

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

*На правах рукописи*

Шпильной Виктор Юрьевич

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ СИНТЕЗА  
ДАННЫХ ТЕПЛОВОГО И УЛЬТРАЗВУКОВОГО  
ВИБРОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ 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  
кандидат технических наук, Д.А. Дерусова

Томск – 2021

## Содержание

<b>Введение</b> .....	5
<b>Глава 1. Обзор современных методов неразрушающего контроля полимерных композиционных материалов</b> .....	14
1.1 Традиционный ультразвуковой неразрушающий контроль.....	15
1.2 Воздушно-связанные ультразвуковые излучатели для НК композитов ...	18
1.3 Резонансная ультразвуковая спектроскопия.....	21
1.4 Лазерная Доплеровская виброметрия .....	21
1.5 Визуально-оптический контроль.....	23
1.6 Радиоволновой контроль.....	24
1.7 Тепловой контроль.....	25
1.8 Синтез данных .....	26
1.9 Выводы по Главе 1 .....	27
<b>Глава 2. Разработка алгоритма и программного обеспечения для оценки площади дефектов по результатам неразрушающего контроля</b> .....	29
2.1 Распознавание дефектов оператор .....	29
2.2 Распознавание дефектов по параметру SNR.....	31
2.3 Работа с графическим представлением данных.....	33
2.4 Назначение программы DeFinder .....	34
2.5 Валидация алгоритма автоматического распознавания дефектов.....	37
2.6 Апробация программы на примере анализа дефектов в полимерных композиционных материалах.....	41
2.7 Выводы по Главе 2 .....	45
<b>Глава 3. Синтез экспериментальных данных теплового неразрушающего контроля и лазерной виброметрии</b> .....	47
3.1 «Классический» тепловой контроль при оптической стимуляции.....	48
3.2 Сканирующая лазерная Доплеровская виброметрия .....	51
3.3 Синтез данных лазерной виброметрии при акустической стимуляции и активного теплового неразрушающего контроля при оптической стимуляции .....	53

3.4 Количественная оценка выявляемости ударных повреждений в композитах с использованием синтеза данных.....	54
3.5 Качественная оценка выявляемости дефектов в композитах с использованием синтеза данных .....	60
3.6 Исследование производственных дефектов в композитах с использованием синтеза данных .....	67
3.7 Выводы по Главе 3 .....	74
<b>Глава 4. Исследование устойчивости углепластиковых композитов различной конфигурации к последовательным циклам ударных повреждений.....</b>	<b>76</b>
4.1 Материалы и методы .....	76
4.2 Результаты исследований пластин толщиной 1мм.....	77
4.3 Последовательные циклы ударов с одинаковой энергией.....	78
4.4 Последовательные ударные повреждения с повышением энергии удара	81
4.5 Последовательные ударные повреждения с понижением энергии удара.	84
4.6 Исследование устойчивости углепластиковых композитов толщиной от 0,5 до 5 мм к ударным повреждениям с повышением (от 1 до 5 Дж) и понижением (от 5 до 1 Дж) энергии удара.....	86
4.7 Влияние укладки слоев на устойчивость материала к ударным повреждениям.....	93
4.8 Выводы по Главе 4 .....	100
<b>Заключение.....</b>	<b>103</b>
<b>Термины и определения .....</b>	<b>106</b>
<b>Обозначения и сокращения .....</b>	<b>108</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>110</b>
<b>Приложение А (справочное) Акт использования результатов диссертационных исследований.....</b>	<b>121</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных отраслей промышленности (машиностроительной, авиационной, ракетно-космической, атомной и др.) устанавливает высокие требования к физико-механическим свойствам современных композиционных материалов, превосходящим аналогичные характеристики традиционно используемых материалов (сплавы металлов, древесина, стекло и пр.). Это определяет актуальность разработки, совершенствования и исследования новых композиционных материалов с улучшенными свойствами для изготовления ответственных элементов конструкций.

Одним из главных условий безопасной эксплуатации конструкционных материалов является своевременное проведение неразрушающего контроля изделий и корректное прогнозирование срока их службы. В связи с этим создание новых методик контроля качества и совершенствование существующих технологий является необходимым условием обеспечения требуемого качества материалов, а предварительное моделирование структурных неоднородностей, в свою очередь, позволяет сократить объем натурных испытаний и проводить анализ процессов деградации изделия [1-5].

В настоящем диссертационном исследовании рассмотрен ряд методов неразрушающего контроля (НК), используемых для обнаружения дефектов в композиционных материалах. В частности, описаны подходы к мониторингу дефектов в композиционных материалах, определению их теплофизических характеристик (ТФХ), как в момент образования неоднородностей, так и до полного разрушения изделия по причине его возрастной деградации, коррозии или внешнего физического воздействия. Основное внимание в работе уделено синтезу данных теплового контроля (ТК) и лазерной виброметрии (ЛВ) с целью повышения информативности и достоверности результатов тестирования композиционных материалов. Разработка программно-аппаратного комплекса для синтеза данных выполнена с целью компенсации

ограничений каждого отдельно используемого метода неразрушающего контроля. Практическая часть работы посвящена апробации разработанного программного обеспечения для автоматического распознавания дефектов на примере исследования дефектов различного происхождения в контрольных образцах из полимерных композиционных материалов.

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят широкое применение в автомобилестроении, а также в ракетно-космической и авиационной промышленности. В процессе производства и эксплуатации изделий из композиционных материалов могут возникать различные виды дефектов (ударные повреждения, расслоения, трещины, неполное отверждение связующего и прочие), а периодическое изменение температуры окружающей среды и влажности, в свою очередь, приводят к их прогрессирующему росту. Существующие виды (методы) неразрушающего контроля композитов обладают определенными преимуществами и недостатками, поэтому исследования, направленные на синтез преимуществ и компенсацию недостатков каждого отдельного метода, являются актуальными для обеспечения длительной и безопасной эксплуатации изделий авиационной и ракетно-космической промышленности. В рамках настоящего исследования это достигается комбинированием (синтезом) результатов ТК и ЛВ, причем фактором выбора вышеуказанных методов является предпочтительность применения одностороннего ТК для обнаружения приповерхностных дефектов в композитах, в то время как метод ЛВ обеспечивает контроль более глубоких дефектов.

#### **Степень разработанности темы.**

В ряде научных статей и монографий был проведен обзор и обобщение мирового и отечественного опыта разработки методов НК ПКМ. В частности, состояние, отдельные аспекты и тенденции развития метода теплового

контроля (ТК) были описаны В.П. Вавиловым, О.А. Будадиным, О.А.Плеховым, Е.В. Абрамовой, В.А. Захаренко, В.Н. Чернышевым и рядом других ученых в России; за рубежом в указанной области проводят исследования Х. Maldague (Канада), D. Burleigh (США), G. Busse (Германия), D. Balageas (Франция), D. Almond (Великобритания), A. Ngo (Сингапур) и др. В передовых странах ряд научно-исследовательских лабораторий в течение последнего десятилетия проводят научные исследования в области ультразвуковой инфракрасной термографии. В США указанная тематика разрабатывается в Lawrence Livermore National Laboratory, Wayne State University, Sandia National Laboratories и др. В Великобритании – Imperial College London. Universität Stuttgart, а также Fraunhofer IZFP – в Германии и Université Laval в Канаде. Кроме того, активными исследованиями в данной области занимаются коллективы ряда азиатских стран: в Китае – Пекинский Университет Бейханг, в Сингапуре – Национальный Университет Сингапура и др. Исследования по тепловому НК в России проводятся преимущественно в ЦИТ при НИ ТПУ (г. Томск), ЦНИИ СМ (г. Хотьково), ОмГТУ (г. Омск), НИИИН МНПО «Спектр» (г. Москва), ИрГУПС (г. Иркутск), ТГТУ (г. Тамбов). В смежных с ТК и лазерной виброметрией (ЛВ) областях проводят исследования специалисты ФГУП «ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского» (г. Жуковский), ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина» (г. Новосибирск), Института механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь), Института физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск) и др.

Настоящая диссертационная работа посвящена разработке алгоритмов и методик синтеза данных теплового и виброметрического НК, а также исследованию дефектов в полимерных композиционных материалах с использованием комбинирования результатов нескольких видов контроля. Исследования проводили на основе классических методов НК, разработанных ранее В.П. Вавиловым, Д.А. Дерусовой, А.О. Чулковым и др. в Томском политехническом университете (НИ ТПУ), и являются продолжением работ лаборатории «Тепловой контроль» ТПУ в указанной области знаний.

Оригинальным аспектом выполненных исследований является синтез результатов ТК и сканирующей ЛВ.

**Цель исследования:** разработать методику синтеза данных, полученных в результате неразрушающего теплового контроля при оптической стимуляции и сканирующей лазерной виброметрии при акустической стимуляции.

**Задачи,** поставленные в работе и служащие достижению вышеуказанной цели:

- разработать методику синтеза данных ТК и ЛВ;
- разработать программное обеспечение, осуществляющее автоматическое распознавание дефектных областей на вибро- и термограммах, а также определение площади дефектов с последующим синтезом данных;
- выполнить валидацию алгоритма программы и апробацию разрабатываемого программно-аппаратного комплекса на примере анализа экспериментальных данных ТК и ЛВ;
- провести исследования композиционных материалов с эталонными дефектами различного типа (ударными повреждения, инородными включениями, расслоениями, утонениями материала) с использованием методов ТК и ЛВ;
- оценить эффективность синтеза экспериментальных данных ТК и ЛВ с помощью разработанного программного обеспечения при обнаружении дефектов в контрольных образцах ПКМ.

**Объект исследования** – активный тепловой НК при оптической стимуляции и сканирующая лазерная Доплеровская виброметрия при акустической стимуляции.

**Предмет исследования** – разработка методики и программного обеспечения для синтеза и анализа данных теплового НК и сканирующей лазерной виброметрии.

### **Научная новизна работы.**

- Синтез данных теплового контроля (ТК) и сканирующей лазерной Доплеровской виброметрии (ЛВ) обеспечивает взаимодополняющую информацию о структурных дефектах в ПКМ и повышает достоверность обнаружения и оценки параметров дефектов различного происхождения.
- Различие физических принципов, лежащих в основе ТК и ЛВ, позволяет скомпенсировать ограничения вышеуказанных методов НК путем синтеза данных, в частности, обеспечивает обнаружение неоднородностей, расположенных в композитах на глубинах более 12 мм, что представляет трудности для традиционных методов НК. При этом активный ТК наиболее пригоден для дефектометрии, а ЛВ расширяет диапазон глубин обнаруживаемых дефектов.
- Результаты ТК зависят от равномерности нагрева объекта контроля, в то время как метод ЛВ является чувствительным к расстоянию между точкой ввода ультразвука и дефектами. Синтез данных ТК и ЛВ позволяет скомпенсировать вышеупомянутые недостатки двух методов испытаний и повысить достоверность обнаружения скрытых дефектов.
- В результате анализа дефектов в композитах с использованием ЛВ, установлено, что площадь ударных повреждений в изделиях из углепластика толщиной 1-5 мм нелинейно связана с энергией удара в диапазоне малых энергий (от 0 до 10 Дж). Площади дефектов, возникающих в результате последовательных ударов с повышением и понижением энергии, сопоставимы и не превышают размеров дефектов, полученных при нанесении одиночных ударов эквивалентной энергии.

### **Практическая значимость работы.**

- Разработан алгоритм автоматического анализа результатов теплового НК и ЛВ с целью обнаружения дефектов и определения их площади дефектных областей, а также синтеза виброграмм и термограмм, с целью повышения достоверности дефектоскопии и дефектометрии.



- Разработано программное обеспечение DeFinder для анализа монохромных и градиентных графических изображений с целью определения площади дефектных областей. Программа ориентирована на операторов 2-го уровня квалификации (в системе Ростехнадзора) и позволяет проводить процедуры дефектоскопии и дефектометрии. Алгоритм программного обеспечения DeFinder является охраняемым результатом интеллектуальной деятельности (РИД) [Программа для ЭВМ: свидетельство № 2020612786. Дата регистрации: 03.03.2020].

- Результаты диссертационных исследований использованы в научных исследованиях и образовательной деятельности лаборатории контроля качества материалов и конструкций Института физики прочности и материаловедения (ИФПМ) СО РАН (см. соответствующую справку в Приложении).

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

1. В основе оптического, акустического и виброметрического методов неразрушающего контроля лежат различные физические принципы обнаружения дефектов в полимерных композиционных материалах, в связи с чем проведение синтеза данных позволяет расширить перечень выявляемых дефектов, также оптимизировать процедуру определения характеристик дефектов путем использования результатов более эффективного метода НК.

2. Подповерхностные дефекты в композитах (расположенные на глубинах до нескольких миллиметров) целесообразно выявлять методом активного ТК, в то время как глубокие дефекты (до 12 мм) лучше выявляются с помощью лазерной виброметрии. В результате лазерного вибросканирования контрольного образца стеклопластикового композита были определены характеристики дефектов, расположенных на глубине до 12 мм, в то время как односторонний ТК показал эффективность при обнаружении размеров и глубины залегания дефектов, расположенных на глубине до 6 мм.

3. При нанесении серии последовательных ударных повреждений в ПКМ толщиной от 1 до 5 мм (при энергии до 10 Дж) с повышением и понижением энергии удара обнаружено нелинейное увеличение площади повреждений. Установлено, что площади дефектов полученных таким образом дефектов сопоставимы и не превышают размеров дефектов, определенных в результате нанесения одиночных ударов эквивалентной энергии. Процедуры теплового контроля или лазерного вибросканирования могут быть использованы для оптимизации структуры ПКМ, например, схемы укладки слоев, с целью обеспечения лучших демпфирующих характеристик материалов и их устойчивости к ударным повреждениям.

**Достоверность полученных теоретических и экспериментальных результатов** обеспечивается применением современной компьютерной тепловизионной аппаратуры известных мировых производителей (компании Optris и FLIR Systems). Абсолютная погрешность изменения температуры данными средствами составляет  $\pm 1\%$  или  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Также имеется возможность регистрировать дифференциальные температуры с чувствительностью до  $0,01^\circ\text{C}$ . Устройство лазерной виброметрии фирмы Polytec позволяет производить измерение виброскорости на поверхности материалов вплоть до единиц микрометров в секунду в широком диапазоне частот (от 10 Гц до 250 кГц). Используемая в настоящей работе программа «ThermoLab Pro» (разработка ТПУ) для расчета трехмерных температурных сигналов основана на численном решении дифференциального уравнения теплопроводности. Полученные теоретические и экспериментальные результаты не противоречат общефизическим принципам и данным, полученным другими авторами. Валидация программы проведена согласно предельным аналитическим решениям классической теории теплопередачи.

### **Апробация работы.**

Результаты диссертационных исследований докладывались на Международном междисциплинарном симпозиуме "Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций" (г. Томск, 2019 г.), Международной конференции по неразрушающему контролю «SINCE2019: The 3rd Singapore International NDT Conference & Exhibition» (Сингапур, 2019 г.), XXXII Уральской конференции с международным участием «Физические методы неразрушающего контроля («Янусовские чтения»)), Екатеринбург, 2021 г.

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

- разработке алгоритма распознавания и определения характеристик дефектов по результатам НК;
- разработке и экспериментальной апробации программного комплекса для синтеза результатов, полученных с помощью различных методов НК (включая ТК и ЛВ);
- проведении экспериментальных исследований контрольных образцов ПКМ с дефектами при использовании ТК и ЛВ.

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

Диссертационная работа связана с выполнением следующих проектов:

1. Международный индивидуальный грант Европейского союза по обмену студентами по программе «Erasmus+» в Политехническом университете г. Бари (Италия, 2019);
2. Грант Президента РФ МК–1221.2021.4, соглашение № 075-15-2021-267 «Разработка метода и аппаратуры бесконтактной ультразвуковой стимуляции для проведения контроля качества композиционных и полимерных материалов с использованием лазерной виброметрии» (2021-2022г);

3. Грант РФФ №18–79–00029 «Разработка методики комплексной диагностики композиционных материалов в процессе резонансной ультразвуковой вибротермографии» (2018–2020г);

4. Грант РФФ №17–19–01047 «Разработка метода и аппаратуры динамической тепловой томографии композиционных материалов» (2017–2021г);

5. Грант РФФИ №18–41–703002 «Развитие научных основ проектирования и диагностики углепластиковых композитов на основе исследования взаимосвязи их структуры и динамических характеристик с использованием комплексного расчетно-экспериментального подхода, включающее сканирующую лазерную виброметрию и численное моделирование» (2019–2020г);

6. Грант РФФИ №19–29–13004 «Теоретическое моделирование и экспериментальные исследования нестационарных трехмерных тепловых полей в анизотропных композитных материалах, используемых в авиакосмической технике, для дефектоскопии и дефектометрии скрытых дефектов» (2020–2022г);

7. Грант НИ ТПУ ВИУ-ИШНКБ – 71/2019 «Комплексирование теплового, ультразвукового, и лазерного виброметрического методов исследования твердых сред с использованием синтеза данных, нейронных сетей и решений обратных задач» (2019г);

8. Грант НИ ТПУ ВИУ-ИШНКБ – 211/2020 «Метод и аппаратура инфракрасного термографического контроля углерод-углеродных сопел космических аппаратов» (2020г);

9. Грант НИ ТПУ ВИУ-ИШФВП – 196/2019 «Разработка методик аппаратуры активного теплового контроля материалов и изделий авиакосмической и ракетной отраслей» (2019 г).

### **Публикации**

За время обучения соискатель опубликовал 8 работ (все по теме диссертации). Из них: 6 статей в изданиях, цитируемых в базах данных Scopus и Web of Science, включая 1 статью в журнале первого квартиля (Q1).

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация содержит следующие разделы: введение, 4 главы, заключение, список использованных источников, включающий 79 работ, 1 приложение, и содержит 120 страниц текста (без учета приложений), 35 рисунков, 12 формул и 21 таблица.

## ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время существует множество методов неразрушающего контроля (НК) полимерных композиционных материалов (ПКМ), отличающихся по характеру взаимодействия физических полей с объектами контроля, по регистрируемому информативному параметру, а также по способу получения первичной информации [6-8].

Таблица 1.1 - Оценка результатов неразрушающего контроля энергетических оболочек ракет из полимерных композитов [9]

Типовые дефекты, требующие обнаружения	Методы НК						
	УЗ (На проход)	УЗ (импедансный)	МКВ	Рентген	Компьютерная томография	ТК	ЛВ
Обнаружение отслоений поверхностных слоев (в виде воздушные полости)	7	7	3	7	7	6	7
Обнаружение отслоений поверхностных слоев (В виде крыльев бабочки)	5	5	4	6	6	6	7
Поиск лже-дефектов	5	6	4	2	2	2	7
Расчет профиля дефекта	6	6	5	7	7	7	5
Расчет глубины дефекта	1	5	3	6	7	7	2
Обнаружение пористых включений	7	7	3	7	7	7	7
Безопасность	7	7	4	2	2	7	7
Скорость измерений	5	5	2	5	6	6	7
Доступность элементной базы оснащения	7	7	1	5	7	7	5
Возможность автоматизации	7	3	2	6	7	7	5
Размер инспектируемого образца	7	4	1	5	2	7	7
Достоверность обнаружения	4	4	3	3	7	5	7
<b>Итого</b>	<b>48</b>	<b>69</b>	<b>35</b>	<b>61</b>	<b>67</b>	<b>74</b>	<b>80</b>

В данной работе рассмотрены методы НК, которые применяют для контроля качества ПКМ, используемых в авиационной и ракетно-космической промышленности. Особое внимание уделено УЗК и ТНК. В таблице 1.1 использованы материалы D.Burleigh, известного эксперта в области НК авиакосмической промышленности США. Согласно результатам сравнительной оценки эффективности различных методов НК [9], комбинирование различных методов НК позволяет компенсировать недостатки одного метода преимуществами другого.

### **1.1 Традиционный ультразвуковой неразрушающий контроль**

Ультразвуковой контроль является одним из наиболее распространенных методов НК ввиду высокой чувствительности, экологичности способа тестирования и мобильности используемого оборудования. Наряду с УЗК, широкое применение в промышленности находит радиационный метод НК, позволяющий успешно обнаруживать критические дефекты и объективно оценивать полученные данные [10-16]. Оба метода применяются как в качестве самостоятельных методов тестирования, так и в комплексных томографических системах [16-20].

Широкое распространение среди УЗК методов нашли эхо-импульсная и трансмиссионная техники передачи УЗ с использованием пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) [21, 22]. В основе метода УЗК композиционных материалов лежит анализ особенностей рассеяния, затухания и отражения акустических волн диапазона от 50 Гц до 50 МГц в дефектных и бездефектных областях исследуемых материалов. Важной особенностью проведения УЗК является обеспечение надежного контакта УЗ датчиков с поверхностью объекта контроля, что традиционно осуществляется с помощью иммерсионных жидкостей или клеевых составов. Режим сканирования в УЗ диапазоне также становится доступным при использовании ёмкости с водой, в которую погружается образец, и исследовательского зонда,

осуществляющего приёмо-передачу упругой волны через водный зазор, который является иммерсионным слоем.

### **Визуальное представление результатов**

В зависимости от поставленной задачи, результаты УЗ НК могут быть представлены в виде точечных или линейных областей, а также в виде «поверхности» измеренных данных [23-28]. В таком случае зарегистрированный сигнал представляется одним из следующих способов:

1. А-сканирование: информация представлена в виде одномерного изображения, отражающего зависимость амплитуды отраженного сигнала от расстояния до границы сред с разным акустическим сопротивлением. Способ основан на определении глубины путем анализа отраженного эхо-сигнала от границы сред с различной плотностью (акустическим импедансом). В частности, чем выше акустический импеданс, тем выше амплитуда эхо-сигнала [23].

2. В-сканирование: данные представляются в виде двумерного изображения объекта, причем как в продольном, так и в поперечном направлении. Контрастность изображения зависит от амплитуды регистрируемого эхо-сигнала [24].

3. С-сканирование: результатом является двумерное изображение, плоскость которого перпендикулярна плоскости В-сканирования. Как и в А-сканировании, глубина расположения дефекта определяется по времени отклика эхо-сигнала. Благодаря возможности выбора интервала времени приема сигнала, доступно получение среза данных на заданной глубине материала [25-27].

### **Контактные методы ультразвукового контроля**

Наиболее распространенными источниками и приемниками акустического сигнала в практике УЗК являются ПЭП, несмотря на широкое разнообразие доступных аппаратных средств (электромагнитные и емкостные



датчики, интерферометрия, мощные лазерные импульсы и др.) [29-31]. Одиночные излучатели или пары ПЭП плотно закрепляются на поверхности исследуемого объекта в противоположных углах через иммерсионный слой. В частности, амплитудный и теневой методы УЗК основаны на эффекте уменьшения амплитуды волн при их прохождении через дефектные области, а также увеличения времени приема сигнала, вызванные различающейся плотностью среды (акустическим импедансом) [32, 33]. Современные ПЭП позволяют генерировать короткие импульсы УЗ волн, а также осуществлять прием эхо-сигналов. В связи с этим, измерение времени отражения сигнала, а также его амплитуды, позволяет определить не только расстояние до дефекта, но и глубину его залегания, а применение иммерсионной жидкости, в свою очередь, позволяет проводить исследование без двустороннего доступа к объекту контроля [21, 34, 35].

