергетик». М.: НТФ Энергопрогресс, Энергетик, 2002. 82 с.
27. Andrés E., Sánchez R. de Bustamante X. Infrared thermography and ultrasound both test analyzing valves 2144 6B 425. Buenos Aires 10p.
28. Gyekenyesi A.L. Testing static and dynamic stresses in metallic alloys using thermoelastic stress analysis. Mater. Evaluations, March 2002. P. 445-451.
29. Wong A.K., Sparrow J.G., Dunn S.A. On the revised theory of the thermoelastic effect. J. of Physics and Chemistry, 1988. V. 49. P. 395 - 400.
30. Tenek L.H., Henneke E.G. Flaw dynamics and vibrothermographic - thermoelastic NDE of advanced composite materials. Proc. SPIE "Thermosense-XIII", 1991. P.252-259.
31. Ранцевич В.Б. Тепловой метод выявления трещин при стендовых испытаниях изделий на усталость. Дефектоскопия, 1977. №5. С. 102-108.

32. Либовица Г., т.7 Разрушение неметаллов и композитных материалов. М.: Мир, 1976. 466 с.
33. Куриленко Г.А., Контроль и прогнозирование индивидуального сопротивления усталости деталей машиностроения на основе кинетики пассивных тепловых полей. Докторская диссертация. НГТУ, 2000. 402 с.
34. Luong M.P. Infrared thermography of fatigue in metals. Proc. SPIE "Thermosense-XIV", 1992. V. 1682. P. 222 - 232.
35. Thomson W. On the Dynamical Theory of Heat. Trans. Roy. Soc. 1853. V. 20. 261 - 283 p.
36. Desiderati S., Salerno A. Quantitative thermoelastic stress analysis in non adiabatic conditions. Proc. SPIE «Thermosense XXVL», 2004. P. 123 - 129.
37. New developments in Thermoelastic Stress. Analysis by Infrared Thermography. IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires, Octubre 2007. P. 34-38.
38. Dillenz A., Zweschper Th., Busse G. Elastic wave burst thermography for NDE of subsurface features. Insight, December 2000. V. 42. No.12. P. 815 - 817.
39. Zweschper Th., Dillenz A., Busse G. Ultrasound lock-in thermography - a defect selective method for the inspection of aerospace components. Insight, March 2001. V.43. No. 3. P. 173-179.
40. Morbidini M., Cawley P., Barden T., Almond D., Duffour P. Prediction of the thermosonic signal from fatigue cracks in metals using vibration damping measurements. Journal of Applied Physics 2006. 100:104905. 15 p.
- 41 Di Mambro J., Ashbaugh D.M., Nelson C.L., Spencer F.W. Sonic infrared (IR) imaging and fluorescent penetrant inspection probability of detection (POD) comparison. In: Thompson DO, Chimenti DE, editors. Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, V. 26A. 2007. P. 463 - 470.
42. Reifsnider K.L., Henneke E.G., Stinchcomb W.W. The mechanics of vibrothermography. In: Stinchcomb WW, editor. Mechanics of nondestructive testing. New York. Plenum Press, 1980. P. 76-249.
43. Han X., Zeng Z., Li W., Islam M.S., Lu J., Loggins V. Importance of acoustic chaos in sonic IR imaging NDE. In: Thompson DO, Chimenti DE, editors. Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, V. 23A. 2004. P. 496 - 500.
44. Renshaw J., Holland S.D., Thompson R.B. Measurement of crack opening stresses and crack closure stress profiles from heat generation in vibrating cracks. Applied Physics Letters. 2008. 93(8). 14 p.