К недостаткам УЗК относят ограничения габаритных размеров объекта исследования, быстрый износ излучателей, необходимость обеспечения плотного контакта излучателя с контролируемой поверхностью, а также (в ряде случаев) необходимость доступа к обратной поверхности исследуемого материала.

### **Погружение в иммерсионную среду**

Ультразвуковое сканирование крупногабаритных конструкций в промышленном производстве осуществляют, как правило, с помощью их погружения в ванну (камеру) с иммерсионной жидкостью (водой) [35-38]. Для повышения точности сканирования применяют фокусирующие преобразователи или акустические волноводы с узкой диаграммой направленности, что позволяет получить данные о глубине и геометрии дефекта, а также трехмерное изображение, основанное на эхо-сигнале от исследуемой поверхности [27]. В частности, максимальное разрешение в 1 мкм достигается при использовании сферически сфокусированных высокочастотных УЗ датчиков с большой апертурой [38].

Методы УЗК широко используются в современной промышленности тяжелой металлургии: машино-, авиа- и станкостроении и др. [10, 15-17, 21, 25], однако для контроля качества современных композиционных материалов УЗК применяют ограниченно вследствие следующих особенностей:

1. Гигроскопичность композиционных материалов не позволяет использовать иммерсионные жидкости из-за высокой вероятности утраты исходных свойств материалов ввиду избыточного влагонасыщения.
2. Пропитывание иммерсионной жидкостью дефектов в слоистых и пористых композиционных материалах может привести к дальнейшему росту неоднородностей при эксплуатации изделия в экстремальных климатических условиях.
3. Ограничения контроля крупногабаритных изделий из полимерных композитов вследствие низкой производительности метода.

## **1.2 Воздушно-связанные ультразвуковые излучатели для НК композитов**

Ранее считалось нецелесообразным использование воздушно-связанного способа ввода УЗ для обнаружения дефектов в композиционных материалах ввиду существенного затухания УЗ в воздушной среде, а также отражения акустической волны на границе раздела сред [40]. В недавней работе [41] рассмотрена возможность применения воздушно-связанных пьезокерамических преобразователей в качестве источника УЗ для проведения НК полимерных композитов при лазерном вибросканировании поверхности исследуемого материала. Особенностью предложенного подхода является повышение эффективности передачи акустической энергии непосредственно в область дефекта путем использования избирательного диапазона частот возбуждающих упругих волн с учетом резонансных явлений в дефектных зонах материала. Недостатком метода является необходимость предварительного исследования акустических явлений в изделии и

определения резонансной частоты дефектов при широкополосном лазерном вибросканировании, а также ограничения рабочего диапазона частот и мощности известных типов воздушно-связанных излучателей.

В работе [42] рассмотрена возможность осуществления контроля качества композиционных материалов с использованием воздушно-связанного магнестрикционного излучателя в сборке с титановыми волноводами различной конфигурации. Изображение акустических волнопроводов и установки лазерной виброметрии при УЗ стимуляции на основе воздушно-связанного магнестрикционного излучателя приведено на рисунке 1.1.

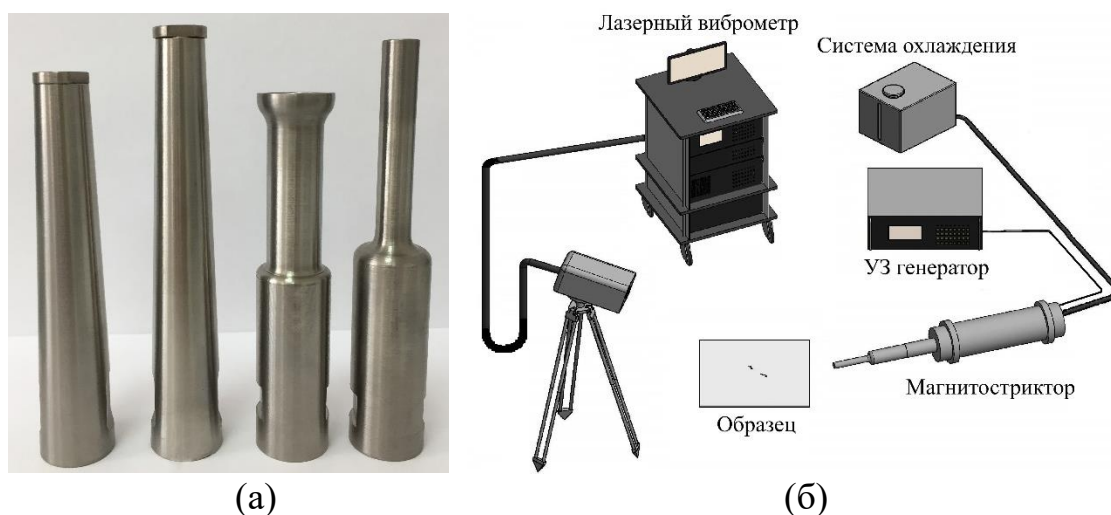


Рисунок 1.1 – Изображение титановых волнопроводов (а) для проведения ЛВ ПКМ с использованием воздушно-связанного магнестрикционного излучателя (б).

Фокусировка УЗ сигнала осуществляется путем использования титановых волнопроводов и позволяет добиться узкой направленности стимулирующего сигнала при обеспечении высокого уровня мощности оборудования и вводимого акустического сигнала. Особенностью метода является возбуждение акустических колебаний без непосредственного контакта УЗ излучателя с объектом контроля при исключении вероятности повреждения материала в точке ввода УЗ. В работе [42] показана возможность

обнаружения ударных повреждений в углепластиковых композиционных материалах, а также наличия избыточного клея и воды в сотовых конструкциях, с использованием системы УЗ контроля на основе воздушно-связанного магнитострикционного излучателя и лазерной виброметрии. Важно отметить, что, несмотря на широкое применение концепции воздушно-связанного УЗК в исследовательских целях, указанный метод пока не нашел практического применения в промышленности. Однако для улучшения качества акустической стимуляции полимерных композиционных материалов с использованием воздушно-связанных излучателей были определены некоторые особенности проведения тестирования:

- Согласование полного сопротивления

Нанесение иммерсионной жидкости на поверхность исследуемого материала увеличивает коэффициент передачи акустической энергии.

- Повышение мощности сигнала

Входное напряжение воздушно-связанных пьезоэлектрических излучателей может достигать амплитуд порядка сотен вольт при импульсных режимах работы, а в режиме постоянного сигнала – не более 90 В.

- Фокусировка УЗ излучения

Предварительная фокусировка направленного действия УЗ на поверхность исследуемого материала позволяет оптимизировать параметры приема/передачи акустического сигнала и повысить эффективность НК композитов.

- Узкая полоса пропускания

Затухание УЗ в воздушной среде может быть частично скомпенсировано путем использования широкополосных акустических систем. В случае использования резонансных излучателей обязательным является соответствие диапазона рабочих частот источника звука частоте резонанса дефектов в исследуемых материалах.

### **1.3 Резонансная ультразвуковая спектроскопия**

Еще одним методом НК полимерных композиционных материалов является резонансная ультразвуковая спектроскопия (УЗС). Метод основан на регистрации и анализе спектра УЗ эхо-сигнала. Диагностическим параметром в данном случае выступает статистический критерий отклонения экспериментального спектра сигнала отклика от расчетного. Теоретически обратная задача УЗС решается через тензор упругости, т.е. вариации модулей упругости. Результатом расчета является спектр эхо-сигнала.

### **1.4 Лазерная Доплеровская виброметрия**

Современные методы НК на основе лазерной Доплеровской виброметрии используют эффект Доплера для измерения вибраций на поверхности тестируемого материала при акустической стимуляции. Развитие элементной базы микроэлектронных систем позволило достигнуть высокой точности измерения скорости и смещения частиц среды на поверхности исследуемого объекта в ответ на различные виды возбуждения механических колебаний. Это определяет совместное использование Доплеровских виброметров с УЗ стимуляцией для НК изделий из ПКМ.

Линейность или нелинейность виброметрии обуславливается входными и выходными параметрами аппаратуры. Линейная система подразумевает пропорциональность входного и выходного сигнала, а также отсутствие на выходе частот, не подаваемых на вход системы. При невыполнении одного или обоих условий система называется нелинейной. Линейную и нелинейную виброметрию применяют для НК структурных повреждений композитов [43, 44].

#### **Линейная виброметрия**

Метод заключается в регистрации амплитуды колебаний на инспектируемой поверхности при акустической стимуляции объекта. Колебания возбуждаются с использованием УЗ излучателей, включая устройства для фокусировки сигнала с помощью «рупоров» и/или

акустических волноводов. Изменение частоты модальных составляющих объекта при развитии или росте повреждений в композитах позволяет использовать виброметрию в качестве метода НК. Модальный анализ включает определение и анализ формы деформированного объекта в условиях стоячих волн (стационарных вибрационных условиях); метод основан на измерении амплитудно-частотного спектра вибраций на поверхности материала, а также анализе демпфирующих свойств материала.

К недостаткам метода следует отнести трудоемкость определения характера повреждения с учетом частотных сдвигов и демпфирующих свойств системы. Также следует отметить, что исследование амплитудно-частотного спектра вибраций не позволяет получить полную информацию о локализации и количестве дефектов в исследуемой конструкции.

К преимуществам метода относят отсутствие ограничений габаритных размеров конструкций. Результаты контроля сопоставимы по характеристикам с результатами других методов НК, использующих большое количество исходных параметров объектов [42].

### **Нелинейная виброметрия**

Классическая теория нелинейности заключается в увеличении волнового искажения во время распространения монохроматической волны вдоль нелинейного материала, из-за чего возникают ультра-гармоники резонансных частот, представляющие информацию о свойствах объекта исследования [44-46]. В качестве источников УЗ колебаний в данном случае также могут выступать ПЭП (см. их описание в разделах 1.1 и 1.2 главы 1), а также магнитострикционные излучатели (раздел 1.2 главы 1). В случае приближения частоты возбуждения к частоте собственного резонанса дефекта, наблюдается локальное усиление амплитуды вибраций в области неоднородности. Амплитуда вибраций в области дефекта значительно увеличивается на резонансе, позволяя выделить его на фоне бездефектной области в процессе сканирования объекта контроля. В случае кратного

отличия частоты резонанса дефекта и частоты стимулирующего сигнала, в амплитудно-частотном спектре возникают нелинейные субгармоники, позволяющие идентифицировать неоднородность.

При наличии в зоне повреждения нескольких характерных резонансных частот происходит их классическое вырождение посредством нелинейного сложения. В таком случае, каждая нелинейная частота указывает на нелинейные свойства системы, позволяя идентифицировать и характеризовать дефекты. С целью повышения достоверности исследований в данном случае также допускается применение метода конечных элементов для моделирования акустических процессов в исследуемой системе, а также рекомендуется проведение экспериментального модального анализа [47]. Фактически, резонансный подход к активации отклика дефекта позволяет провести более подробную оценку состояния повреждений, по сравнению с мощной УЗ стимуляцией на постоянной частоте возбуждающего сигнала, что показано в работах И.Ю. Солодова и Г. Буссе [47-50], а также Д.А. Дерусовой [42, 51-53].

### **1.5 Визуально-оптический контроль**

Визуально-оптический метод относят к одному из самых простых и доступных методов контроля, однако экспрессность и простота метода долгое время была ограничена возможностями человеческого зрения. Со временем данные ограничения были устранены посредством использования оптических приборов, что повысило эффективность тестирования. Данный метод приобрел название визуально-оптического, включая рефрактометрию, интерферометрию, лазерные и голографические методы контроля.

Принцип визуально-оптического контроля основан на изучении взаимодействия поверхности исследуемого материала со световым излучением. В современных системах применяют разделённые полу- или полностью автоматизированные синхронизованные осветительные и

информационные каналы [54], шерографию [55], сканирование поверхности лазерным микроскопом-зондом [56].

Простота визуально-оптического метода контроля является одним из его главных преимуществ. Качество исследований в данном случае определяется качеством используемого оборудования. К недостаткам можно отнести ограничения обнаружения скрытых и подповерхностных дефектов в непрозрачных материалах. В связи с этим, данный метод относят к видам предварительного тестирования, а для более глубокого анализа дефектов требуется применение иных методов НК.

## **1.6 Радиоволновой контроль**

В основе радиоволнового контроля лежит анализ взаимодействия электромагнитного излучения радиоволнового диапазона с объектом испытаний. Наиболее широкое распространение на практике получил метод контроля в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне. Указанный метод позволяет осуществлять как двухсторонний, так и односторонний НК материалов. При этом, результаты тестирования представляют данные о внешней и внутренней структуре материала, его составе, наличии неоднородностей. Метод устойчив к помехам от большинства сторонних объектов и собственной температуре контролируемого объекта. Возможно проведение исследований в вакууме. Диэлектрические свойства исследуемого материала и его дефектов во многом определяют выбор конкретного метода радиоволнового НК.

Малая глубина взаимодействия электромагнитных волн с металлическими объектами из-за эффекта «скин-слоя» является ключевым недостатком радиоволнового НК. Наряду с этим, некоторые виды материалов не поддаются контролю ввиду около-нулевого взаимодействия радиоволн и материала исследуемого объекта.



## 1.7 Тепловой контроль

В основе термографических методов НК лежит исследование температурных полей, тепловых потерь, ТФХ материалов и объектов контроля. ТК разделяют на активный и пассивный [57]. В случае активного контроля используют дополнительный источник для тепловой стимуляции исследуемого объекта. Пассивный контроль в свою очередь включает анализ собственного температурного поля объекта, а также стационарный и нестационарный (динамический) режимы, различающиеся характером температурно-временной зависимости. Возможность обнаружения дефектов в конкретных видах материалов без дополнительного источника стимуляции являются ключевыми факторами выбора различных методов ТК.

Контроль качества ПКМ, как правило, проводится активным методом ТК в нестационарных режимах. Таким образом может быть получена информация о наличии характерных для слоистых материалов дефектов (в том числе и подповерхностных), а также их положения, размеров, глубины залегания [59, 60]. Исследование структуры композиционных материалов при ТК также позволяет определить ориентацию волокон, число слоев, состав, пористость материала и т.п. [57, 58, 59-62]. Однако важно отметить, что ТК композитов имеет ограничения по толщине изделий до 20 мм [58]. К недостаткам метода также следует отнести неравномерность нагрева, что может вызвать низкий контраст температуры на ИК изображении и, соответственно, повышает трудоемкость выделения полезного сигнала на фоне шумов.

### Синхронное детектирование (Lock-in метод)

Одним из современных способов повышения точности регистрируемого теплового сигнала является использование принципа «Lock-in» для амплитудно-частотной модуляции сигнала. Его суть заключается в синусоидальной модуляции возбуждаемого сигнала (при ультразвуковой/тепловой стимуляции) исследуемого образца с

использованием «Lock-in» генератора, синхронизованного с ИК камерой, регистрирующей последовательность термограмм, характеризующихся определенными амплитудой и фазой. Обработка полученных данных с использованием преобразования Фурье позволяет устранить шумы, которые связаны с нагревом объекта контроля вследствие УЗ или оптической стимуляции [57, 58].

### **1.8 Синтез данных**

В настоящее время вопрос объединения (комбинирования, синтеза) данных различных методов НК является актуальной задачей научно-практических исследований. Согласно статистике, в период с 1990 по 2020 год было опубликовано 134 статьи, рецензируемые в базе данных Scopus, по теме «NDT Data fusion» - синтез данных в неразрушающем контроле. Количество статей по теме синтеза данных составляет примерно 9.6% от общего количества опубликованных статей (1398 шт.) по теме «nondestructive testing» - неразрушающий контроль, также рецензируемых в базе данных Scopus за указанный период. Распределение количества статей по годам приведено на рисунке 1.2. Согласно графику, внимание научного сообщества к теме синтеза данных растет, что определяет актуальность проведения научных исследований в указанной области знаний.

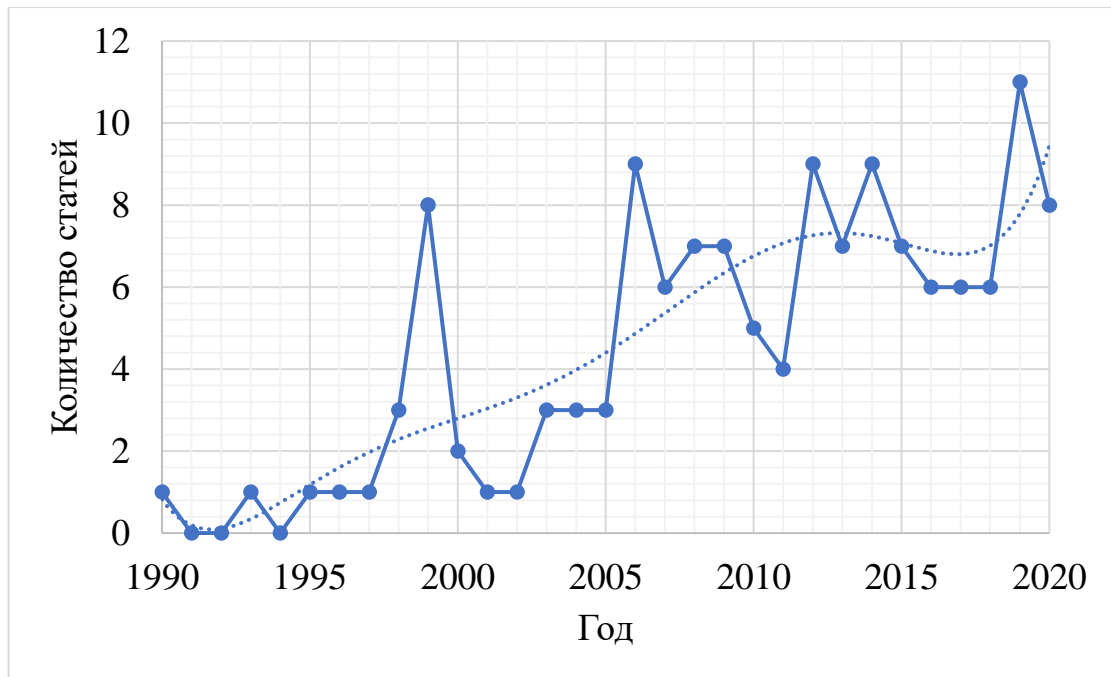


Рисунок 1.2 – Распределение опубликованных научных статей, рецензируемых в базе данных Scopus, по теме «синтез данных в неразрушающем контроле» в период с 1990 по 2020г.

Основным способом объединения данных является подготовка соответствующего программного обеспечения. В последние годы наибольшую популярность приобретают алгоритмы работы нейронных сетей, применяемые к предварительно обработанным данным с целью распознавания дефектов в материалах [62-64]. К достоинствам метода следует отнести доступность и простоту разработки и автоматизации подобных программ для синтеза данных. К недостаткам метода, в свою очередь, относят трудозатраты на «обучение» алгоритма, представленного в виде обработки большого массива данных. Также допустимы ошибки работы системы, которые необходимо корректировать вручную, особенно на начальном этапе обучения программы.

## 1.9 Выводы по Главе 1

1. В настоящей главе описаны методы НК, применяемые для исследования дефектов в ПКМ, широко используемых в ракетно-космической и авиационной промышленности. В частности, рассмотрены достоинства и

недостатки акустического, теплового, радиационного и других методов НК применительно к обнаружению неоднородностей в слоистых ПКМ.

2. Приведен обзор новых и усовершенствованных традиционных методик синтеза данных в НК, а также результатов научно-практических исследований в области анализа и синтеза данных. Описаны последние достижения исследователей при создании программно-аппаратных комплексов автоматической обработки и синтеза данных, полученных несколькими методами НК с целью повышения информативности результатов тестирования. Проанализировано статистическое распределение публикационной активности в базе данных Scopus в указанной области знаний в период с 1990 по 2020 гг.

## **ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЛОЩАДИ ДЕФЕКТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

Согласно ГОСТ Р53697-2009, дефектом признается нарушение сплошности физической структуры материала, выраженное в виде естественных или искусственных разрывов. Указанное отклонение показателей качества от установленных значений может возникнуть как в процессе производства, так и во время эксплуатации изделия, что приводит к изменению физических свойств материала в указанной области по сравнению с бездефектной зоной. Экспериментальное исследование характеристик и свойств объекта с использованием различных методов НК позволяет распознавать дефекты различного происхождения, определять их характер, вид, формы и размеры. В результате проведения испытаний, оператором принимается решение о том, является ли дефект значимым, либо относится к незначимым или ложным, что определяет дальнейшие рекомендации для эксплуатации изделий. Определение размеров дефекта по показаниям НК, в свою очередь, является одним из факторов, определяющих качество методики испытаний.

В рамках настоящей работы для унификации и автоматизации процедуры распознавания дефектов по результатам неразрушающего контроля разработан алгоритм синтеза данных различных методов НК, позволяющий автоматически определять характеристики дефектов по данным, представленным на графических изображениях, а также повысить информативность результатов контроля.

### **2.1 Распознавание дефектов оператором**

Одним из возможных критериев оценки повторяемости выбора оператором некоего параметра (дефекта) является бинарная мера сходства, или так называемый «коэффициент Жаккара» или «мера Жаккара» [65]. В

данном случае, оператор указывает область дефектов на нескольких вариантах представленных данных, часть из которых намеренно повторяются.

В случае проведения обследования материалов и изделий с использованием нескольких методов НК, анализу подлежат результаты тестов, отличающиеся по способу физического воздействия на объект и получению первичных данных. В частности, при проведении синтеза данных ТК и ЛВ такими данными являются термо- и виброграммы, которые могут отличаться по масштабу, ориентации или цветовой палитре. Тогда, эффективность неразрушающей оценки оператора ( $K$ ) можно оценить в виде отношения количества выявленных дефектов на изображениях к их суммарному количеству:

$$K = \frac{A \cap B}{A \cup B}, \quad (2.1)$$

где  $A$  и  $B$  – количество выявленных дефектов на первой и второй диаграмме соответственно. Тогда значение  $K=1$  будет соответствовать 100% повторяемости выбора.

Учитывая специфичность бинарного выбора (наличие/отсутствие дефекта), можно воспользоваться аналогичным усовершенствованным методом - «критерием Танимото» ( $T$ ), описанным в работе [66]. Данный критерий рассчитывают в виде отношения выявленных элементов к невыявленным:

$$T = \frac{C}{A+B-C}, \quad (2.2)$$

где  $C$  – количество дефектов, выявленных одновременно на двух различных экспериментальных диаграммах, полученных по результатам проведения НК.

В работе [67] показано, что повторяемость результатов распознавания дефектов носит субъективный характер и зависит от личного опыта работы оператора. В связи с этим, для нивелирования человеческого фактора авторами был предложен алгоритм анализа данных, позволяющий проводить обработку результатов в полуавтоматическом режиме.