45. Renshaw J., Holland S.D., Thompson R.B., Uhl C. The effect of crack closure on heat generation in vibrothermography. In: Thompson DO, Chimenti DE, editors. Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, V. 28A. 2009. P. 473 - 480.
46. Lu J., Han X., Newaz G., Favro LD., Thomas RL. Study of the effect of crack closure in sonic infrared imaging. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2000. 22(2). P. 127 – 135.
47. Shepard S.M., Ahmed T., Lhota J.R. Experimental considerations in vibrothermography, Proc. SPIE - The International Society for Optical Engineering, Thermosense XXVI. Orlando. FL, 2004, 14 p.
48. Zhang W., Testa R.B., Closure effects on fatigue crack detection. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 1999. 125(10). P. 1125 - 1132.
49. Bovsunovsky A.P. The mechanisms of energy dissipation in the non-propagating fatigue cracks in metallic materials. *Engineering Fracture Mechanics*, V.71. 2004. P. 2271 - 2281.
50. Homma C., Rothenfusser M., Baumann J., Shannon R., Study of the heat generation mechanism in acoustic thermography. In: Thompson DO, Chimenti DE, editors. Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, Melville, NY: American Institute of Physics; V. 25. 2006. P. 566 - 573.
- 51 Bowden F.P., Tabor D. *The friction and lubrication of solids*. Oxford University Press, 1950. 235 p.
- 52 Blau P.J. *Friction science and technology*. In: 2nd ed. New York. CRC Press, 2009. P. 119 - 126.
- 53 Renshaw J., Holland S.D., Thompson R.B., Anderegg J. Vibration - induced tribological damage to fracture surfaces via vibrothermography. *International Journal of Fatigue*, V.33(7). 2011. P. 849 – 857.
54. Renshaw J., Holland S.D., Thompson R.B., “Viscous material-filled synthetic defects for vibrothermography”. *NDT&E International*. V. 42. 2009. P. 753-756.
55. Chen J.C., Kephart J., Lick K., Riddell W.T. Crack growth induced by sonic IR inspection. *Nondestructive Testing and Evaluation*. V.22(2). 2007. P. 83 – 92 .
56. Holland S.D., Renshaw J. Physics - based infrared image enhancement for thermography. *NDT&E International*. V. 43(5). 2010. 9 p.
57. Zweschper Th., Dillenz A., Busse G.. Ultrasound lockin thermography – an NDT Method for the inspection of aerospace structures. Proc. Eurotherm Seminar N.64 “Quant. IR Thermography”. Reims. France. July 18-21. 2000. P. 212-217.
58. Dillenz A., Zweschper Th., Busse G.. Phase angle thermography with ultrasound burst excitation. Proc. Eurotherm Seminar No. 64 «Quant. IR Thermography», Reims. France. July 18-21. 2000. P. 247 - 252.

59. Favro L.D., Han X., Ouyang Z. et al. IR imaging of cracks excited by an ultrasonic pulse. Proc. SPIE «Thermosense-XXII», 2000. V. 4020. P. 182-185.
60. Gros X.E., Strachan P., Lowden D.W., Edwards I. NDT data fusion. In: Proc. 6th European Conf. NDT, 1994. V. 1. P. 355 – 364 .
61. Burke M.W., Miller W.O. Status of VibroIR at Lawrence Livermore National Laboratory. Proc. SPIE «Thermosense-XXVI», 2004. V. 5405. P. 313-321.
62. Jaiwan C., Yongchil S., Seungho J., Seungho K., Hyunkyu J. Defect detection within a pipe using ultrasound excited thermography. Nuclear engineering and technology, V.39. october 2007. P. 637 – 646.
63. Вавилов В.П.и др. Теоретическое и экспериментальное исследование феномена энерго - выделения структурными неоднородностями материалов при мощной ультразвуковой стимуляции с использованием метода инфракрасной термографии». Отчет по гранту аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы. 2009-2011. ТПУ. 50 с.
64. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: «Наука», 1989. 616 с.
65. Nomma C., Rothenfusser M., Baumann J. et al. Study of the heat generation mechanism in acoustic thermography. In Review of Quantitative Nondestructive Evaluation V. 25. ed. by Thompson D. O. and Chimenti D.E. American Institute of Physics. CP820, 2006. P. 566 - 573.
66. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 940 с.
67. Бленд Д. Нелинейная динамическая теория упругости. М.: 1972. 184 с.
68. Руководство по эксплуатации ThermoSource. Томск. 2013. 25 с.
69. Morbidini M., Cawley P. A calibration procedure for sonic infrared nondestructive evaluation. J. of Appl. Physics, 2009. V. 106. P. [023504-1–023504-7]
70. Gleiter A., Spießberger C., Busse G. Improved ultrasound activated thermography using frequency analysis. Intern. J. Quant. IR Thermography. 2007. V. 4. No. 2. P. 155 – 164 .
71. Xiaoyan H., Islam S., Newaz G., Favro L.D., Thomas R.L. Finite element modeling of the heating of cracks during sonic IR imaging. J. Of Applied Physics. V.99. 2006. P. [074905-07409]
72. Krapez J.C., Taillade F., Balageas D. Ultrasound-lockin-thermography NDE of composite plates with low power actuators. Experimental investigation of the influence of the Lamb wave frequency. Intern. J. Quant. IR Thermography. V.2. P. 191-206.
73. Руководство по эксплуатации Ультразвуковой комплекс на базе устройства финишной обработки с генератором УЗТГ. 2009. 17с.
74. Руководство по эксплуатации. Устройство магнито - стрикционной стимуляции дефектов в конструкционных материалах. ИЛ-УСД, 2012. 32с.