## 2.2 Распознавание дефектов по параметру SNR

Одним из способов установления вида, формы и размеров дефектов по результатам НК является параметр «отношение сигнал/шум» (SNR) — отношение мощности полезного сигнала к мощности шума. Указанный параметр определяется отношением среднеквадратичной величины амплитуды измеренного сигнала в дефектной области ( $A_d$ ) к бездефектной области ( $A_{nd}$ ) из выражения [68, 69]:

$$SNR_1 = \frac{\overline{A_d - A_{nd}}}{\sigma_{nd}}, \quad (2.3)$$

где  $\sigma_{nd}$  — дисперсия амплитуды сигнала в бездефектной зоне.

При проведении ТК результаты испытаний представляются в виде массивов данных, как правило, содержащих температурно-временные зависимости. В этом случае выражение (2.1) принимает вид:

$$SNR_2 = \frac{\Delta T(t)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \overline{\Delta T_{in}^2}}}, \quad (2.4)$$

где  $\Delta T(t)$  - дифференциальный температурный сигнал,  $\overline{\Delta T_{in}^2}$  - дисперсия шумовых сигналов от  $N$  некоррелированных источников тепла.

Для отображения результатов ТК графическим методом используется классический подход: создается шкала от минимального до максимального значения сигнала с градиентом цветов соответственно выбранной палитре. Результатом контроля является последовательность ИК изображений, анализ которой позволяет определить изменение температуры на поверхности материала во времени. В данном случае каждая отдельная термограмма отображается в виде пиксельного графического изображения с соответствующими значениями температуры в конкретный момент времени, как показано на примере ТК углепластикового композита с ударным повреждением энергией 18 Дж в центре (рис. 2.1).

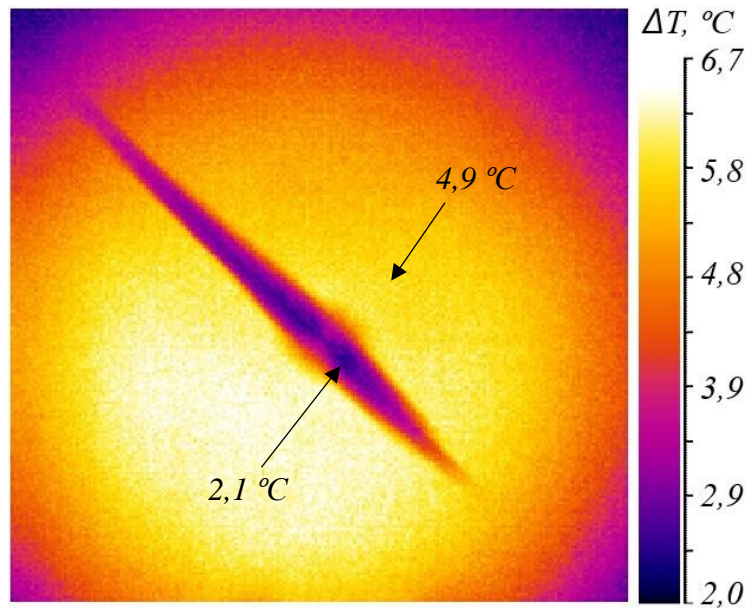


Рисунок 2.1 – Термограмма углепластикового композита с ударным повреждением энергией 18 Дж при проведении теплового нагрева.

Как видно из рис. 2.1, температурный сигнал распределяется на поверхности материала неравномерно, что связано с неравномерностью нагрева и неоднородностями материала в процессе проведения ТК. Для исключения влияния указанного эффекта на результаты контроля необходима предварительная обработка массива данных: нормализация (вычитание исходных/шумовых величин), сглаживание (фильтрация) и пост-обработка последовательностей термограмм (методами преобразования Фурье, главных компонент и др.). Для повышения точности распознавания дефектов анализ данных проводят с учетом выбора бездефектной области материала вблизи «подозрительных» неоднородностей.

Несмотря на использование различных методов предварительной обработки данных, исключение влияния условий проведения эксперимента на результат тестирования является актуальным вопросом для корректного определения характеристик дефектов и их значимости. В частности, дефекты, характеризующиеся величиной  $SNR$  близкой к пороговому ( $SNR > 2$ ), из-за влияния условий проведения эксперимента, могут быть отнесены к не критическим или ложным, в то время как фактически они не удовлетворяют



установленным критериям допуска конкретного изделия. Таким образом, заданная оператором заранее пороговая величина  $SNR$  определяет надежность испытаний [70]

Проведение синтеза данных нескольких методов НК позволяет минимизировать вероятность возникновения ошибок различного типа ввиду того, что способ физического воздействия и условия проведения эксперимента в данном случае будут отличаться для каждого конкретного метода контроля, а автоматизация процесса распознавания дефектов позволит повысить точность результатов, производительность контроля, а также исключить субъективный характер анализа данных.

### **2.3 Работа с графическим представлением данных**

В рамках настоящей работы разработан алгоритм автоматического распознавания дефектов и определения их формы и размеров путем анализа результатов различных методов НК, приведенных в графическом виде, а также путем осуществления их синтеза.

В качестве информативного параметра для анализа графических изображений в настоящей работе используется растровое кодирование цветов (RGB-модель). Как известно [71], каждый пиксель изображения описывается интенсивностью трех составляющих цвета (для растровой кодировки цвета) – красный, зеленый и синий сигналы (RGB-модель). Причем интенсивность цвета представляется в виде одного октета (одного байта), значения которого обозначаются целыми числами от 0 (минимальная интенсивность) до 256 (максимальная интенсивность) в разных пропорциях красного, синего и зеленого цветов. Например, кодирование ярко-синего цвета можно представить в виде (0,0,255), а красного цвета как (255,0,0).

RGB-модель кодирования изображения используется в рамках данного исследования для разработки алгоритма автоматического распознавания дефектов. В частности, проводится сравнение RGB составляющих каждого пикселя согласно алгоритму, определяющему приоритет цветов в

используемой палитре. На основании значения ключевой составляющей пикселя производится процедура распознавания дефектов. Указанный подход также обеспечивает возможность обработки последовательности графических изображений (диаграмм). Следовательно, при наличии информации о времени и частоте регистрации данных, становятся доступными методы обработки и интерпретации данных, не применимые в явном виде к исходным графическим изображениям.

Важно также отметить, что приоритетным является использование цветного изображения для анализа данных по сравнению с черно-белыми результатами НК (выравнивание  $R=G=B$ ). Это связано с тем, что преобразование цветного изображения в черно-белое приводит к совпадению насыщенности некоторых оттенков в RGB-модели и, значит, потере информации и снижению точности анализа данных.

#### **2.4 Назначение программы DeFinder**

Разработанная в рамках настоящего исследования программа Defect Finder (DeFinder) предназначена для анализа графических изображений в различных форматах (\*.bmp, \*.jpg, \*.jpeg), получаемых при проведении НК материалов и изделий. Результатом работы программы DeFinder является изображение дефекта на белом фоне, либо на исходном изображении выбранного метода НК, а также (опционально) рассчитываемая величина площади дефекта. Для этого оператор должен задать один из перечисленных параметров исследуемого образца: длину, ширину или расстояние между условными контрольными метками. Данные заносятся в соответствующее поле в ПО.

Для реализации алгоритма использовалась программная среда C++. Алгоритм, приведенный на рисунке 2.2, в общем виде отражает принцип анализа данных, реализованный в программе.

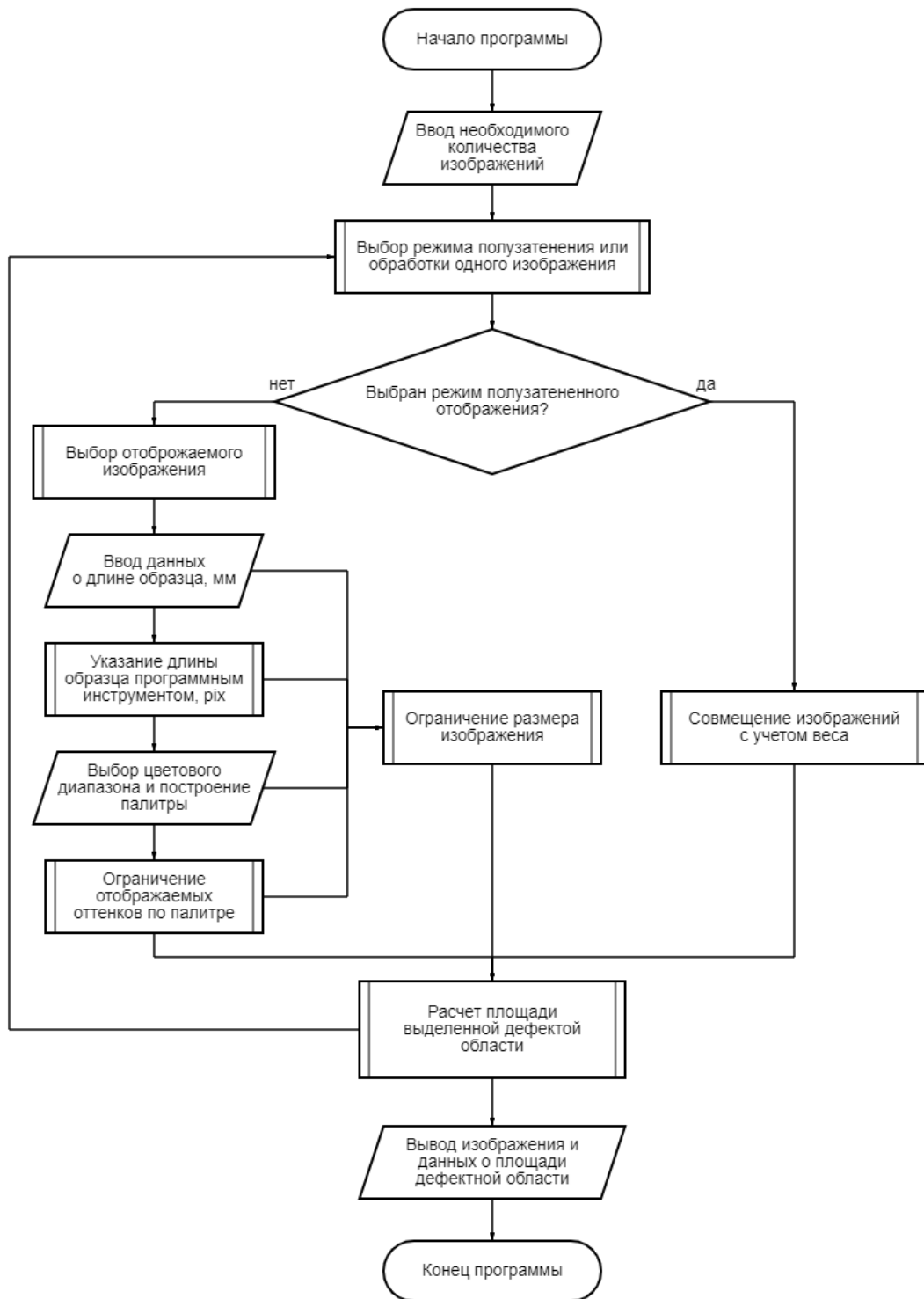


Рисунок 2.2 – Блок-схема алгоритма распознавания и расчета площади дефектов в программе DeFinder.

При загрузке изображения в ПО каждому пикселю присваивается вес, равный логической единице. На появившемся рабочем поле оператору необходимо указать длину тестового образца (если необходимо рассчитать

площадь дефекта, в другом случае этот и следующий пункты можно пропустить). Далее, с помощью специального инструмента, оператор указывает расстояние на изображении с целью расчета количества пикселей, залегающих в указанном диапазоне (от угла до угла для указания длины/ширины образца / расстояние между контрольными метками). Далее, с помощью специальных полей, оператор указывает два цвета для построения градиентной палитры: первый – в центре дефекта, второй – в бездефектной области. По выбранным цветам программа производит расчет градиентного перехода цветов и строит поле двухцветной градиентной палитры. После построения палитры оператору предлагается задать контрольными метками границы области цвета дефекта, в соответствии с заданным значением уровня сигнал/шум. Все пиксели изображения, имеющие цвета, оказавшиеся за пределами меток, будут заменены на белый цвет, а их вес будет обнулен. Сравнение идет по трем цветам, типичным для растровой графики, а именно: R – красный, G – зелёный, B – синий элементы. Далее программа рассчитывает наибольший по значению (если он не равен 255) элемент и назначает его «главным». Далее проводят анализ данных по наибольшему расчетному значению элементов. В случае, если на границе нескольких цветов определить «главный» элемент невозможно, программа проводит дополнительное сравнение по двум оставшимся цветам. Также для оптимизации размера анализируемого изображения, оператор может выполнить кадрирование путем ограничения области прямоугольной рамкой. После осуществления необходимых операций производится расчет площади дефекта, представление данных и сохранение итогового изображения.

Для осуществления синтеза данных необходимо выбрать режим «полузатененного наложения». Для этого предварительно необходимо обработать исходные изображения для получения карт дефектов. При подсчете итоговой площади дефекта используется иной подход по отношению к весу пикселей: рисунок анализируется программой в виде оттенков серого. Для этого осуществляется построение черно-белых изображений, не

визуализированных для пользователя, но расположенных соответственно исходному изображению. При этом, вес каждой ячейке задается с точностью до 5%, в зависимости от насыщенности цвета в диапазоне от 0 до 100%. Оператор определяет диапазон исключаемых значений, задавая число от 0 до 100 в соответствующем поле. Все пиксели со значением веса ниже порогового не отображаются на итоговом кадре и не используются при подсчете размеров дефекта. Результатом работы подпрограммы является синтезированное изображение результатов проведения неразрушающего контроля исследуемого объекта несколькими методами диагностики.

## **2.5 Валидация алгоритма автоматического распознавания дефектов**

Для валидации программы были созданы тестовые изображения различной цветовой палитры с фиксированными размерами.

Основными направлениями тестирования были выбраны:

- чувствительность ограничения дефектной зоны исходного изображения;
- погрешность вычисления площади дефектной зоны.

Вышеперечисленные тесты были проведены как для обработки отдельных изображений, так и для анализа различных комбинаций цветов, что позволило провести верификацию работы подпрограмм. Ключевым требованием ко всем тестам была повторяемость результатов тестирования, что позволило определить границы применимости разработанного алгоритма, описанного в настоящей работе.

Первый этап тестирования программы DeFinder заключается в анализе погрешностей выделения «дефектных» областей и расчете их площади по монохромным изображениям различных палитр цветов. Результаты тестирования программы приведены в таблице 2.1. В первом столбце указан уровень порогового сигнала (уровень, %), согласно которому требуется ограничить изображения: «Н» - дефектной зоной считается самый темный оттенок (нижний); «В» – дефектной зоной считается самый светлый оттенок

(верхний). Латинскими буквами обозначены следующие палитры монохромных изображений: R – красный, G – зеленый, B – синий, P – фиолетовый, Y – желтый, T – бирюзовый, Gr – серый. Размер изображения каждой монохромной палитры составил  $1000 \times 1000$  pix<sup>2</sup>, что эквивалентно  $100 \times 100$  мм<sup>2</sup>.

Таблица 2.1 – Графические результаты определения «дефектных» областей по монохромным изображениям различных палитр цветов в программе DeFinder.

Уровень, %	R	G	B	P	Y	T	Gr
100 H							
75 H							
50 H							
25 H							
75 B							
50 B							
25 B							

Согласно полученным данным (табл. 2.1), 100% изображений были обработаны программным обеспечением корректно: ограничение размера изображения было выполнено согласно заданному уровню порогового значения. Важно отметить, что вычисление области дефекта может быть выполнено как для светлого, так и для темного, диапазонов оттенков в соответствии с заданным значением.

Далее, области монохромных изображений, ранее ограниченные по заданному уровню порога (табл. 2.1), были использованы для расчета площади «дефектных» областей в программе DeFinder. Анализ данных позволил рассчитать площади дефектов для различных палитр цветов. Полученные результаты приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Расчет площади «дефектных» областей по монохромным изображениям различных палитр цветов в программе DeFinder.

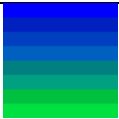
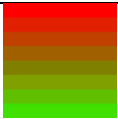



















Уровень, %	R, мм <sup>2</sup>	G, мм <sup>2</sup>	B, мм <sup>2</sup>	P, мм <sup>2</sup>	Y, мм <sup>2</sup>	T, мм <sup>2</sup>	Gr, мм <sup>2</sup>
100 H	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
75 H	7500	7500	7500	7500	7500	7500	7500
50 H	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
25 H	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500
75 B	7500	7500	7500	7500	7500	7500	7500
50 B	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
25 B	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500

По результатам определения площади «дефектных» областей по монохромным изображениям различных палитр цветов в программе DeFinder получено, что расчет площади дефектов на изображении был выполнен корректно согласно заданному уровню порогового значения. Полученные данные подтверждают верификацию работы алгоритма программного обеспечения DeFinder на основе анализа тестовых графических изображений.

Второй этап тестирования программы DeFinder заключается в анализе точности определения «дефектных» областей и их площади по цветным изображениям с градиентной палитрой цветов. Исследование градиентного перехода цветов проводили на основе анализа упрощенной ступенчатой модели изображения двухцветного типа. Указанное упрощение принято с

целью верификации алгоритма определения «дефектных» областей и расчета их площади в рамках тестирования. Для тестирования программы были использованы цветные изображения двухцветных градиентных палитр трех типов: BG – сине-зеленая, RG – красно-зеленая, RB – красно-синяя. Размер каждого изображения составил  $1000 \times 1000 \text{ pix}^2$ , что эквивалентно  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ . Результаты определения «дефектных» областей и расчета их площади в программе DeFinder приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Определение «дефектных» областей и расчет их площади по цветным изображениям с градиентной двухцветной палитрой в программе DeFinder.

Уровень, %	BG	BG, мм <sup>2</sup>	RG	RG, мм <sup>2</sup>	RB	RB, мм <sup>2</sup>
100 H		10000		10000		10000
75 H		7500		7500		7500
50 H		5000		5000		5000
25 H		2500		2500		2500
75 B		7500		7500		7500
50 B		5000		5000		5000
25 B		2500		2500		2500

Из результатов, представленных в таблице 2.3, следует вывод о корректности алгоритма определения «дефектных» областей и расчета их площади по цветным изображениям с градиентной палитрой в программе DeFinder. Несмотря на принятое упрощение ступенчатого градиентного



перехода цветов, результаты тестирования программы подтверждают применимость алгоритма для оценки характеристик дефектов по графическому изображению, характеризующимся плавным градиентным переходом. В целом, алгоритм работы программного обеспечения DeFinder является пригодным для обработки монохромных и градиентных графических изображений с целью определения площади дефектных областей в соответствии с заданным уровнем порогового значения.

## **2.6 Апробация программы на примере анализа дефектов в полимерных композиционных материалах**

Апробация программного обеспечения DeFinder проведена на примере анализа дефектов различного происхождения в полимерных композиционных материалах по результатам ТК и ЛВ. Объектом исследования являлись два образца стеклопластикового композита с дефектами различного происхождения (воздушная полость, вспененный наполнитель, непрочлей, смола) – образец №1, а также с дефектами в виде несквозных отверстий круглой формы – образец №2.

Результаты ТК образца №1 представлены в виде контрастного ИК изображения и приведены на рис. 2.3(а), в то время как результаты ЛВ образца №2 представлены изображением распределения амплитуды вибраций на поверхности композита (см. рис. 2.3 (б)). Исходные данные ТК и ЛВ были использованы для определения характеристик дефектов в программной среде DeFinder. В частности, в процессе обработки изображений использовался метод фрагментации с последующим расчетом площади дефектов. На рис. 2.3 показана локализация заложенных дефектов в образце №1 (рис. 2.3, в) и несквозных отверстий в образце №2 (рис. 2.3, г), полученные по результатам программных расчетов.

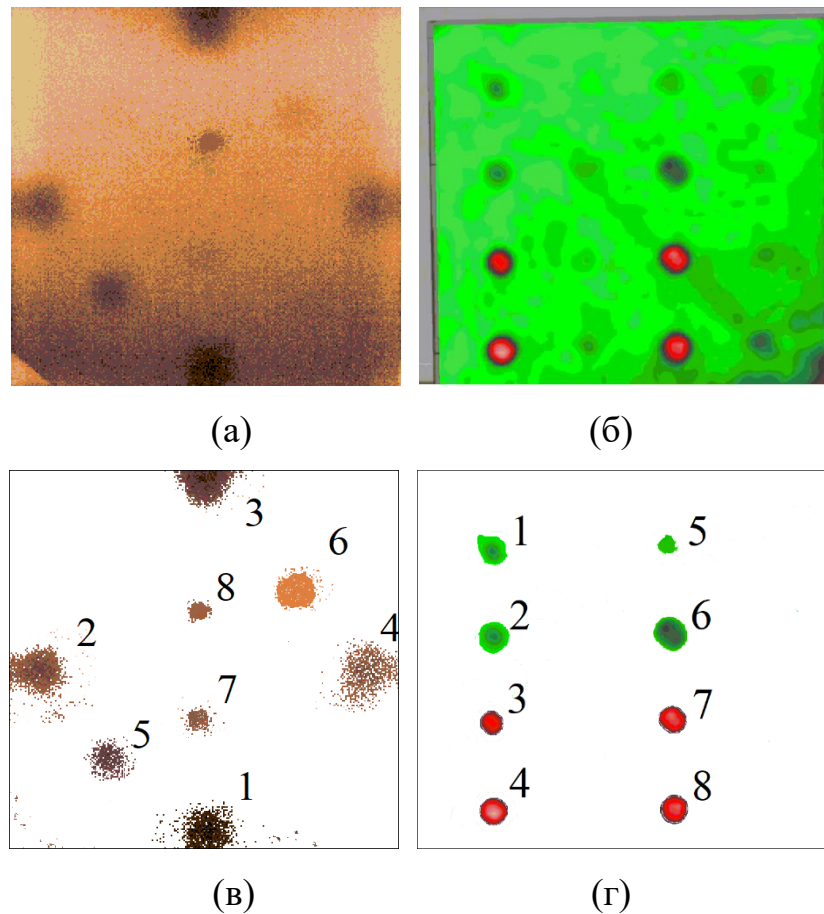


Рисунок 2.3 – Исходные данные (а, б) и обработанные программным обеспечением DeFinder (в, г) результаты ТК (а, в) образца №1 и ЛВ (б, г) образца №2.

Тестирование программы на примере анализа экспериментальных данных НК эталонных образцов стеклопластика позволило определить размер, форму и расположение дефектных зон, а также рассчитать их площади. Расчетные значения площади дефектов ( $S_d$ ), полученные в программе DeFinder по результатам ТК и ЛВ, приведены в таблице 2.4 для двух исследуемых композитов и сравнены с действительными значениями площади дефектов ( $S_{real}$ ) путем расчета относительной погрешности ( $\delta$ ).

Таблица 2.4 – Расчет площади «дефектных» областей по результатам неразрушающего контроля стеклопластиковых композитов в программе DeFinder.

Номер дефекта	ТК, образец №1			ЛВ, образец №2		
	$S_d$ , мм <sup>2</sup>	$S_{real}$ , мм <sup>2</sup>	$\delta$	$S_d$ , мм <sup>2</sup>	$S_{real}$ , мм <sup>2</sup>	$\delta$
1	590	625	5,6	435	400	8,8
2	636	625	1,8	415	400	3,8
3	642	625	2,7	396	400	1
4	588	625	5,9	403	400	0,8
5	385	400	3,8	369	400	7,8
6	439	400	9,8	438	400	9,5
7	109	100	9	405	400	1,3
8	101	100	1	411	400	2,8

Из экспериментальных данных следует, что полученные данные позволяют верифицировать алгоритм расчета площади дефектов по экспериментальным результатам ТК и ЛВ. Погрешность расчета площади дефектов в программном обеспечении DeFinder определяется погрешностью измерения каждого используемого метода НК с заданным уровнем порогового значения сигнал/шум.

В рамках проверки функционирования алгоритма комбинирования данных в программе DeFinder было проведено тестирование графических изображений, полученных по результатам ТК и ЛВ. Исследование проводилось на примере анализа ударных повреждений в углерод-углеродном композите (рисунок 2.4, а), а также искусственных дефектов в стеклопластиковом композите (рисунок 2.4, б).

При контроле углерод-углеродного композита первоначально было проведено автоматическое распознавание ударных повреждений по заданному уровню  $SNR=2$  на основе данных ТК (синий цвет) и ЛВ (красный цвет). Далее обработанные изображения были использованы для объединения полезных

сигналов от дефектов, обнаруженных двумя методами НК и наложения результатов тестирования на исходную ИК термограмму углерод-углеродного композита (рис. 2.4, а).

При исследовании стеклопластикового композита с заложенными дефектами также была проведена процедура автоматического распознавания дефектов по результатам ТК и ЛВ (синий и красный цвет дефектов соответственно). Важно отметить, что в данном случае комбинирование результатов двух методов НК проводилось их при наложении на изображение распределения амплитуды вибраций на поверхности стеклопластикового композита, полученного по результатам ЛВ (рисунок 2.4, б).

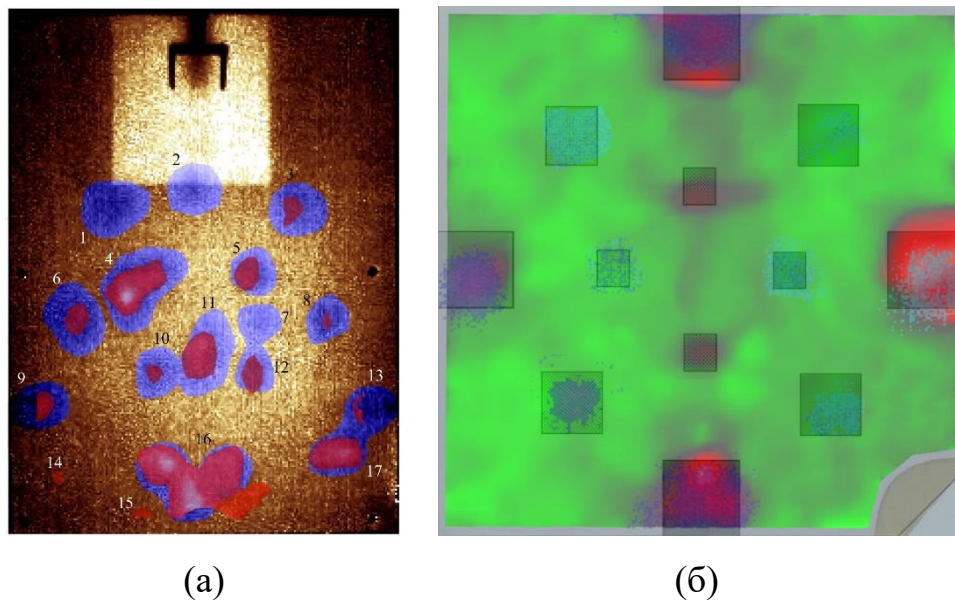


Рисунок 2.4 – Объединение результатов ТК (синий цвет) и ЛВ (красный цвет) углерод-углеродного композита с ударными повреждениями (а) и стеклопластикового композита с заложенными дефектами (б).

Как видно из рисунка 2.4, операция объединения результатов нескольких методов НК, реализованная в программе, работает корректно. Полученные данные подтверждают верификацию алгоритма объединения данных, реализованного в программном обеспечении DeFinder.

По результатам тестирования следует отметить следующие достоинства разработанного программного обеспечения DeFinder:

- унификация и частичная автоматизация метода обработки графических результатов НК с целью снижения влияния человеческого фактора на анализ данных;
- реализация возможности пост-обработки последовательности массива данных графических методов контроля с использованием преобразования Фурье и метода главных компонент;
- повторяемость результатов при соблюдении протоколирования исследований;
- возможность работы с различными цветовыми диапазонами без снижения разрешения изображения и точности измерений.

К недостаткам работы алгоритма анализа данных относятся:

- ограничение допустимого формата изображений: \*.bmp, \*.jpg, \*.jpeg;
- осуществление выборки цветового диапазона дефектной области оператором.

## **2.7 Выводы по Главе 2**

В настоящем исследовании разработан алгоритм автоматического распознавания границ дефектов и расчета их площади по результатам нескольких методов НК, представленных в графическом формате, а также объединение полученных данных на основе исходных данных одного из рассматриваемых методов. Соответствующие алгоритмы анализа данных реализованы в программном обеспечении Defect Finder (DeFinder), предназначенном для обработки графических изображений в различных форматах (\*.bmp, \*.jpg, \*.jpeg), которые получают в результате проведения НК. Алгоритм является охраняемым результатом интеллектуальной деятельности (РИД) [72].

При апробации вышеуказанной программы установлено, что разработанный алгоритм программного обеспечения DeFinder является пригодным для анализа монохромных и градиентных графических изображений с целью определения площади дефектных областей в соответствии с заданным уровнем порогового значения. Программа предназначена для работы операторов 2-го уровня квалификации (в системе Ростехнадзора) и позволяет оценивать дефекты в соответствии с погрешностью измерения каждого используемого метода НК с заданным уровнем порогового значения сигнал/шум.

### ГЛАВА 3. СИНТЕЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ТЕПЛОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ

В настоящее время композиционные материалы широко используются в ракетно-космической, авиационной, транспортной промышленности, что обусловлено их улучшенными механическими свойствами по сравнению с традиционными конструкционными материалами. В частности, ПКМ отличаются низкой удельной массой, высокой прочностью, устойчивостью к высоким температурам, а также коррозионной стойкостью по сравнению с металлами, древесиной, стеклом, керамикой и др. Постоянное развитие технологий изготовления и состава ПКМ определяет актуальность НК с целью обеспечения высокого качества изделий из ПКМ как в условиях их производства, так и в процессе эксплуатации.

В связи со слоистой структурой ПКМ, возможные в эксплуатации ударные повреждения образуют зоны структурных неоднородностей пирамидальной формы с множеством отдельных расслоений, площадь которых возрастает по мере увеличения глубины залегания дефекта [60, 61]. Главной проблемой обнаружения дефектов указанного типа является преимущественное расположение области расслоения на стороне изделия, противоположной месту нанесения удара. В частности, площадь дефекта на задней стороне композита может на порядок превосходить площадь расслоения на передней стороне пластины [58]. В данном случае получение достоверной информации о расположении и геометрических размерах неоднородности имеет критически важное значение для корректного прогнозирования срока эксплуатации изделия.

Для повышения достоверности результатов испытания традиционно проводят с использованием нескольких методов НК, включая процедуры синтеза данных (data fusion). Таким образом, осуществляют сбор данных, позволяющих получить наиболее полную информацию о наличии дефектов в изделии, их типе, размерах, глубине залегания и т.д. В условиях лабораторных

исследований указанный подход находит широкое применение, в то время как возможность проведения синтеза данных нескольких методов НК при техническом контроле на промышленных предприятиях и производствах в настоящее время является затруднительным. В условиях высокой загруженности производственных циклов крайне важным является сокращение времени проведения тестирования при сохранении достоверности результатов диагностики качества. В связи с этим, создание оптимизированной методики синтеза данных нескольких методов НК для промышленного применения в настоящее время является актуальной задачей научно-исследовательских работ.

В настоящей главе процедура синтеза данных рассмотрена на примере совместного использования результатов активного ТК, использующего оптическую стимуляцию, и ЛВ, использующей акустическую стимуляцию тестовых образцов ПКМ с нормированными дефектами.

### **3.1. «Классический» тепловой контроль при оптической стимуляции**

В Главе 1 отмечалось, что в основе ТК лежит исследование температурного поля на поверхности объектов контроля, аномалии которого являются индикаторами дефектов, в том числе скрытых. Информативными признаками дефектности являются как особенности динамического изменения амплитуды температурных полей, так и специфические времена теплопередачи. Важно отметить, что в ТК различают активный и пассивный, а также стационарный и нестационарный (динамический) режимы (способы), характеризующиеся специфическим видом регистрируемой температурно-временной зависимости. Для проведения активного ТК используют дополнительный источник тепловой стимуляции исследуемого объекта, в то время как при пассивном способе контроля исследуют температурное поле объекта, сформировавшееся в процессе его функционирования. Ввиду указанных особенностей, дефекты, выделяющие или поглощающие тепловую



энергию, также разделяют на активные и пассивные. Характер зависимости температуры дефекта от времени в свою очередь определяет необходимость применения конкретного способа контроля и связан со способностью структурных неоднородностей создавать информативный температурный сигнал без дополнительной стимуляции.

Использование двухсторонней процедуры контроля позволяет определить температуропроводность материала импульсным методом (Паркера) и повысить эффективность выявления дефектов. Указанный метод является одним из основных в зарубежных исследованиях по определению температуропроводности из-за высокой достоверности измерений [58], которая достигается путем учета теплоотдачи на границе сред, габаритов исследуемого объекта, а также обоснованного выбора момента регистрации температуры и временного периода оптической стимуляции. Помимо измерения температуропроводности, указанный метод предоставляет возможность оценить количество энергии, поглощенной материалом в процессе оптического нагрева [60]. Более того, с учетом известных коэффициентов теплопроводности ( $K$ ), температуропроводности ( $\alpha$ ), а также плотности ( $\rho$ ) исследуемого материала, можно определить его теплоемкость ( $C$ ):

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

Резюмируя вышеизложенное, следует отметить, что использование метода активного (нестационарного) ТК для проведения контроля качества ПКМ позволяет определить ориентацию волокон, количество слоёв, состав и пористость материала, а также исследовать подповерхностные дефекты, оценив глубину их залегания и размеры [58-62]. В частности, применение оптической стимуляции позволяет обнаружить дефекты относительно большой площади (более 10 мм<sup>2</sup>, если речь идет о композитах толщиной от нескольких миллиметров), создающие значительные аномалии динамических температурных полей на контролируемой поверхности [58]. К основным

преимуществам ТК также следует отнести экспрессный характер проведения исследований, высокую детальность результатов тестирования (ограничена разрешением телевизионного оборудования и расстоянием до объекта исследования), а также бесконтактный способ проведения НК, которые применимы к большинству ПКМ, используемых в промышленности. Одним из недостатков метода является ограничение толщины исследуемых композитов и глубины залегания дефектов в них: предельное значение глубины обнаружения составляет около 3–5 мм от инспектируемой поверхности при одностороннем контроле и 5–20 мм для дефектов малой площади в случае проведения двухсторонней процедуры контроля [57-58].

В связи с тем, что регистрируемой физической величиной в тепловом контроле является температура, границы применимости метода обусловлены как температурным разрешением ИК тепловизоров (до 10 мК в исследовательских приборах), так и отношением сигнал/шум в области дефектов, причем фазовые и временные параметры чаще выступают в качестве информативного сигнала для обнаружения неоднородностей. Как правило, при проведении активного ТК оценивается выделенная или поглощенная тепловая энергия в области дефектов материала. Однако, связь параметров дефекта и отношения сигнал-шум неоднозначна [73]. Для повышения информативности результатов тестирования используют различные методы измерения и анализа ТФХ материалов. Определение ТФХ позволяет локализовать и исследовать дефекты путем составления карт ТФХ. В частности, в односторонней процедуре ТК оценивают коэффициент тепловой активности и тепловую инерцию материала, а при двусторонней – локальную температуропроводность.

К недостаткам оптической стимуляции следует отнести: 1) высокие потери энергии при исследовании материалов со светлоокрашенной или отражающей поверхностью в видимом и ближнем ИК диапазоне; 2) небольшую глубину обнаружения дефектов (до 20 мм); 3) наличие шумовых излучений после выключения источника стимуляции, что существенно

снижает эффективность ТК. Некоторые из вышеперечисленных недостатков могут быть устранены конструктивно, либо путем использования альтернативных методов НК.

### **3.2. Сканирующая лазерная Доплеровская виброметрия**

В основе метода сканирующей ЛВ лежит эффект Доплера, то есть определение сдвига частоты излучения, рассеянного на поверхности колеблющегося под воздействием акустической стимуляции объекта, как было отмечено в Главе 1. В процессе исследований образец подвергается акустической стимуляции совместно с лазерным вибросканированием контролируемой поверхности в широком спектре частот. Особенностью проведения лазерного вибросканирования является необходимость выбора оптимальных условий проведения эксперимента: обеспечение требуемого уровня отражения лазерного луча от инспектируемой поверхности, а также подбор режимов акустической стимуляции с учётом демпфирующих свойств материала и геометрии изделия.

Основными измеряемыми параметрами ЛВ являются среднеквадратичная величина амплитуды/скорости/ускорения колебаний на поверхности изделия в заданном спектре частот или заданном временном диапазоне. Результатом тестирования является амплитудно-частотный спектр, или амплитудно-временная зависимость колебаний, а также изображения распределения вибраций на поверхности объекта. Анализ данных позволяет оценить вибрации и формы колебаний изделия как на конкретной частоте стимулирующего акустического сигнала, так и в выбранном диапазоне частот.

К недостаткам метода следует отнести следующие ограничения: контроль качества массивных инертных изделий с повышенными демпфирующими свойствами, обнаружение заложенных дефектов, имеющих аналогичные свойства с материалом изделия [74], а также трудности контроля ПКМ толщиной более 16 мм [75]. Важно также отметить чувствительность метода измерения к коэффициенту отражения лазерного луча от исследуемой

поверхности. Для снижения уровня шумов при измерении вибрационного сигнала поверхность изделия должна обладать хорошими отражающими свойствами, не отличаться прозрачностью, либо иметь светоотражающее покрытие (краска, тальк или пленка). Важно отметить, что применение лазера в виброметрии позволило уменьшить область измерений вплоть до точки, ограниченной дифракционным пределом, а также повысить чувствительность к малым изменениям скорости (до единиц мкм/сек) и амплитуды колебаний (до нм) [49]. К преимуществам метода также следует отнести бесконтактный способ измерения вибраций, отсутствие влияния присоединенной массы, нечувствительность к температуре, возможность проведения измерений в различных под напряжением и в различных средах (вакууме, в воде, через стекло, на объектах под напряжением), а также возможность проведения контроля объектов сложной геометрии (автоматическое формирование пространственной сетки объекта исследования) [47-52].

### **3.3 Синтез данных лазерной виброметрии при акустической стимуляции и активного теплового неразрушающего контроля при оптической стимуляции**

Синтез данных ЛВ при акустической стимуляции и активного ТК при оптической стимуляции проводили с использованием лабораторной установки, приведенной на рисунке 3.1. Для проведения двухсторонней процедуры ТК использовали нагреватели (две галогеновые лампы суммарной мощностью 2 кВт) и инфракрасную камеру Opttris PI640 (температурное разрешение 75 мК, частота записи кадров до 120 Гц), расположенные с двух сторон от исследуемого ПКМ. Для проведения ЛВ использовали сканирующий лазерный виброметр PSV-500-3DHV (Polytec). Акустическую стимуляцию исследуемых материалов осуществляли с использованием пьезопреобразователя (PZT) FT-27T, закрепленного на поверхности композита, через генератор сигналов специальной формы AWG-4163 (Актаком) и амплитудный усилитель AVA-1810 (Актаком).



Рисунок 3.1 – Лабораторная установка для проведения синтеза данных теплового контроля и лазерной виброметрии.

Для обобщения результатов контроля тестовых образцов ПКМ с использованием двух вышеуказанных методов, в рамках настоящего исследования была проведена процедура синтеза данных. С использованием программного обеспечения, описанного в Главе 2 настоящей диссертации, для каждого из двух методов НК были определены дефектные зоны ударных повреждений (порядок работы с программным обеспечением описан в Приложении 1). Далее, совместив карты дефектов относительно исходного ИК изображения, было проведено амплитудное нормирование данных по уровню сигнал/шум ( $SNR$ ) и удалены фоновые изображения по критерию  $SNR > 2$  для каждого отдельного метода НК, после чего было осуществлено их сложение. Итоговые изображения подлежат последующему анализу с использованием одного из известных методов обработки ИК изображений. Результатом проведения синтеза данных является карта дефектов, отражающая распределение ударных повреждений на одном из базовых изображений, включая видимое изображение композита.

### 3.4. Количественная оценка выявляемости ударных повреждений в композитах с использованием синтеза данных

Для оценки повторяемости и достоверности результатов двух методов НК в настоящей работе было проведено исследование ударных повреждений в пластине углерод-углеродного материала (марки КМ 934-361 УУ КМ 31). Стандартное изделие имеет размер 450×350×10 мм и состоит из 14-ти слоев армирующей углеродной ткани, спеченной и спрессованной в графитной матрице. Цикл последовательных ударных повреждений с фиксированной энергией 5 Дж был осуществлен с помощью копира, применяемого при испытаниях на удар падающим грузом с направляющим механизмом ударника в виде цилиндрической трубы согласно ГОСТ 33496-2015. Пример карты дефектов приведен на рисунке 3.2.

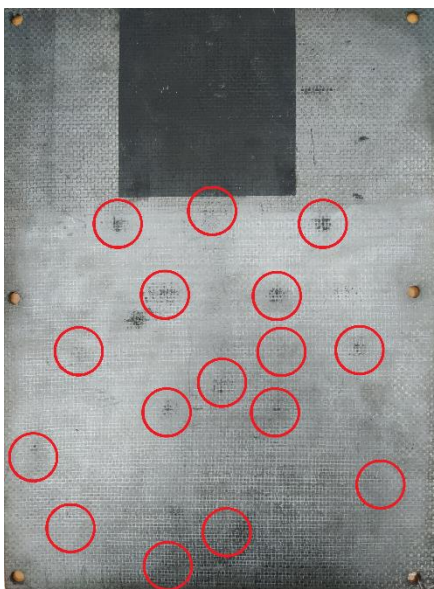


Рисунок 3.2 – Схема расположения ударных повреждений энергией 5 Дж в углерод-углеродном композиционном материале КМ 934-361 УУ КМ 31.

Исследование ударных повреждений в углерод-углеродном композите было выполнено с использованием синтеза данных двух методов НК: ЛВ при акустической стимуляции и активного ТК при оптической стимуляции.

ТК проводили с помощью ИК камеры при оптической стимуляции контролируемого объекта с использованием галогеновых ламп на расстоянии 0.4 м в течение 7 секунд. При проведении двухстороннего ТК была проведена

регистрация температурного поля на поверхности исследуемого композита во время тепловой стимуляции и в течение 30 секунд после её окончания. Анализ последовательности ИК термограмм проводили с использованием программного обеспечения ThermoLab Pro (Томского политехнического университета), включающего набор алгоритмов обработки данных, принятых в ТК [57].

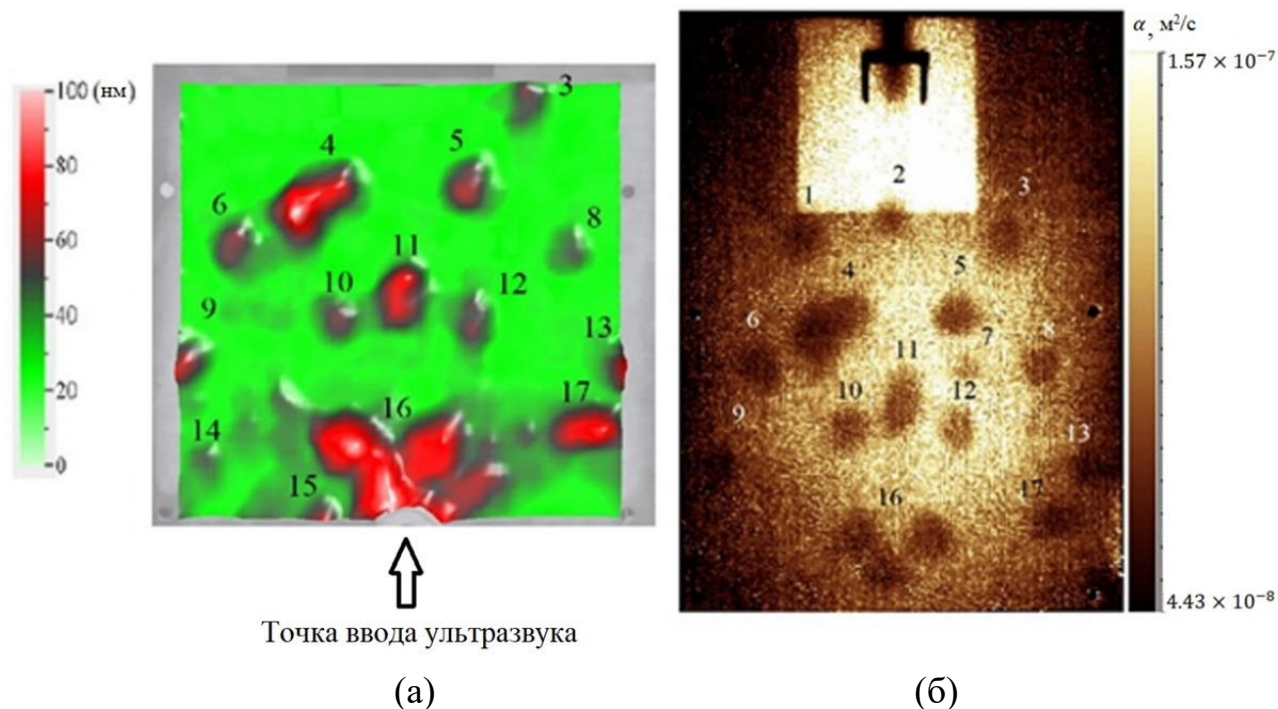


Рисунок 3.3 – Распределение амплитуд виброперемещений (а) на поверхности углерод-углеродного композита и карта его температуропроводности (б).

В результате проведения активного ТК были измерены амплитуды температурного сигнала в области ударных повреждений ( $T_{max}$ ) и в бездефектной зоне (БД), дифференциальный температурный сигнал в области дефектов ( $\Delta T$ ), а также коэффициент температуропроводности композита в области неоднородностей ( $\alpha$ ). Отношение сигнал/шум было рассчитано для каждого дефекта и показывает превышение уровня полезного сигнала дефекта ( $\alpha_d$ ) над уровнем шума ( $\alpha_{nd}$ ) в виде

$$SNR = \frac{|\alpha_d - \alpha_{nd}|}{\sigma_d}, \quad (3.2)$$

где  $\sigma_d$  – стандартное отклонение  $\alpha_d$ . Анализ карты температуропроводности иллюстрирует, что амплитуда сигнала в бездефектной области превышает аналогичное значение в зоне дефекта. Результаты экспериментальных исследований приведены в Таблице 3.1

Таблица 3.1 – Результаты проведения активного теплового контроля углерод-углеродного композита.