75. Руководство пользователя ThermoCam – P65 FLIR SYSTEMS. 2006. 252с.
76. Руководство по эксплуатации ThermoTracer TH- 9100 PMVI-WL. 2009. 230с.
77. Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Хорев В.С. Ультразвуковой инфракрасный метод выявления ударных повреждений и усталостных трещин в металлах и композитах. В мире НК. март 2010. 1(47). С. 36-58.
78. Вавилов В.П., Ширяев В.В. Хорев В.С. Обработка результатов активного теплового контроля методом вейвлет - анализа. Дефектоскопия. 2011. №4. С. 70-79.
79. Вавилов В.П., Чулков А.О. Хорев В.С. Ультразвуковой инфракрасный термографический неразрушающий контроль композиционных материалов. Тезисы докладов Международн. конф. по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов. 5-9 сентября. Томск. Россия. С. 323 - 326.
80. Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Khorev V.S. IR Thermographic NDT Research at Tomsk Polytechnic University. Siberia. Russia. Proceedings of the 50th Annual Conference of British Institute of Nondestructive Testing, 12-15 Sept. 2011, Telford, U.K. paper 1C3 (only electronic version). 12 p.
81. Ширяев В.В., Хорев В.С. Тепловой контроль ударных повреждений в углепластике с применением ультразвуковой стимуляции. Контроль и Диагностика. 2011. Спецвыпуск. С. 112-114.
82. Нестерук Д.А., Хорев В.С., Коробов К.Н. Инфракрасно - ультразвуковой контроль воды в сотовых панелях самолетов. Контроль и Диагностика. 2011. №11. С. 11-14.
83. Вавилов В.П., Хорев В.С., Чулков А.О. Исследование метода ультразвукового инфракрасного контроля трещин в композитных материалах. Контроль и диагностика 2012. Спец. выпуск. 197 с.
84. Vavilov VL., Nesteruk D., Khorev VL. Ultrasonic and inductive IR Thermographic Procedures as Newly - Emerged Technigues in Thermal NDT. Annual Journal of Electronics Sofia. 2012. V. 6, No 2. P. 102 - 109.
85. Инструкция по эксплуатации программы ThermoFit Pro. НИИ ТПУ. Томск, 2009. 98 с.
86. Казанцев В.Ф. расчет ультразвуковых преобразователей для технологических установок. Учеб. Пособие для слушателей заочных курсов повышения квалификации ИТР. По применению ультразвука в машиностроении. М: Машиностроение 1980. 44 с.
87. Дымент О.Н., Казанский К.С., Мирошников А.М. Гликоли и другие производные окисей этилена и пропилена. Под общей ред. О. Н. Дымента. М.: «Химия». 1976. 376 с.
88. Филимошкин А.Г., Воронин Н.И. Химические реакции полимеров пропилена и этилена. Томск: Изд-во Том. 1990. 217 с.

89. Бажант В., Хваловски В., Ратоуски И., Силиконы, [пер. с чеш.], М.: 1960. 234 с.
90. Миле Р.Н., Льюис Ф.М., Силиконы, пер. с англ., М.:1964. 188 с.
91. Егорова О.В. С микроскопом на «ты». Шаг в XXI век. М.: 2006. 95 с.
92. Zweschper Th., Dillenz A., Busse G. Ultrasound lockin thermography – an NDT method for the inspection of aerospace structures. Proc. Eurotherm Seminar No. 64 “Quant. IR Thermography”. Reims. France. July 18-21. 2000. P. 212 - 217.
93. Favro L.D., Han X., Ouyang X. Z. IR imaging of cracks excited by an ultrasonic pulse. Proc. SPIE “Thermosense-XXII”, 2000. V. 4020. P. 182 - 185.
94. Burke M.W., Miller W.O. Status of Vibro IR at Lawrence Livermore National Laboratory. Proc. SPIE “Thermosense-XXVI, 2004. V. 5405. P. 313 - 321.
95. Choi M., Kang K., Lee S., et al. Fatigue crack detection by ultrasound infrared thermography. Proc. 17th World NDT Conf., 25-28 Oct. Shanghai. China. 6 p.
96. Вавилов В.П., Нестерук Д.А . Сравнительный анализ оптической и ультразвуковой стимуляции дефектов в композиционных материалах. Дефектоскопия, 2010. №2. 90-99 с.
97. Горелик Г.С., Колебания и волны, М.: 1950. 225 с.
98. Вавилов В.П., Маринетти С.. Импульсная фазовая термография и тепловая томография на базе преобразования Фурье. Дефектоскопия, 1999. № 2. С. 58-71.
99. Вавилов В.П. Тепловой неразрушающий контроль композитов и многослойных изделий. Часть I: Краткая история и основные особенности. Дефектоскопия, 1993. № 10. С. 52 - 64.
100. Вавилов В.П. Тепловой неразрушающий контроль композитов и многослойных изделий. Часть II: Новые процедуры и обработка термограмм. Дефектоскопия, 1993, № 10, С. 65-75.



Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
Общество с ограниченной ответственностью
«НОВОУРАЛЬСКИЙ НАУЧНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ЦЕНТР»
(ООО «ННКЦ»)

ул. Дзержинского, д. 2, г. Новоуральск, Свердловская обл., Россия, 624130
ОГРН-1076629000700, ИНН/КПП 6629020806/662901001
код по ОКПО 81772823, код по ОКВЭД 73.10
р/с 40702810928050005063 в филиале ОАО Банк ВТБ г. Екатеринбург
кор/счет 3010181040000000952 № БИК 046577952, ИНН банка - 7702070139
Телетайп: 348811, КОНДОР, Факс: (34370) 98268, e-mail: nrdc@nrdc.ru



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ООО «ННКЦ»

П.В. Баженов

2013 г.

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы В.С.Хорева
«МЕТОД И АППАРАТУРА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИНФРАКРАСНОГО
КОНТРОЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ», представленной по
специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ,
материалов и изделий»

Диссертационная работа В.С.Хорева, выполненная в Национальном исследовательском Томском политехническом университете, посвящена разработке нового для отечественной практики метода неразрушающего контроля на базе ультразвуковой инфракрасной термографии, предназначенного для преимущественного обнаружения структурных дефектов в материалах, которые обнаруживают эффект внутреннего трения при их нагружении мощным ультразвуком.

Материалы диссертационной работы использованы при выполнении в 2012 г. НИР по теме «Разработка метода теплового неразрушающего контроля углепластиковой трубы» (договор № 28) между ООО «ННКЦ» и ТПУ в части разработки технологии теплового (инфракрасного) неразрушающего контроля углепластикового композита.

Разработанное автором устройство ультразвуковой инфракрасной термографии использовано в экспериментальных исследованиях по обнаружению скрытых дефектов в углепластиковых изделиях, применяемых в ядерной энергетике. Методика ИК термографического контроля и полученные автором экспериментальные результаты были использованы при выборе оптимального метода неразрушающего контроля композиционных материалов.

Начальник лаборатории ФМИ ООО "ННКЦ"

 Б.Д. Маранц

Руководитель группы ЛФМИ ООО "ННКЦ"

 А.В.Плесовских

НКЦ/8151/1726
Плесовских, (34370) 79171
АП 2 11.03.2013





Закрывтое акционерное общество
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ИНТРОСКОПИИ
МНПО «С П Е К Т Р»
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

№ 20-91/08

« 11 » 03 20013 г.



УТВЕРЖДАЮ
 Директор
 ЗАО НИИИИ МНПО «СПЕКТР»
 Академик РАН
 Д.т.н., профессор
 В.В. Клюев

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы В.С. Хорева
«МЕТОД И АППАРАТУРА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИНФРАКРАСНОГО
КОНТРОЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ», 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 результате диссертационных исследований В.С. Хоревым разработан метод ультразвуковой инфракрасной термографии в применении к неразрушающему контролю дефектов в композиционных материалах, преимущественно, авиакосмического профиля.

Научные результаты диссертации в части испытаний образцов композиционных материалов, используемых в российской авиационной промышленности (элементы теории, описание ультразвуковой аппаратуры и экспериментальные данные), переданы в ЗАО НИИИИ МНПО «Спектр» и используются при выполнении НИР и ОКР в вышеуказанной области, в частности, для определения возможностей комбинирования ультразвукового, теплового и других видов неразрушающих испытаний.

Зав. сектором
 Д.т.н.

 **Артемьев Б.В.**