<b>Номер дефекта</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
$\Delta T, ^\circ C$	2.3	2.2	2.1	2	2.2	2.6	2.8	2.7	3.1
$\alpha, \times 10^{-7}$ $m^2/c$	6.77	6.16	5.75	4.49	5.98	8.74	10	9.24	10.6
$SNR(\alpha)$	5.24	6.33	7.27	11.92	6.72	3.15	2.4	2.81	2.14
<b>Номер дефекта</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>БД</b>
$\Delta T, ^\circ C$	2.1	2.6	3	2.9	*	*	2.6	2.8	4.1
$\alpha, \times 10^{-7}$ $m^2/c$	6.28	8.45	10.1	8.03	*	*	7.77	9.89	15.5
$SNR(\alpha)$	6.09	3.36	2.36	3.73	*	*	3.98	2.46	–

\*Дефект не обнаружен.

Согласно результатам ТК (рисунок 3.3б), в области ударных наблюдается снижение температуропроводности материала, что связано с отслоением подповерхностных слоев углеродной ткани в указанных зонах. Результаты ТК также отражают неравномерность распределения энергии теплового излучения (в центре пластины) и зоны недостаточного нагрева (по краям изделия), что может быть улучшено путем вычитания фоновой термограммы и последующего применения известных алгоритмов обработки данных. В связи с высоким уровнем шума в указанной зоне, расчетное значение  $SNR$  оказалось меньше принятого на основе статистических рекомендаций порогового уровня ( $SNR = 2$ ), что не позволило обнаружить дефекты №14 и 15 (рисунок 3.4). Минимальное изменение температурного сигнала на поверхности исследуемого композита наблюдалось в области дефекта № 4 и составило 2 °С. Из полученных данных также следует, что



средние величины температуропроводности бездефектной области пластины и дефектных зон различаются более чем в 6 раз, и составляют  $1.55 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с и  $8.36 \times 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с соответственно (см. рисунок 3.3б); это позволило обнаружить 15 дефектов из 17.

Испытания методом лазерной виброметрии при акустической стимуляции проводили с использованием сканирующего лазерного доплеровского виброметра PSV-500-3D-HV (Polytec). Акустическую стимуляцию осуществляли синусоидальным сигналом, модулированным в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц с использованием пьезокерамического преобразователя CCH-5938D-28LBPZT-4, закрепленного на объекте контроля. Лазерное вибросканирование проводили в режиме быстрого преобразования Фурье в диапазоне частот от 5 Гц до 100 кГц с разрешением 62,5 Гц. Количество точек измерения составило 4624, что соответствует шагу сканирования 3 мм. На рисунке 3.3 приведены результаты обнаружения ударных повреждения в углерод-углеродном композите при проведении ТК (б) и ЛВ (а).

В результате проведения вибросканирования углерод-углеродного композита было получено изображение распределения амплитуды вибраций на поверхности пластины во всем спектре измеряемых частот (рис. 3.3а). Измеренные значения виброперемещения в области дефектов приведены в таблице 3.2. Из полученных данных следует, что наличие ударных повреждений приводит к локальному увеличению амплитуды сигнала вибраций в области неоднородностей, что соответствует теории «локального резонанса дефекта», описанной в работах [47-50]. Для определения увеличения амплитуды вибраций в области дефектов ( $\Delta x_{def}$ ) за счет возникновения резонансных явлений был проведен расчет отношения сигнал/шум для каждого дефекта, которое отражает превышение уровня полезного сигнала дефекта ( $\Delta x_d$ ) над уровнем шума ( $\Delta x_{nd}$ ) в виде:

$$SNR = \frac{|\Delta x_d - \Delta x_{nd}|}{\sigma_d}, \quad (3.3)$$

где  $\sigma_d$  – стандартное отклонение  $\Delta x_{nd}$ . Напомним, что амплитуда вибраций сигнал в области дефекта превышает аналогичное значение в бездефектной зоне.

Таблица 3.2 - Результаты проведения лазерной виброметрии при акустической стимуляции углерод-углеродного композита.

Номер дефекта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta x_{def}$ , нм	*	*	69	95	75	73	*	61	78
<i>SNR</i>	*	*	2.54	3.89	2.85	2.75	*	2.13	3
Номер дефекта	10	11	12	13	14	15	16	17	БД
$\Delta x_{def}$ , нм	70	81	68	75	60	75	100	85	20
<i>SNR</i>	2.6	3.16	2.49	2.85	2.07	2.85	4.15	3.37	-

\*Дефект не обнаружен.

По результатам ЛВ получено, что локальное усиление амплитуды вибраций в области ударных повреждений составило от 3 до 5 раз (до 100нм) по сравнению со средним значением виброперемещения в бездефектной области ( $БД = 20$  нм); это позволило обнаружить 14 дефектов из 17 (см. таблицу 3.2). Метод оказался слабо чувствителен к выявлению дефектов № 1, 2 и 7 в условиях настоящего эксперимента. Можно предположить, что дефекты №1 и 2 не были обнаружены из-за удаленности дефектов от точки ввода акустического сигнала, а отсутствие дефекта № 7 на изображении вибраций, вероятно, связано с низкой степенью повреждения материала в указанной области. В то же время, результаты расчетов *SNR* показали максимальное отношение полезного сигнала вибраций в области дефекта № 16 ( $SNR = 4,15$ ), близко расположенного к месту ввода ультразвука. Полученные результаты НК композита свидетельствуют о необходимости осуществления синтеза данных двух рассматриваемых методов контроля для повышения достоверности результатов исследования и увеличения числа детектируемых дефектов.

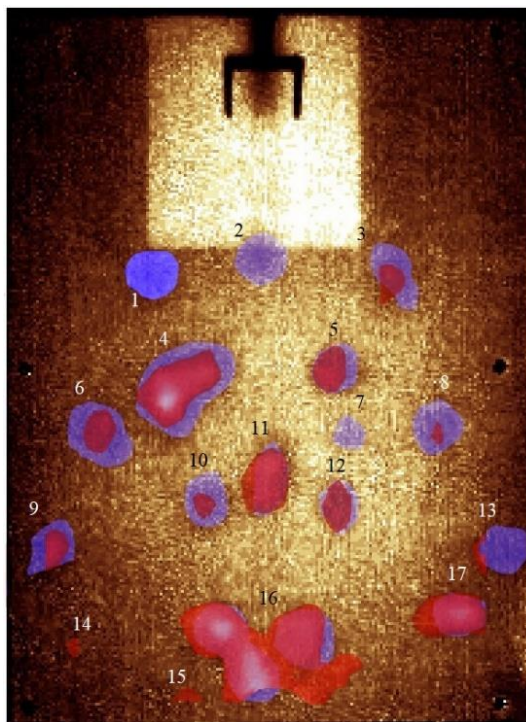


Рисунок 3.4 – Карта дефектов образца КМ 934-361 УУ КМ 31 на основе синтеза данных лазерной ультразвуковой виброметрии (красный цвет) и теплового контроля (синий цвет).

Результаты синтеза данных лазерной виброметрии при акустической стимуляции и теплового контроля при оптической стимуляции, приведенные на рисунке 3.4, позволили создать карту дефектов образца КМ 934-361 УУ КМ 31. На примере дефектов №3, 6, 8-10 и 13 показано, что области неоднородностей, определенные двумя методами НК отличаются между собой, что, вероятно, обусловлено разными физическими принципами, лежащими в основе методов исследований. Ключевым моментом является взаимное дополнение результатов тестирования, полученных при обнаружении дефектов №1, 2, 7 методом ТК и дефектов №14, 15, 17 при проведении ЛВ. Важно также отметить, что дефекты с максимальным отношением сигнал/шум характерны для неоднородностей с наибольшими геометрическими размерами (№ 2-5, 10, для ТК, №4, 11, 16 для ЛВ). Указанные дефекты были выявлены двумя методами НК и могут свидетельствовать о высокой степени повреждения контролируемого изделия.

По результатам синтеза данных были обнаружены все ударные повреждения в углерод-углеродном композите, что подтверждает факт взаимного дополнения данных ТК и ЛВ, в результате чего возрастает достоверность испытаний.

### **3.5. Качественная оценка выявляемости дефектов в композитах с использованием синтеза данных**

Синтез данных ТК и ЛВ был выполнен на примере контроля качества пластины стеклопластикового ПКМ с 16-ю несквозными отверстиями круглой формы. Размер пластины составлял 320×320×16 мм. Несквозные отверстия диаметром 20 мм располагались на глубине залегания от 1 до 13 мм в соответствии с таблицей 3.3. Несмотря на использование упрощенной формы дефектов, данная модель позволяет определить границы применимости двух методов НК для выявления дефектов указанного типа.

Таблица 3.3 – Глубина залегания несквозных отверстий круглой формы в стеклопластиковом композите.

Номер дефекта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Глубина, мм	12.2	11.3	10.2	9	7.2	5.4	3.2	1.2	12.2	11.0	10.3	9.2	6.6	5.1	3.2	1.1

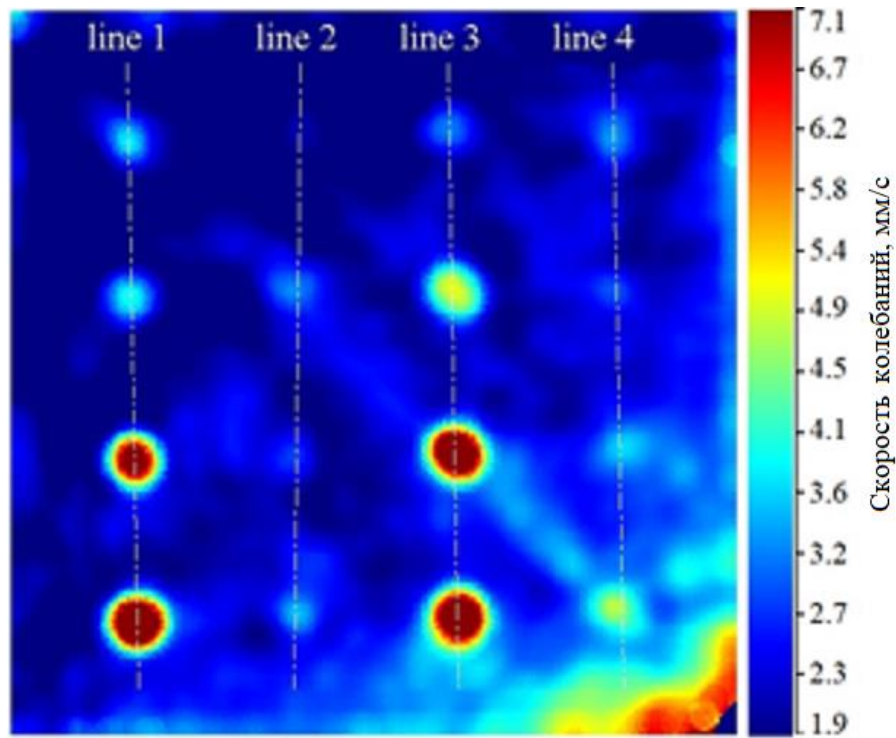
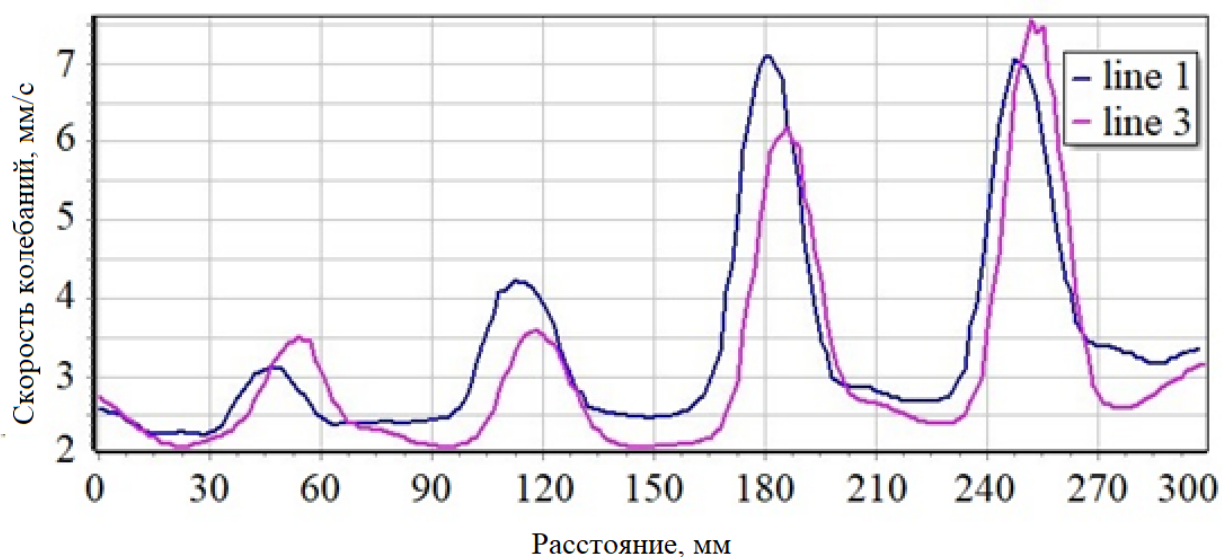
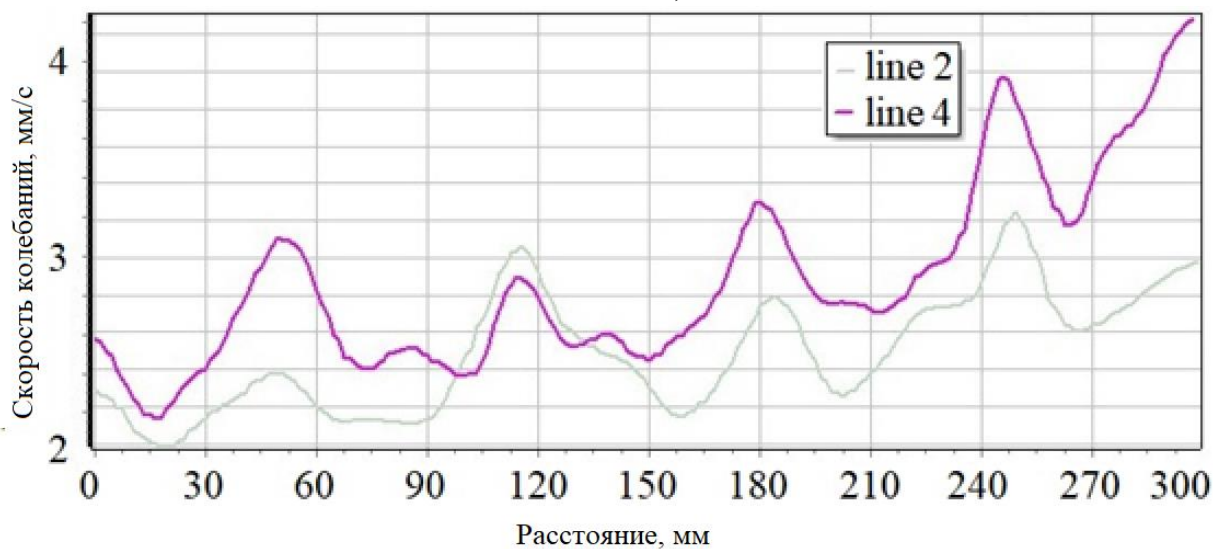


Рисунок 3.5 – Усредненное изображение вибраций на поверхности стеклопластика во всем спектре измеряемых частот (контрастность изображения повышена с помощью программы ThermoLab).

Амплитуда вибраций, измеренная в области рассматриваемых несквозных отверстий, имела существенные различия в связи с изменением интенсивности колебаний в области дефектов, расположенных на различной глубине. В рамках настоящего исследования это привело к «затенению» глубоко расположенного дефекта № 9 при анализе усредненного изображения вибраций на поверхности стеклопластика. Указанный дефект имеет низкий уровень колебаний по сравнению с остальными дефектами, отличающимися более интенсивными вибрациями. В связи с этим для повышения информативности метода было использовано программное обеспечение ThermoLab (Томский политехнический университет) при анализе данных вибросканирования (рисунки 3.5, 3.6). Для повышения качества данных, в области несквозных отверстий выделены линейные профили (line 1 – line 4), вдоль которых был построен график зависимости амплитуды колебаний от координаты точки виброизмерения на поверхности пластины.



(a)



(б)

Рисунок 3.6 – Профили амплитуды скорости колебаний стеклопластикового композита в области несквозных отверстий.

Несмотря на низкий уровень вибрации в области дефектов, расположенных на глубине более 9 мм от инспектируемой поверхности, использование программного обеспечения ThermoLab позволило повысить контраст изображения и обеспечить обнаружение всех 16 дефектов. На рисунке 3.5 показаны четыре амплитудных профиля колебаний: line 1 - дефекты №13-16 (рис. 3.6а), line 2 - дефекты №9-13 (рис. 3.6б), line 3 - дефекты №5-8 (рис. 3.6а), line 4 - дефекты №1-4 (рис. 3.6б). Как видно из графиков, амплитуда вибраций в области дефектов нарастает по мере уменьшения

глубины их залегания относительно инспектируемой поверхности. Несмотря на невысокую контрастность дефектов, расположенных на большой глубине залегания, соответствующие вибрации также превосходят уровень шума и позволяют идентифицировать расположение отверстий.

Оценка размеров обнаруженных дефектов в стеклопластиковом композите была проведена с использованием порогового значения -  $\frac{1}{2}$  амплитуды вибрационного сигнала (для каждой дефектной зоны) [59]. Результаты измерения площади дефектов приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Определение площади несквозных отверстий на основе результатов лазерной виброметрии.

Номер дефекта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$S_d, \text{мм}^2$	19.6	19.2	19	19.4	16	18	12.2	11.8	10	10.4	7	6.4	8	6	3	6
$\varepsilon, \%$	2	4	5	3	20	10	39	41	50	48	65	68	60	70	85	70

Из результатов ЛВ (таблица 3.4) следует, что наилучшее приближение экспериментальных данных к реальным размерам дефекта ( $> 95 \%$ ) соответствовало отверстиям, расположенным на глубине до 4 мм от инспектируемой поверхности. По мере увеличения глубины залегания, измеренная площадь дефектов снижалась до 80% от истинной величины на глубине 55 мм от поверхности и до 60% на глубине 7 мм. Экспериментально измеренная область дефектов, расположенных на глубине от 7 до 12 мм от инспектируемой поверхности, составила от 50 до 30% от истинного размера отверстий. Однако следует заметить, что, несмотря на расхождение экспериментальных и истинных размеров дефектов, расположенных на большой глубине залегания, использование метода ЛВ позволило идентифицировать расположение всех дефектов.

В рамках настоящего исследования активный ТК стеклопластикового композита был проведен с целью получения данных о глубине залегания дефектов и повышения информативности испытаний. В частности, глубина залегания дефектов была рассчитана путем измерения

температуропроводности композита и решения обратной задачи теплопроводности с использованием инверсии результатов нагрева материалов.

ТК композита проводили при тепловой стимуляции с использованием четырех галогеновых ламп (суммарная мощность 2 кВт), а регистрацию температурного поля на поверхности пластины осуществляли ИК камерой Optris PI 640. Время импульсного нагрева (10 с) было выбрано эмпирически для оптимального обнаружения дефектов, расположенных на различной глубине залегания. Исходное ИК изображение приведено на рисунке 3.7а. Изменение температуры на поверхности пластины составило 2 °С по отношению к выбранной эталонной точке, как показано на рисунке 3.7а, что было в дальнейшем использовано для преобразования исходной последовательности ИК-изображений в последовательность контрастных изображений. Последовательность изображений текущего контраста (пример на рисунке 3.7б) была использована для расчета максимального контраста:

$$C = \frac{T_d - T_{nd}}{T_{nd}}, \quad (3.4)$$

т.е. (максиграммы) и времени его появления  $\tau_m$  (таймограммы) для всех обнаруженных дефектов (см. таблицу 3.5) в соответствии с известным алгоритмом, описанным в работе [76]. В дальнейшем эти параметры использовали для определения глубины залегания дефектов  $h$  и их теплового сопротивления  $R_d = d/K_d$ , где  $d$  – толщина дефекта [м] и  $K_d$  – теплопроводность материала в области дефекта [Вт/(м×К)]. Используются следующие аналитические выражения для оценки глубины залегания дефектов в ПКМ, встроенные в программу ThermoFit Pro.

Если время регистрации максимума  $C$  наблюдается ранее времени окончания теплового нагрева ( $\tau \leq \tau_h$ ):

$$h \text{ [м]} = 0.407 (a\tau_m)^{0.49} \left(1 - \frac{K_d}{K}\right)^{0.19} \left(\frac{L}{K}\right)^{0.08} Fo_h^{0.12} C^{-0.3}, \quad (3.5)$$

$$R_d \text{ [м}^2 \times \text{К/Вт]} = 1.239 (a\tau_m)^{0.4} \left(1 - \frac{K_d}{K}\right)^{0.044} \left(\frac{L}{K}\right)^{0.12} Fo_h^{-0.17} C^{0.23} \quad (3.6)$$



Если время появления максимума  $C$  наблюдается после окончания теплового нагрева ( $\tau > \tau_h$ ):

$$h [\text{М}] = 0.708 [a(\tau_m - \tau_h)]^{0.46} \left(1 - \frac{K_d}{K}\right)^{0.29} \left(\frac{L}{K}\right)^{0.05} Fo_h^{0.05} C^{-0.15}, \quad (3.7)$$

$$R_d [\text{М}^2 \times \text{К}/\text{Вт}] = 4.368 [a(\tau_m - \tau_h)]^{0.34} \left(1 - \frac{K_d}{K}\right)^{1.27} \left(\frac{L}{K}\right)^{0.29} Fo_h^{-0.05} C^{0.43} \quad (3.8)$$

Уравнения (3.1-3.2) были получены путем аппроксимации множественных численных решений для различных типов дефектов в широком диапазоне ПКМ [77]. Практический опыт использования этих уравнений показал, что точность определения  $h$  составляет около 5-30% для разных типов композитов, а для  $R_d$  точность падает до 40-60%. Описанный алгоритм дефектометрии прост и надежен, что позволяет получать изображения глубины дефекта («глубинограммы») и теплового сопротивления.

На рисунке 3.6 приведены изображения исходных термограмм (рисунок 3.6а), текущего контраста (рисунок 3.6б) и диаграмма глубин залегания дефектов (рисунок 3.6в). В результате проведения ТК обнаружены 7 из 16 дефектов. Глубинограмма на рисунке 3.6в отображает результаты расчета глубины залегания отдельных дефектов с точностью от 5 до 25%. Приведенные выше оценки показывают, что, во-первых, измеренные величины площади дефектов менее точны, чем показатели определения глубины их залегания. Погрешность измерения площади дефектов варьировалась от 10% до 60% по мере увеличения глубины залегания дефектов, в то время как погрешность оценок глубины залегания дефектов не превысила 30% (см. таблицу 3.5). Относительная погрешность измерения площади дефектов, расположенных на глубине не более 4 мм от инспектируемой поверхности, не превысила 18 %, а погрешность измерения глубины залегания не превысила 25 %. Для дефектов, залегающих глубже 4 мм, относительная погрешность измерения площади и глубины залегания не превысила значения 56 % и 11% соответственно. Оценка глубины дефектов более точна для дефектов на глубинах 3-7 мм, в то время как оценка определения площади дефекта имеет наименьшую погрешность для подповерхностных дефектов.

Стоит также отметить, что изображение текущего контраста (рисунок 3.7б) было получено с порогом амплитуды 5% по значениям  $C$ , что обеспечило на бездефектных участках  $h = 16$  мм и  $R_d = 0$ .

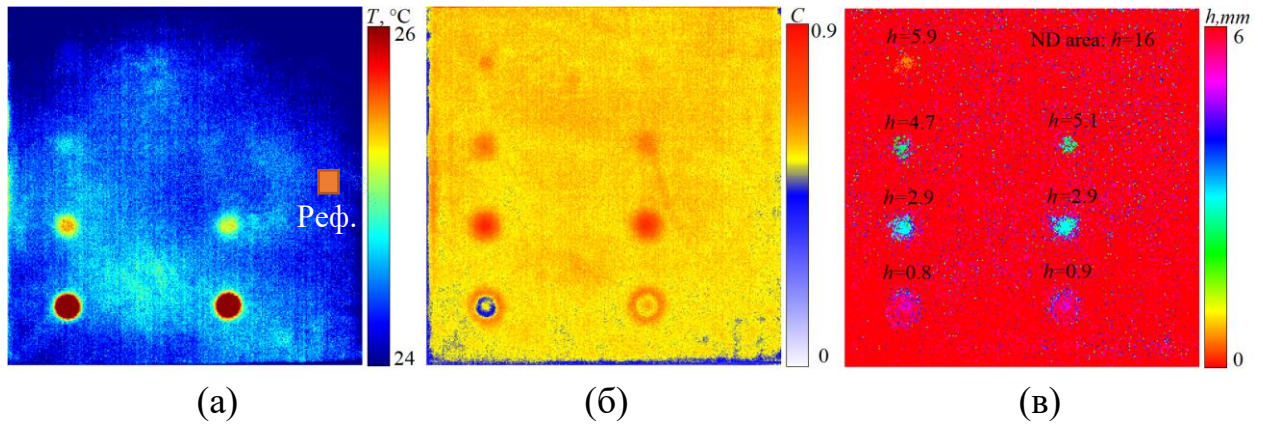


Рисунок 3.7 - Одномерная дефектометрия стеклопластикового ПКМ с несквозными отверстиями круглой формы: а - исходное ИК изображение, б - изображение текущего контраста, в - глубинограмма.

Таблица 3.5 – Экспериментальные результаты ТК стеклопластикового ПКМ с несквозными отверстиями круглой формы.

Номер дефекта	Площадь дефекта (реальная/экспериментальная)	Относительная погрешность площади дефекта, %	Глубина дефектов (реальная/экспериментальная), мм	Относительная погрешность глубины, %
D8	470/ 400	18	0.9 / 1.2	25
D7	400/ 400	0	2.9 / 3.2	9
D6	175/ 400	56	5.1 / 5.4	6
D5	-* / 400	-	-* / 7.2	-
D16	440/ 400	10	0.8 / 1.1	27
D15	470/ 400	18	2.9 / 3.2	9
D14	200/ 400	50	4.7 / 5.1	8
D13	155 / 400	62	5.9 / 6.6	11

Синтез данных ТК и ЛВ позволил уточнить глубину залегания дефектов (в рамках ТК были оценены глубины залегания 7 из 16 дефектов), а также определить геометрию дефектов в виде несквозных отверстий (по результатам

ЛВ были обнаружены все несквозные отверстия в стеклопластике, расположенные на глубинах до 12,2 мм).

### **3.6. Исследование производственных дефектов в композитах с использованием синтеза данных**

Производственные дефекты, возникающие при изготовлении многослойных ПКМ, являются одной из актуальных проблем безопасности эксплуатации изделий. Дефекты указанного типа образуются внутри изделий в процессе их фабрикации и не создают видимых отметок на поверхности материала. Для анализа производственных дефектов используют стандартные образцы с искусственно заложенными неоднородностями в виде вставок. Например, при исследовании образцов углепластиковых ПКМ описаны результаты проведения активного ТК, ЛВ и ультразвукового контроля для обнаружения вставок из фторопласта на ранней стадии изготовления композита, т.е. до прохождения этапа отверждения композита [78]. Исследование характеристик скрытых производственных дефектов в ПКМ различными методами НК является актуальным.

В рамках настоящей работы проведено исследование заложенных дефектов различного происхождения в стеклопластиковом композите с использованием синтеза данных теплового НК и ЛВ. Изделие из стеклопластика размером 240×240×9 мм включало двенадцать дефектов, как показано на рисунке 3.8. Указанные неоднородности имитируют следующие типы дефектов: непрочлей (включения смолы), расслоение (воздушный зазор), пористость (включения пены) и трещина (полость).

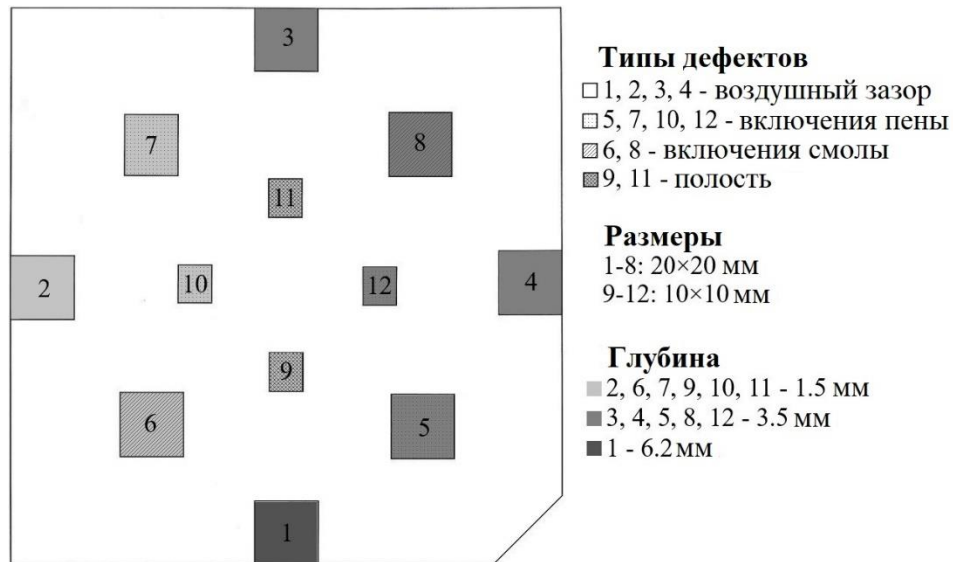


Рисунок 3.8 – Паспорт дефектов стеклопластикового образца с искусственными дефектами различного вида.

На рисунке 3.9 приведены результаты экспериментального исследования стеклопластикового образца с использованием двухсторонней процедуры ТК с последующим построением карты температуропроводности методом Паркера (рисунок 3.8а, б), а также результаты ЛВ лицевой (рисунок 3.8в) и обратной (рисунок 3.8г) сторон композита при акустической стимуляции.

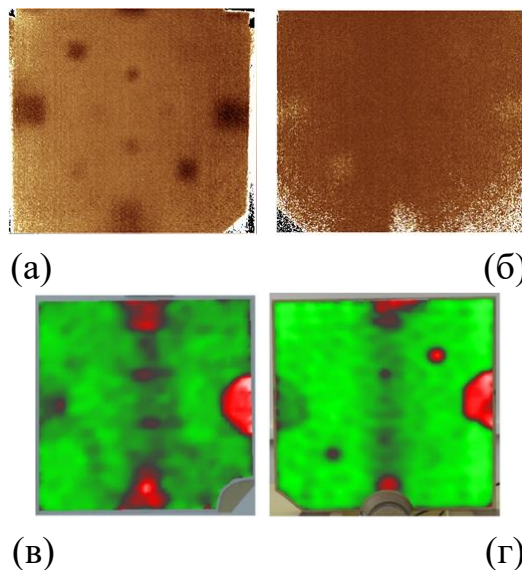
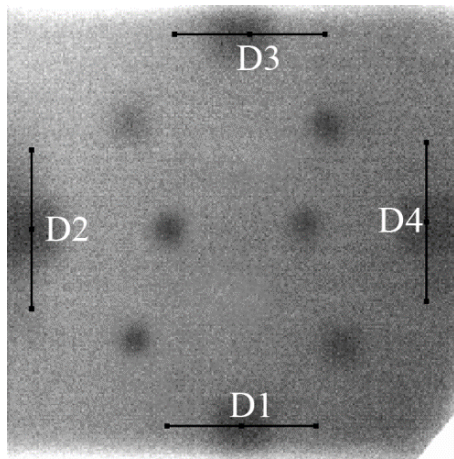


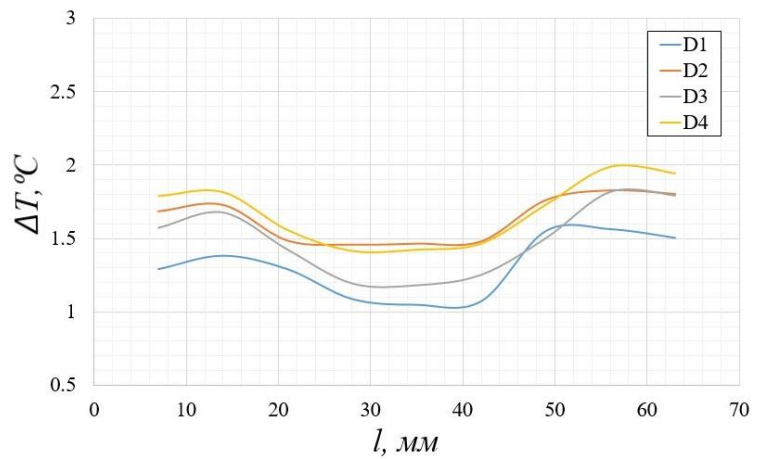
Рисунок 3.8 – Результаты контроля лицевой (а, в) и обратной (б, г) сторон стеклопластика с использованием ТК (метод Паркера) (а, б) и ЛВ при акустической стимуляции в широком спектре частот (в, г).

ТК проводили при частоте записи ИК изображений 10 Гц в течение 350 секунд, время тепловой стимуляции составляло 20 секунд. Определение границ дефектных областей проводили методом дифференцирования температурного профиля дефектной области. Согласно ранее разработанной методике [79], для каждого отдельного дефекта строили температурные профили на поверхности образца произвольным образом, пересекая область дефекта. Далее, после проведения полиномиальной аппроксимации профиля, вычисляли первую производную по пространству. Экстремумы первой производной температурной соответствовали проекциям границ дефектной области на поверхность образца.

Экспериментальная реализация описанного алгоритма приведена на примере определения поперечных размеров воздушных зазоров (рисунок 3.9). В результате выбора произвольных линий, пересекающих дефектные зоны на термограмме (рисунок 3.9.а), были построены температурные профили на рисунке 3.9.б, отражающие изменение температуры в области неоднородностей при тепловой стимуляции. Полученные экспериментальные зависимости дифференциального температурного сигнала ( $\Delta T$ ) от пространственной координаты ( $l$ ) дефектов D1-D4 приведены после применения фильтра низких частот с аппроксимацией среднего скользящего значения. Первые производные температурных профилей были построены для каждого из четырех рассматриваемых дефектов, в результате чего были определены границы дефектов как расстояния между максимальной и минимальной величиной функции производной, что отмечено красными маркерами на рисунке 3.10. Частота дискретизации температурных профилей в условиях настоящего эксперимента составила 1 мм, а шаг сканирования лазерного виброметра составил 2 мм. Площади дефектов определены с точностью 5 - 35 % в зависимости от глубины дефекта и его происхождения (см. таблицу 3.6).



(а)



(б)

Рисунок 3.9. – Построение температурного профиля дефектов на термограмме пластины стеклопластика (а) после использования фильтра низких частот (б).

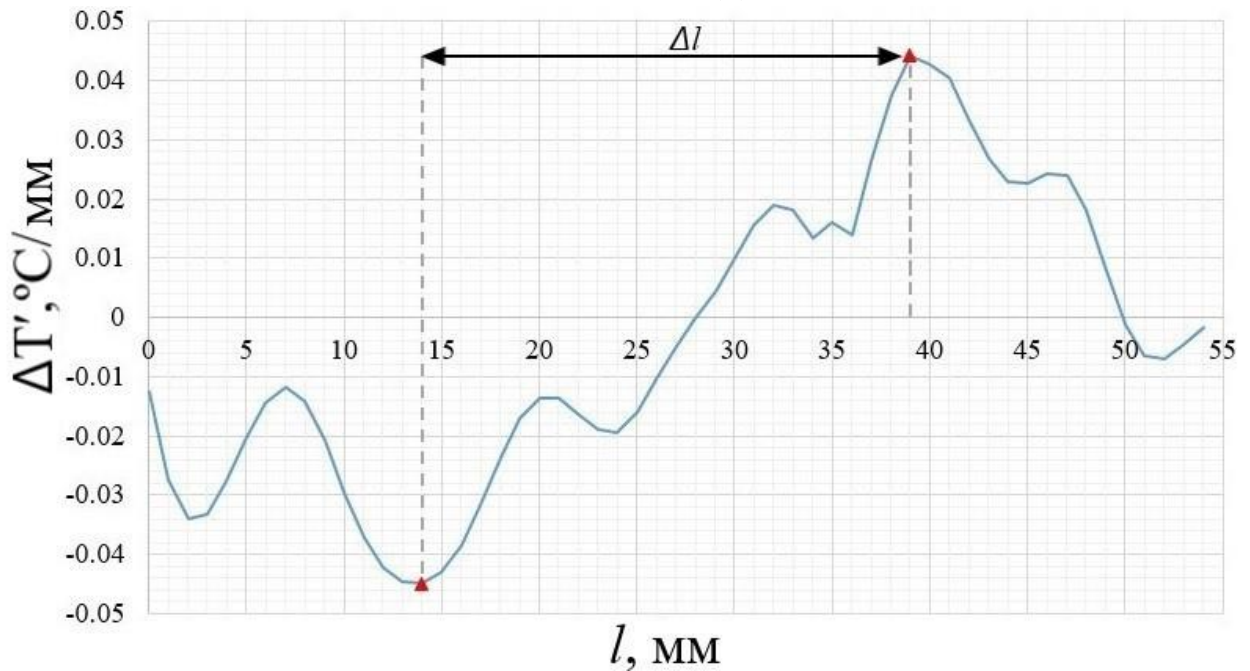


Рисунок 3.10. – Определение границ дефекта D2 между экстремумами производной температурного профиля.

В результате проведения односторонней процедуры ТК было обнаружено 10 заложенных дефектов из 12 (таблица 3.6). Дефекты №9 и №11 (полости размерами 10×10 мм) не были обнаружены, т.к. имеют уровень  $SNR$  ниже предельно допустимого ( $SNR=2$ ). Наибольшее значение относительной погрешности измерения площади соответствует дефекту в виде воздушного зазора (№1), расположенного на максимальной глубине 6,2 мм. В целом,

дефекты указанного типа располагаются на краю пластины стеклопластика и частично открыты, что, возможно, способствует их обнаружению методом ТК.

Результаты сканирующей лазерной Доплеровской виброметрии (СЛДВ) при акустической стимуляции позволили выявить 9 из 12 дефектов при контроле лицевой поверхности (рисунок 3.4в), и 8 из 12 дефектов на обратной поверхности композита (рисунок 3.8г). Суммарно результаты лазерного сканирования при двухстороннем доступе к композиту позволили выявить 10 заложенных дефектов из 12, исключая зоны, заполненные эпоксидной смолой (дефекты № 6 и 8). По нашему мнению, отсутствие данных об указанных дефектах может быть связано с сопоставимыми упругими свойствами связующей матрицы ПКМ и смолы при изготовлении композита. Также важно отметить, что расположение скрытых дефектов, наряду с их типом, оказывает существенное влияние на результаты контроля. Так, воздушные полости (дефекты №1, №2, №3, №4), расположенные возле края пластины, оказались подверженными наиболее интенсивным вибрациям по сравнению с другими типами дефектов, что отчетливо проявлялось на изображении вибраций как лицевой, так и обратной поверхностей стеклопластика. Это можно объяснить локальным снижением жесткости и массы изделия в указанных зонах ввиду отсутствия наполнителя. В то же время, как было отмечено ранее, вставки из смолы № 6 и №8 аналогичного объема не были обнаружены. Дефекты №7 и №5 (вставки из пенообразной теплозащиты) были выявлены только при сканировании обратной поверхности пластины, причем относительная погрешность измерения площади была максимальной среди всех измерений и составила 17.5 % и 35 % соответственно. Площадь непроклеев (дефекты № 9 и № 11) была измерена с высокой точностью: относительная погрешность составила 5 % и 10 % соответственно. В целом, площадь дефектов, расположенных на глубине 1.5 мм, была определена с погрешностью 5-17 %, а для дефектов, расположенных на глубине 3.5 мм, составила 5-35 % в зависимости от типа неоднородности. Важно также заметить, что максимальное количество дефектов было обнаружено при обеспечении

двухстороннего доступа к исследуемой пластине. Результаты измерений приведены в таблице 3.6.

Следует отметить, что, некоторые типы рассматриваемых дефектов были обнаружены только одним из вышеперечисленных методов, что может быть связано с различиями в процедурах стимуляции температурного и вибрационного отклика неоднородностей. В частности, при проведении ТК, амплитуда температурного сигнала в области неоднородности зависит от способности материала поглощать и рассеивать тепловую энергию, взаимного расположения источника нагрева и зоной дефекта, а также времени тепловой стимуляции. Результаты ЛВ, в свою очередь, зависят как от локального снижения жесткости изделия в области расслоения, так и от отражающих свойств материала в целом. Таким образом, дефекты, образованные при ударе одинаковой энергии, могут иметь различную структуру ввиду многослойной структуры материала и обеспечивать сравнительно низкую повторяемость результатов. Результаты экспериментального тестирования дефектов подобного типа также могут различаться, что приводит к необходимости проведения НК с использованием нескольких методов диагностики. Тем не менее, отдельное проведение ЛВ и ТК не позволило выявить все дефектные зоны. Результаты дефектометрии стеклопластикового ПКМ, полученные двумя описываемыми методами приведены в таблице 3.6. Для повышения результативности контроля, экспериментальные результаты ЛВ и ТК были использованы для проведения синтеза данных.

Таблица 3.6 – Результаты теплового контроля и лазерной виброметрии стеклопластикового композита с заложенными дефектами различного происхождения.

Номер дефекта	Площадь дефекта, мм <sup>2</sup> (СЛДВ, ТК, реальная)	Относительная ошибка измерения $\varepsilon$ (СЛДВ, ТК), %	Глубина залегания дефекта (реальная)
D1	545/730/625	12.8 / 16.8	6.2
D2	570/650/625	8.8 / 4	1.5
D3	594/680/625	5 / 8.8	3.5
D4	750/650/625	20 / 4	3.5



D5	260/520/400	35 / 30	3.5
D6	*/430/400	*/ 7.5	1.5
D7	332/360/400	17 / 10	1.5
D8	*/ 370/400	*/ 7.5	3.5
D9	95/*/100	5 / -*	1.5
D10	90/95/100	10 / 5	1.5
D11	110/*/100	10 / -*	1.5
D12	115/135/100	15 / 35	3.5

Результаты обнаружения заложенных дефектов при проведении ТК и ЛВ по параметру *SNR* приведены на рисунке 3.11. Диаграмма изменения *SNR* для различных типов дефектов (рисунок 3.12) показывает, что максимальное значение *SNR* зарегистрировано в области воздушных полостей композита и составляет от 7.5 до 21.6. Аналогичный показатель для дефектов в виде непрочлея и вставок из пены снижается до 3,7-4,5 и 4,6-8,3 соответственно. Как отмечено выше, при сканировании пластины в зоне вставок смолы изменение амплитуды вибраций не было обнаружено. В отличие от других типов неоднородностей, фрагменты эпоксидной смолы могли быть качественно спрессованы/склеены со слоями углеродной ткани при формировании композита, что могло послужить причиной изменения амплитуды вибрационного сигнала в указанных дефектах.

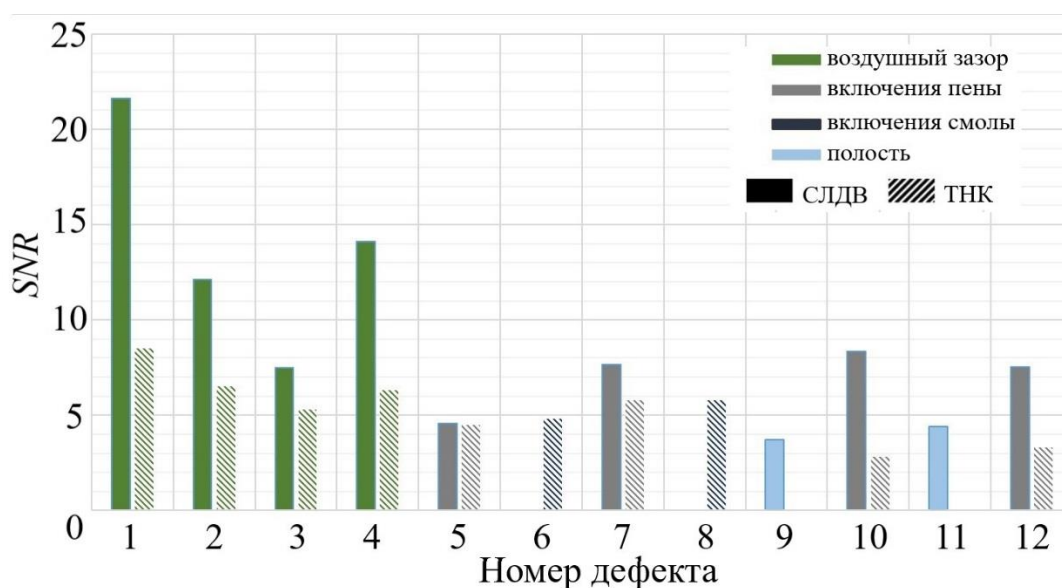


Рисунок 3.11 – Результаты обнаружения заложенных дефектов в стеклопластике при проведении ТК и ЛВ по параметру *SNR*.

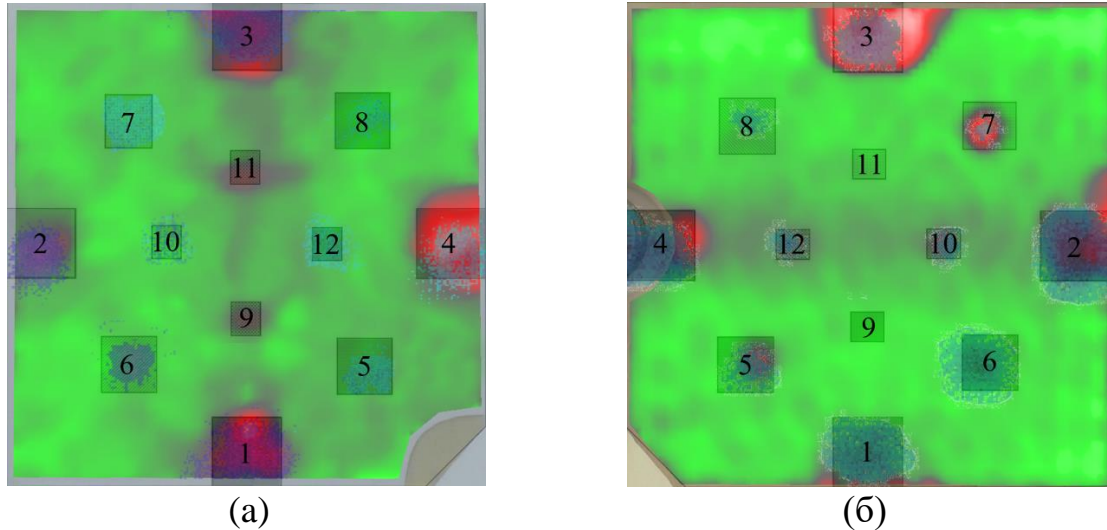


Рисунок 3.12 – Синтез данных ТК и ЛВ лицевой (а) и обратной (б) сторон стеклопластика.

Проведение синтеза данных ТК и СЛДВ позволило обнаружить все заложенные дефекты в стеклопластиковом композите, скомпенсировав ограничения каждого из двух рассматриваемых методов НК. В частности, ЛВ оказалась малоэффективной для выявления включений смолы размерами  $10 \times 10$  мм на глубине 1.5 и 3.5 мм, а ТК не обнаружил воздушные полости аналогичного размера на глубине 1.5 мм. Из полученных данных следует, что синтез данных двух рассматриваемых методов позволяет повысить достоверность НК, а также расширить номенклатуру обнаруживаемых дефектов.

### 3.7 Выводы по Главе 3

1. Качественный анализ выявляемости дефектов в композитах показал, что различие условий проведения ТК и ЛВ влияет на результаты испытаний и благоприятствует осуществлению синтеза данных. В частности, метод ЛВ является чувствительным к расстоянию между точкой ввода ультразвука и дефектами, а результаты ТК зависят от равномерности нагрева объекта. Осуществление синтеза данных подтверждает целесообразность взаимного дополнения данных ТК и ЛВ для повышения достоверности дефектоскопии дефектов различного происхождения.

2. Исследование производственных дефектов и несквозных отверстий в композитах показало, что различие физических принципов, лежащих в основе ТК и ЛВ, позволяет расширить номенклатуру выявляемых дефектов, а также скомпенсировать ограничения вышеуказанных методов НК. Синтез данных позволяет определить глубину залегания дефектов, повысить эффективность геометрических оценок, а также обнаружить неоднородности, расположенные в композитах на глубине более 12 мм, что представляет трудности для традиционных методов НК.

## **ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ КОМПОЗИТОВ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ К ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ЦИКЛАМ УДАРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ**

Тенденция к увеличению использования ПКМ для проектирования и создания ответственных элементов авиационных и ракетно-космических аппаратов определяет необходимость совершенствования эксплуатационных и прочностных свойств материалов. Упрочнение композитов, как правило, осуществляют путем использования связующих материалов (смолы) [79-81], армирующих компонентов (волоконных материалов) [79,81], а также при оптимизации состава и ориентации матричных компонентов. В настоящей главе описаны исследования ударных повреждений в углепластиковых и гибридных ПКМ различной конфигурации и толщины с использованием ТК и ЛВ. В частности, оценена устойчивость углепластиковых композитов толщиной от 0,5 мм до 5 мм к ударным повреждениям с повышением/понижением энергии удара до 10 Дж, а также рассмотрено влияние конфигурации слоёв гибридных и углепластиковых ПКМ на их способность сдерживать ударные нагрузки.

### **4.1 Материалы и методы**

В рамках проведения НК с использованием ЛВ были исследованы три комплекта углепластиковых ПКМ размерами 160×120 мм, толщиной: 0,5 мм; 1,1 мм; 1,5 мм; 3,1 мм; 4 мм; 4,5 мм и 5 мм.

Пластины подвергали последовательному нанесению ударных повреждений энергией от 1 Дж до 10 Дж при комнатной температуре в соответствии с международным стандартом ASTM D7136. В первой партии образцов композиты подвергались ударам с повышением энергии от минимальной к максимальной, для второй – с понижением. Шаг изменения энергии удара составил 1 Дж. Ударные повреждения наносили копером, соответствующим требованиям ГОСТ 33496 – 2015.

После каждого последовательного удара проводился ТК с оптической стимуляцией, а также ЛВ с ультразвуковой стимуляцией. Экспериментальная установка описана в Главе 3 данной работы, ее изображение приведено на Рисунке 3.1.

#### 4.2 Результаты исследований пластин толщиной 1 мм

В первой части исследований были рассмотрены результаты влияния одиночных ударов с различной энергией на площадь дефектов в углепластиковых композиционных пластинах толщиной 1 мм. Обработанные быстрым преобразованием Фурье данные ЛВ позволили определить области повреждения композитов и измерить их площадь (данные приведены в таблице 4.1).

Таблица 4.1 – Изменение площади дефекта на фронтальной и тыльной сторонах углепластиковых композитов толщиной 1 мм от энергии приложенных одиночных ударов.

Оценка площади дефекта	Энергия удара, Дж										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Фронтальная поверхность, мм <sup>2</sup>	0	200	290	370	430	450	1 010	1 190	1 300	1 690	
Тыльная поверхность, мм <sup>2</sup>	0	220	310	390	450	670	1 080	1 210	1 340	1 770	

Согласно полученным результатам, была построена зависимость площади дефекта от энергии удара для фронтальной и тыльной сторон углепластикового композита, приведенная на рисунке 4.1.

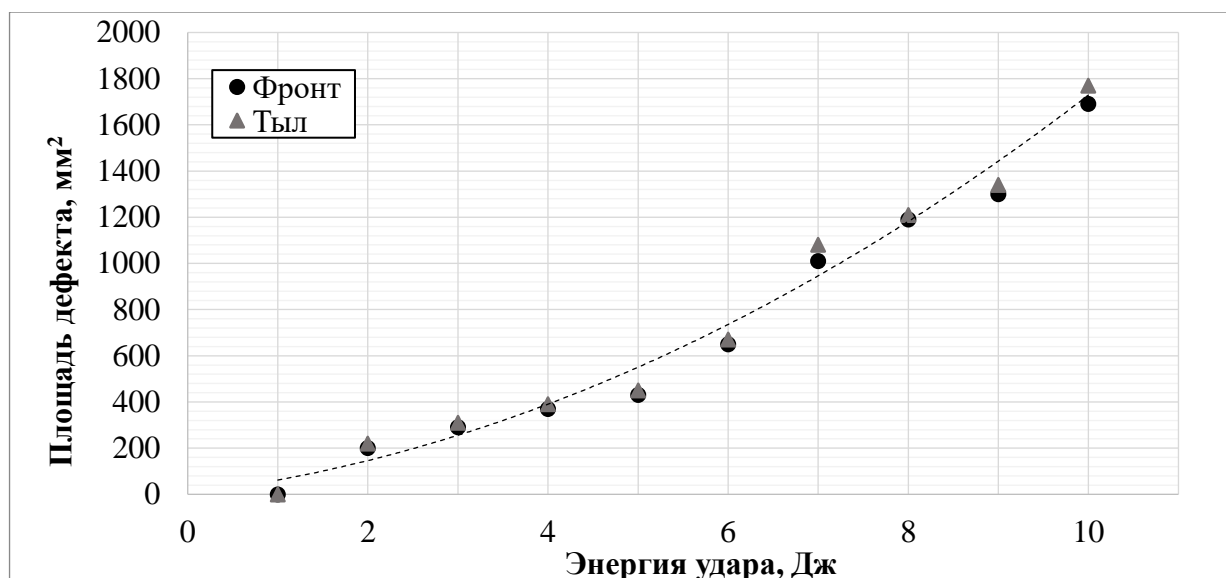


Рисунок 4.1 – Зависимость площади дефекта от энергии удара в диапазоне от 1 до 10 Дж для тыльной и фронтальной сторон углепластикового ПКМ толщиной 1 мм.

Результаты тестирования композитов толщиной 1 мм на устойчивость, как и ожидалось, показывают линейный характер увеличения площади дефектов вплоть до 6 Дж, и нелинейный – для энергий выше 6 Дж. Это касается как лицевой, так и тыльной стороны. Различия повреждений на поверхностях изделий не превышают 10% для энергии удара до 5 Дж и 5% для энергии удара от 5 до 10 Дж. При ударе с энергией 1 Дж, в структуре композита не было обнаружено повреждений, а при ударном воздействии энергией 2 Дж, оцененная площадь дефекта составила 200 мм<sup>2</sup> (на фронтальной стороне) и 220 мм<sup>2</sup> (на тыльной стороне). При дальнейшем увеличении энергии удара, площадь дефекта возрастала до 430 мм<sup>2</sup> при ударе энергией 5 Дж и до 650 мм<sup>2</sup> при ударе энергией 6 Дж. (рис. 4.1).

#### 4.3 Последовательные циклы ударов с одинаковой энергией

Дальнейшее исследование устойчивости тонких ПКМ к низкоэнергетическим ударным воздействиям было выполнено путем оценки площади дефектов, образованных после нанесения последовательных циклов ударов фиксированной энергии от 1 до 6 Дж. Каждый цикл состоял из нанесения последовательных ударов одинаковой энергии. Измеренные с

помощью лазерного виброметра площади повреждений, возникших после каждого последующего удара, приведены в таблице 4.2. Серым цветом обозначены ячейки, которые отображают данные, соответствующие разрушению целостности материала.

Таблица 4.2 – Площадь ударных повреждений композитов толщиной 1 мм при нанесении цикла последовательных ударных повреждений фиксированной энергии от 1 до 6 Дж.

Энергия удара Кол-во циклов	1 Дж	2 Дж	3 Дж	4 Дж	5 Дж	6 Дж
1 цикл	0	130	310	390	530	710
2 цикла	0	230	430	930	1080	1690*
3 цикла	0	410	660	1290	1430*	
4 цикла	0	620	930	1790*		
5 циклов	0	810	1080*			

\* В результате нанесения удара произошло разрушение образца

Из полученных данных (таблица 4.2) следует, что удар энергией 1 Дж не вносит повреждения в структуру ПКМ толщиной 1 мм. В результате нанесения пяти циклов ударных повреждений указанной энергии, дефектов обнаружено не было. Нанесение пяти последовательных циклов ударов энергией 2 Дж и 3 Дж привело к образованию дефектов площадью до 810 мм<sup>2</sup> и 1080 мм<sup>2</sup> соответственно. В то же время, после нанесения пяти циклов ударов энергией 2-3 Дж структура ПКМ толщиной 1 мм не была разрушена. Графическое представление зависимости площади дефекта от количества нанесенных ударов представлено на рисунке 4.2.

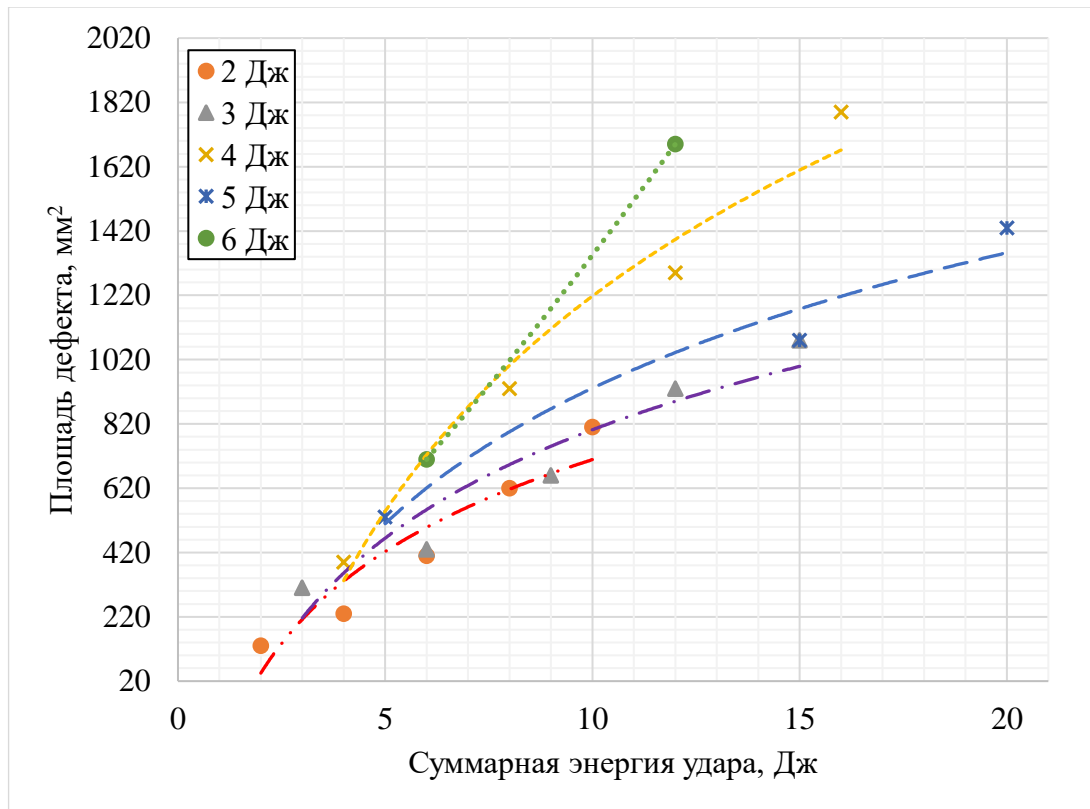


Рисунок 4.2 – Площадь ударных повреждений в ПКМ толщиной 1 мм при нанесении последовательных ударов фиксированной энергии от 1 Дж до 6 Дж.

К отдельной группе следует отнести ударные повреждения с энергией от 4 до 6 Дж. В данном случае, нанесение четырех последовательных ударов энергией по 4 Дж (суммарная энергия удара 16 Дж) привело к образованию дефекта площадью  $1790 \text{ мм}^2$ , сопровождаемого разрушением структуры материала. Нанесение трех циклов с энергией удара по 5 Дж (суммарная энергия 15 Дж) и двух циклов с энергией удара по 6 Дж (суммарная энергия 12 Дж) привело к образованию дефектов площадью  $1430 \text{ мм}^2$  и  $1690 \text{ мм}^2$  соответственно, а также вызвало разрушение структуры композита.

Анализ результатов экспериментального исследования ПКМ толщиной 1 мм показал, что площадь дефектов, образованных при нанесении последовательных ударов фиксированной энергии, варьируется в зависимости от энергии нанесенного удара и может превосходить площадь дефектов, образованных при последовательном цикле ударов с понижением/увеличением энергии. В частности, экспериментально



определенная величина площади повреждения, образованного при нанесении ударов с понижением/повышением энергии до 10 Дж (суммарное значение), составила приблизительно 1000-1100 мм<sup>2</sup>. Аналогичный показатель площади повреждений, образованных при нанесении последовательных ударов фиксированной энергии (суммарная энергия 10 Дж), варьируется в диапазоне от 700 мм<sup>2</sup> до 1300 мм<sup>2</sup> при изменении энергии воздействия от 2 Дж до 6 Дж соответственно. Также важно отметить, что при одинаковой величине суммарной энергии удара нанесение единичных ударов большей энергии приводит к образованию дефекта бóльшей площади по сравнению с множественными ударами меньшей энергии. Как видно из рисунка 5, два удара энергией по 6 Дж (суммарная энергия 12 Дж) привели к образованию дефекта площадью 1700 мм<sup>2</sup>, что почти вдвое больше площади разрушения композита, возникшего при нанесении 5 циклов ударов энергией 2 Дж каждое (суммарное значение составляет 10 Дж).

#### **4.4 Последовательные ударные повреждения с повышением энергии удара**

Вторая часть исследования заключалась в анализе последовательных низкоэнергетических ударных повреждений тонких углепластиковых ПКМ. Нанесение каждого последующего удара с шагом в 1 Дж сопровождали измерениями поверхностных вибраций материала и оценкой площади его повреждения. В таблице 2 приведены результаты экспериментального исследования ударных повреждений в тонких ПКМ при последовательном цикле ударов с повышением энергии. С целью упрощения анализа данных, в таблице указано суммарное значение энергии нанесенных ударных повреждений. Полученные данные имеют хорошую корреляцию и различаются не более чем на 15%.

Таблица 4.3 – Площадь повреждения на фронтальной и тыльной сторонах ПКМ толщиной 1 мм при нанесении последовательных циклов ударов энергией от 1 до 5 Дж.

Оценка площади дефекта	Суммарная энергия удара, Дж				
	1	3	6	10	15
Фронтальная поверхность, мм <sup>2</sup>	0	210	260	1020	1700
Тыльная поверхность, мм <sup>2</sup>	0	220	330	1080	1720

Как видно из данных таблицы 4.3, удар энергией 1 Дж не привел к разрушению углепластикового ПКМ. Последующий удар энергией 2 Дж в свою очередь привел к образованию дефекта площадью 210 мм<sup>2</sup> и 220 мм<sup>2</sup> на фронтальной и тыльной поверхностях пластины соответственно. При дальнейшем нанесении удара энергией 3 Дж (то есть суммарная энергия трех ударов составила 6 Дж), площадь повреждения увеличилась до 260 мм<sup>2</sup>, что в три раза меньше оценки площади дефекта (более 1020 мм<sup>2</sup>), образованного в результате последовательных ударов энергией от 1 Дж до 5 Дж (суммарная энергия 15 Дж).

График зависимости площади повреждений от энергии ударов, образованных в результате последовательного цикла ударных нагрузок с повышением энергии воздействия в диапазоне от 1 Дж до 5 Дж, приведен на рисунке 4.3.

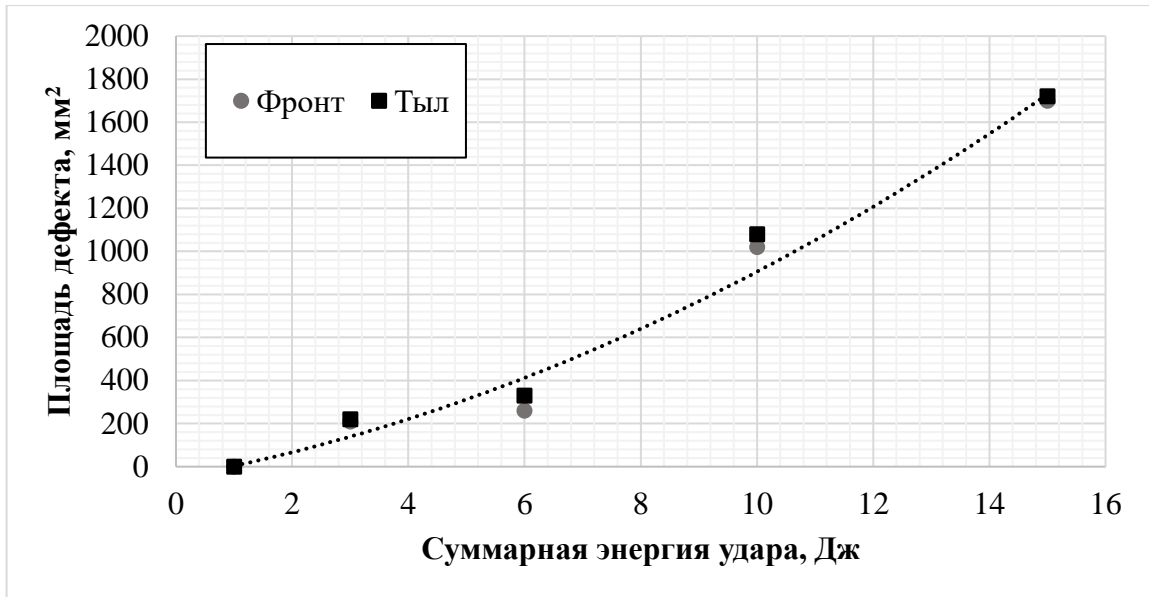


Рисунок 4.3 — Площадь дефектов, вызванных последовательными ударами с повышением энергии от 1 до 5 Дж с шагом 1 Дж для тыльной и фронтальной поверхностей ПКМ толщиной 1 мм.

На рисунке 4.4 приведены изображения дефектных зон, которые получены по результатам ЛВ и наложены на фотографии исследуемых пластин.

Проводя аналогию с эталонными образцами, подвергнутыми одиночным ударам, следует отметить, что серия последовательных ударов суммарной энергией до 6 Дж привела к разрушению образца, сопоставимому с повреждением, образованным при нанесении единичного удара энергией от 3 Дж до 4 Дж. Четвертый удар (суммарная энергия удара 10 Дж) привел к троекратному увеличению площади дефекта до 1080 мм<sup>2</sup> на тыльной стороне ПКМ, по сравнению с предыдущим дефектом (суммарная энергия 10 Дж). Важно отметить, что дефект, образованный в результате последовательно нанесенных ударов с увеличением энергии до 4 Дж, сопоставим с дефектом, образованным в результате нанесения единичного удара энергией 7 Дж. В то же время, оцененная площадь повреждения, образованная в результате нанесения пяти последовательных ударов энергией суммарной энергией 15 Дж, приближенно равна площади повреждения, образованного единичным

ударом энергией 10 Дж. В результате нанесения удара указанной энергии упругие свойства материала были нарушены, что привело к его разрушению.

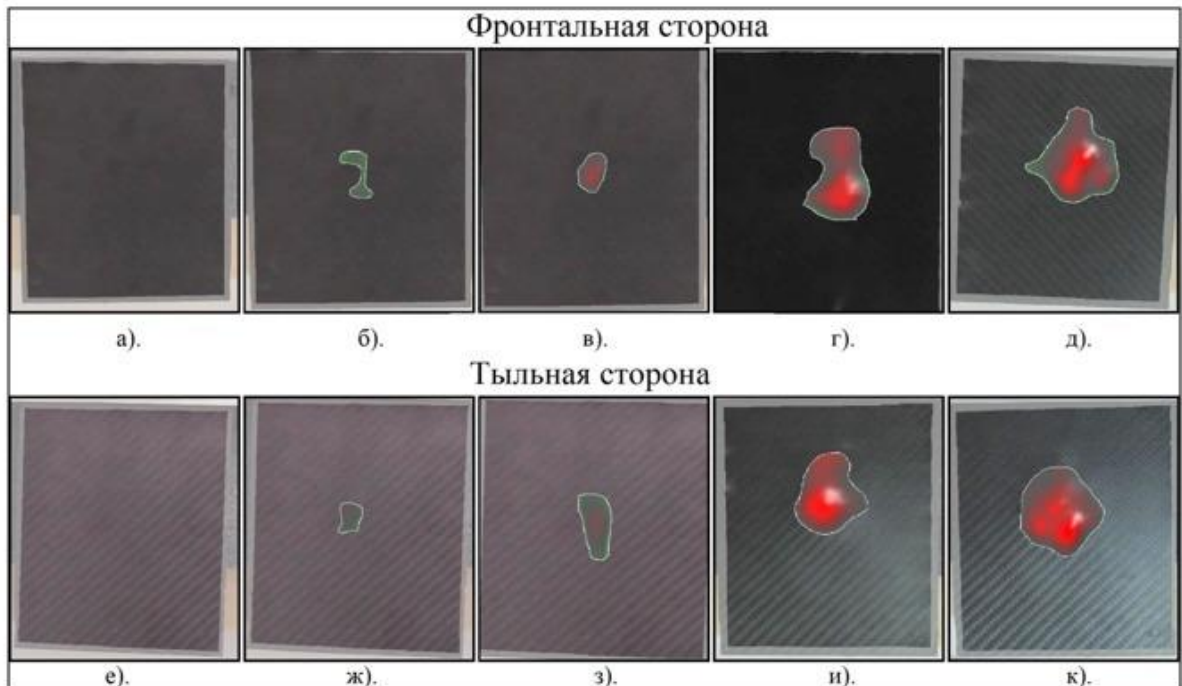


Рисунок 4.4 – Комбинированные изображения фотографий ПКМ и результатов ЛВ, полученные на фронтальной и тыльной сторонах пластин в результате последовательных ударов с увеличением энергии:

- а), е) – удар в 1 Дж;
- б), ж) – удары от 1 до 2 Дж;
- в), з) – удары от 1 до 3 Дж;
- г), и) – удары от 1 до 4 Дж;
- д), к) – удары от 1 до 5 Дж.

#### 4.5 Последовательные ударные повреждения с понижением энергии удара

Для дальнейших исследований третья группа ПКМ была подвергнута последовательным повреждениям с понижением энергии удара в диапазоне от 5 до 1 Дж.

В таблице 4.4 приведены экспериментальные величины площади повреждения ПКМ при нанесении последовательных ударов с понижением энергии удара от 5 до 1 Дж и шагом 1 Дж. С целью упрощения анализа данных, в таблице указана суммарная величина энергии ударных повреждений.

Таблица 4.4 – Площадь повреждений на фронтальной и тыльной сторонах ПКМ толщиной 1 мм при нанесении последовательных ударов энергией от 5 до 1 Дж.

Оценка площади дефекта	Суммарная энергия удара, Дж				
	5	9	12	14	15
Фронтальная поверхность, мм <sup>2</sup>	430	760	1290	1540	1720
Тыльная поверхность, мм <sup>2</sup>	450	940	1300	1650	1770

Следует отметить, что график зависимости площади повреждений ПКМ от энергии удара при последовательном цикле ударов с понижением энергии от 5 Дж до 1 Дж имеет нелинейный характер (см. рисунок 4.5).

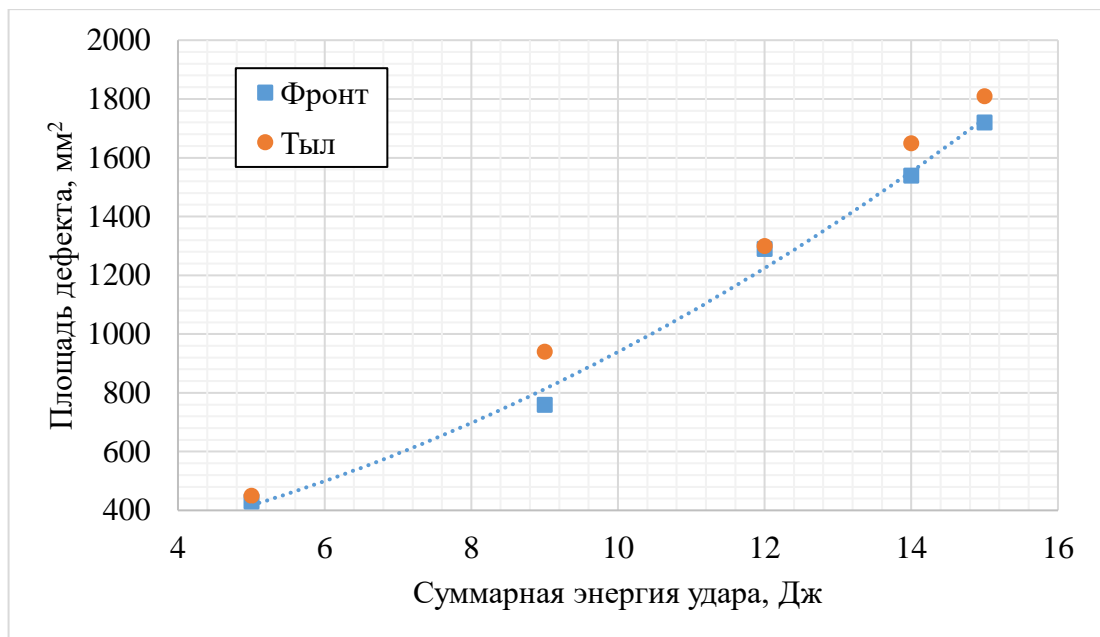


Рисунок 4.5 – Площадь ударных повреждений в ПКМ толщиной 1 мм при последовательных ударах с понижением энергии от 5 Дж до 1 Дж.

Как видно из полученных данных, нанесение удара энергией 5 Дж привело к образованию дефекта площадью 450 мм<sup>2</sup>. Площадь повреждений, определенная после нанесения второго удара (суммарная энергия 9 Дж)

составила 940 мм<sup>2</sup> и сопоставима с площадью повреждения, образованного после одиночного удара энергией 10 Дж. Площадь дефекта, измеренная после нанесения третьего удара (суммарная энергия 12 Дж), составила 1300 мм<sup>2</sup>, что в три раза больше площади дефекта, образованного в результате нанесения единичного удара энергией 5 Дж. Количественно площадь последнего дефекта сопоставима с площадью повреждения, полученного в результате одиночного удара энергией 9 Дж.

Исследование устойчивости тонких ПКМ к ударным повреждениям низкой энергии (до 10 Дж) показало, что увеличение площади повреждения по мере увеличения энергии удара имеет нелинейный характер. При нанесении ударов энергией 1 Дж повреждения структуры материала композитов обнаружены не были, а при ударном воздействии энергией 2 Дж оценка площади повреждения составила 200 мм<sup>2</sup> и 220 мм<sup>2</sup> на фронтальной и обратной поверхностях изделия соответственно. Дальнейшее увеличение энергии удара привело к значительному увеличению площади повреждения до 430 мм<sup>2</sup> при ударе энергией 5 Дж и 1190 мм<sup>2</sup> при ударе энергией 8 Дж.

#### **4.6 Исследование устойчивости углепластиковых композитов толщиной от 0,5 до 5 мм к ударным повреждениям с повышением (от 1 до 5 Дж) и понижением (от 5 до 1 Дж) энергии удара**

Целью данного исследования было проследить динамику развития дефектных повреждений при одиночных последовательных ударах с повышением или понижением энергии каждого последующего удара.

В таблице 4.5 приведены величины измеренной площади дефектов на фронтальной поверхности ПКМ, образованной после нанесения ударов с повышением энергии.

На рисунке 4.6 приведены графики зависимости площади повреждений при повышении энергии удара для фронтальной поверхности ПКМ.

Таблица 4.5. Площадь ударных повреждений на фронтальной поверхности ПКМ различной толщины при нанесении ударных повреждений с повышением энергии от 1 до 5 Дж.

Суммарная энергия удара, Дж \ Площадь дефекта, мм <sup>2</sup>	1 Дж	3 Дж	6 Дж	10 Дж	15 Дж
Образец № 0.5_1	0	120	460	650	840
Образец № 1.1_1	0	100	310	610	740
Образец № 1.5_4	0	95	280	580	650
Образец № 2_4	0	80	260	540	580
Образец № 3.1_3	0	0	140	380	540
Образец № 4.5_4	0	0	0	160	400
Образец № 5_3	0	0	0	0	0

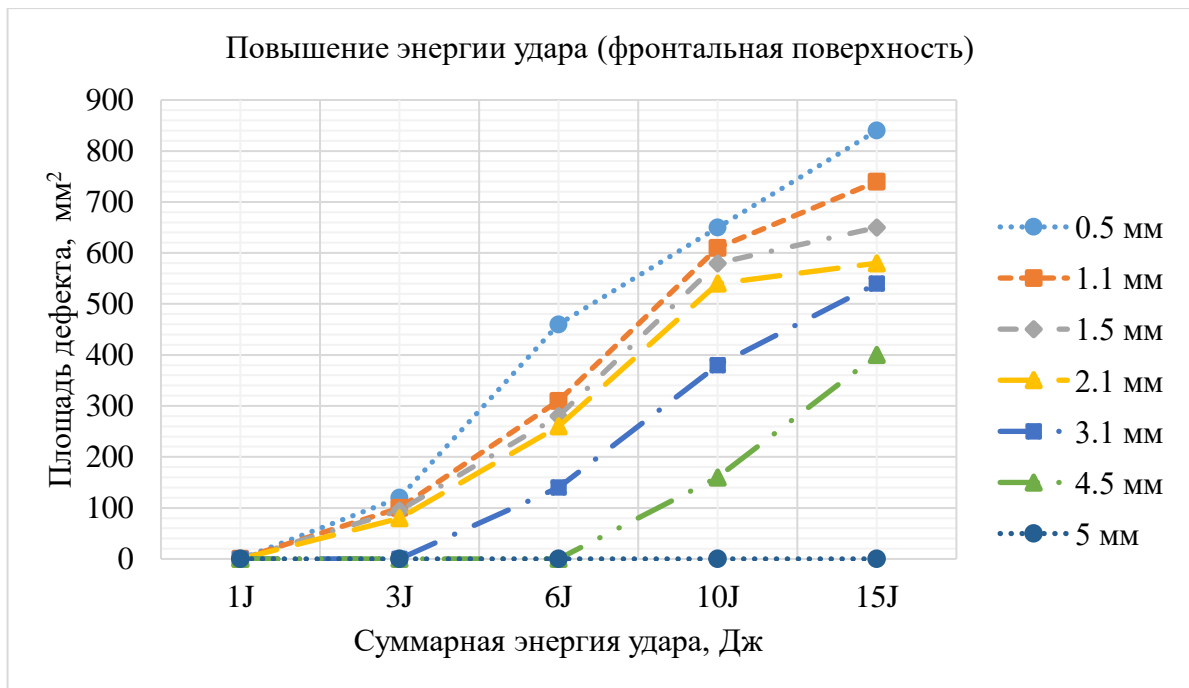


Рисунок 4.6 – Площадь ударных повреждений на фронтальной поверхности ПКМ различной толщины при повышении энергии удара от 1 до 5 Дж.

В таблице 4.6 приведены величины измеренной площади дефектов на тыльной поверхности ПКМ, образованной после нанесения ударов с повышением энергии.

Таблица 4.6. Площадь ударных повреждений на тыльной стороне ПКМ различной толщины при нанесении ударных повреждений с повышением энергии от 1 до 5 Дж (см. рисунок 4.6).

Площадь дефекта, мм <sup>2</sup>	Суммарная энергия удара, Дж				
	1 Дж	3 Дж	6 Дж	10 Дж	15 Дж
Образец № 0.5_1	0	180	360	700	810
Образец № 1.1_1	0	80	290	420	610
Образец № 1.5_4	0	55	250	570	780
Образец № 2_4	0	180	410	500	560
Образец № 3.1_3	0	0	280	405	570
Образец № 4.5_4	0	0	0	140	380
Образец № 5_3	0	0	0	0	0

На рисунке 4.7 приведены графики зависимости площади повреждений на тыльной поверхности ПКМ при повышении энергии удара.

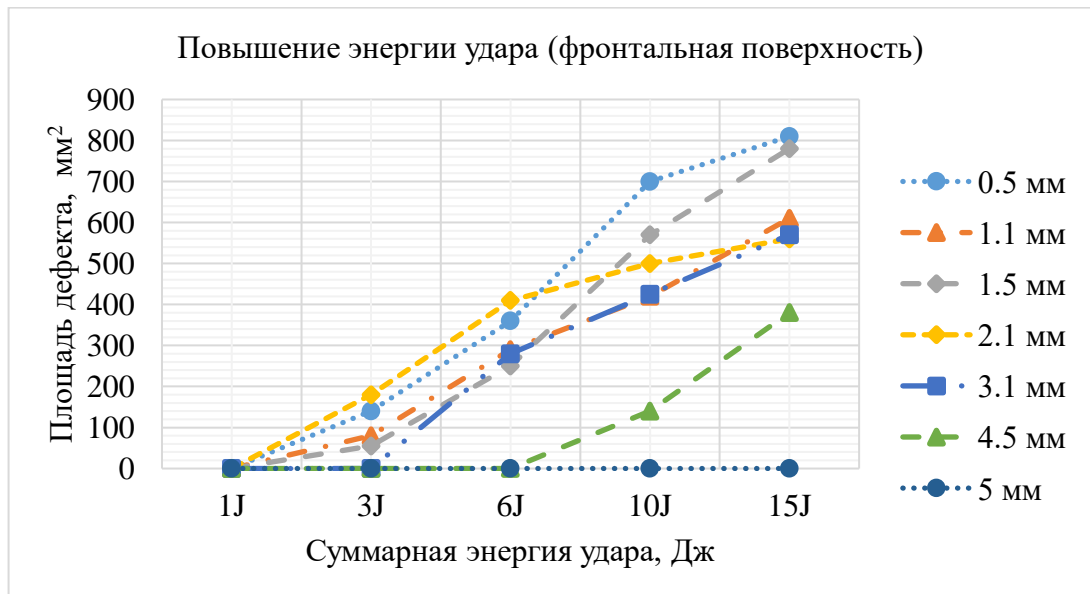


Рисунок 4.7 – Изменение площади ударных повреждений на тыльной поверхности ПКМ различной толщины при повышении энергии от 1 до 5 Дж.

В таблице 4.7 приведена площадь дефектов в образце из ПКМ после каждого удара при понижении суммарной энергии ударов (фронтальная поверхность).



Таблица 4.7. Площадь ударных повреждений на фронтальной поверхности ПКМ различной толщины при нанесении ударных повреждений с понижением энергии от 5 до 1 Дж (см. рисунок 4.7).

Суммарная энергия удара, Дж \ Площадь дефекта, мм <sup>2</sup>	5 Дж	9 Дж	12 Дж	14 Дж	15 Дж
Образец № 0.5_1	850	1140	1300	1440	1460
Образец № 1.1_1	500	610	640	910	930
Образец № 1.5_4	260	380	460	650	670
Образец № 2_4	290	390	530	670	690
Образец № 3.1_3	130	340	460	580	600
Образец № 4.5_4	60	250	420	660	660
Образец № 5_3	0	0	0	0	

На рисунке 4.8 приведены графики зависимости площади повреждений на фронтальной поверхности ПКМ при понижении энергии удара.

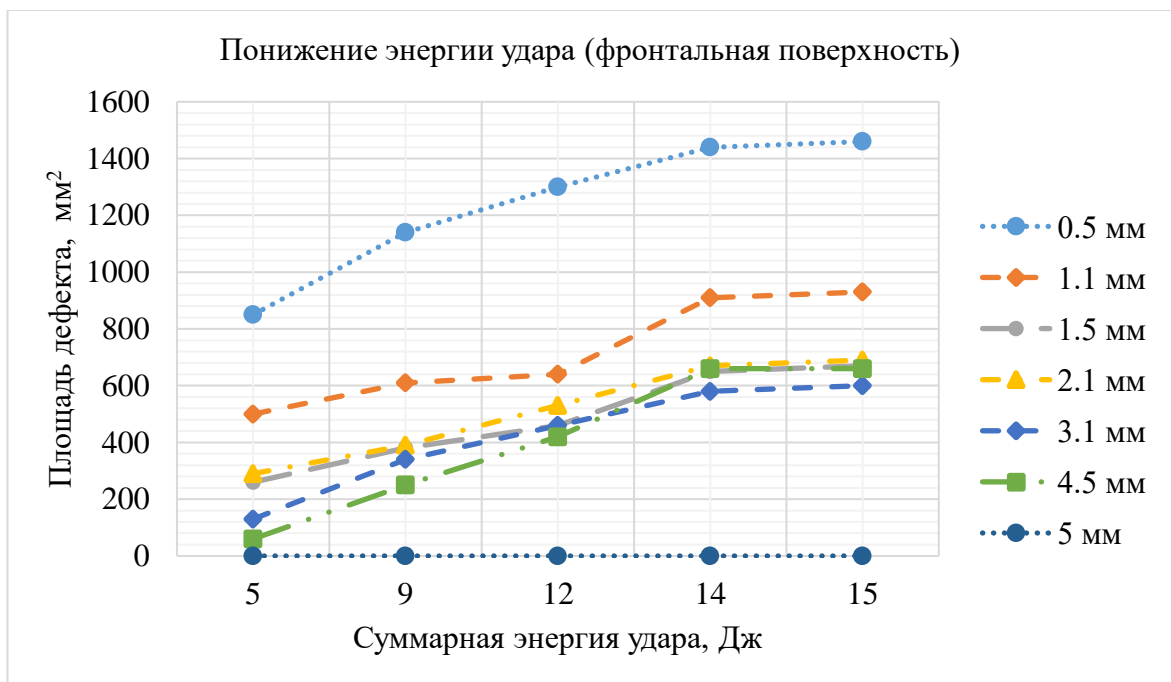


Рисунок 4.8 – Площадь ударных повреждений на фронтальной поверхности ПКМ различной толщины при понижении энергии от 5 до 1 Дж.

В таблице 4.8 приведены величины площади дефектов в образце из ПКМ после каждого удара для тыльной поверхности исследуемого образца при понижении энергии ударов.

Таблица 4.8. Площадь ударных повреждений на тыльной поверхности ПКМ различной толщины при нанесении ударных повреждений с понижением энергии от 5 до 1 Дж.

Суммарная энергия удара, Дж \ Площадь дефекта, мм <sup>2</sup>	5 Дж	9 Дж	12 Дж	14 Дж	15 Дж
Образец № 0.5_1	950	1230	1360	1620	1660
Образец № 1.1_1	480	620	650	930	940
Образец № 1.5_4	290	385	550	620	630
Образец № 2_4	310	420	550	720	720
Образец № 3.1_3	120	260	380	640	640
Образец № 4.5_4	100	310	390	730	730
Образец № 5_3	0	0	0	0	0

На рисунке 4.9 приведены графики зависимости площади повреждений на тыльной поверхности ПКМ при понижении энергии удара.

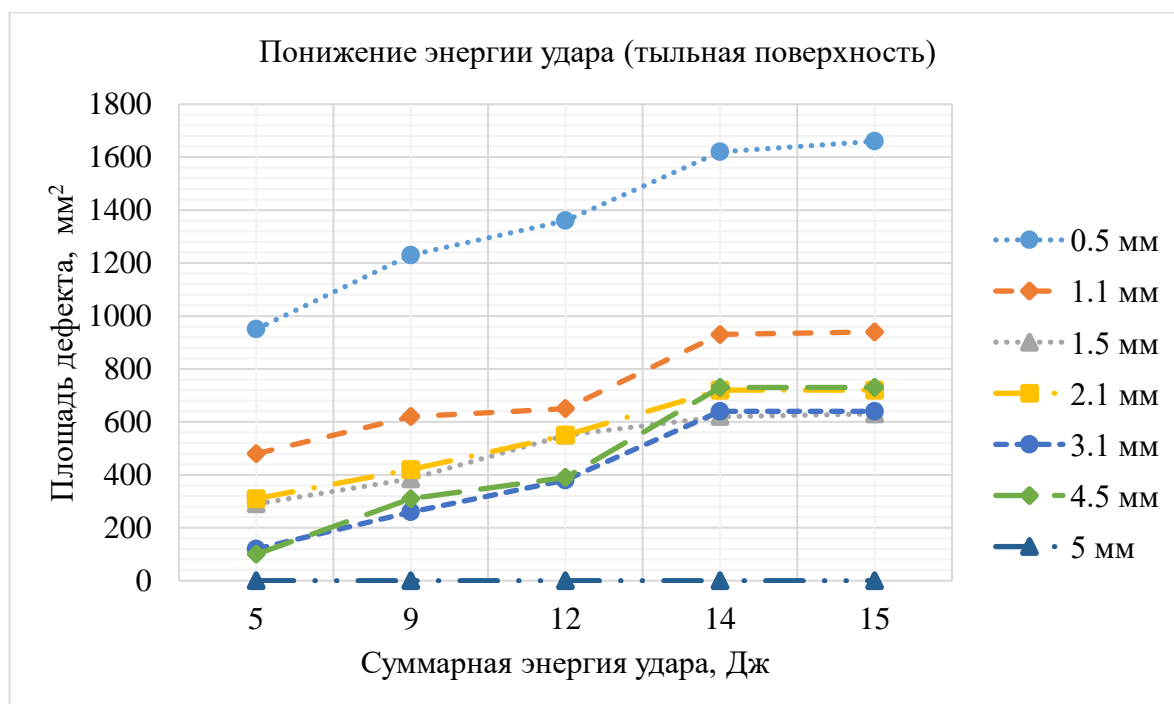


Рисунок 4.9 – Площадь ударных повреждений на тыльной поверхности ПКМ различной толщины при понижении энергии удара от 5 до 1 Дж.

В результате анализа устойчивости ПКМ к последовательному циклу ударных повреждений с повышением (рисунки 4.6, 4.7) и понижением (рисунки 4.8, 4.9) энергии удара, были получены зависимости площади дефекта от суммарной величины энергии нанесенных ударов. Оценку площади дефектов проводили на фронтальной (рисунки 4.6, 4.8) и тыльной (рисунки 4.7, 4.9) поверхностях композитов.

Из полученных данных следует, что ПКМ толщиной 5 мм не были повреждены в ходе нанесения циклов ударов с повышением/понижением энергии удара суммарной энергией от 1 до 15 Дж. Это свидетельствует о высокой прочности материалов указанной толщины к низкоэнергетическим ударным воздействиям. Измеренная площадь дефектов на фронтальной и тыльной сторонах композитов толщиной от 0,5 до 3 мм имеет расхождение данных не более чем на 30%. Для ударных повреждений в ПКМ толщиной более 3 мм, величины площади дефектов на фронтальной поверхности пластин отличалось более чем на 30% от площади дефектов, измеренной на тыльной поверхности композитов. Указанное расхождение данных можно объяснить неравномерным распределением повреждения в структуре слоистых материалов в процессе нанесения удара. Дефекты исследованного типа образуют область структурных неоднородностей пирамидальной формы, возрастающую от лицевой стороны ПКМ, на которой был нанесен удар, по мере роста толщины композита. Именно эта особенность проявления расслоений на тыльной поверхности изделий из композитов определяет важность анализа ударных повреждений.

При исследовании площади ударных повреждений в ПКМ различной толщины, образованных при последовательном цикле ударных нагрузок с повышением энергии удара (от 1 до 5 Дж), было выявлено, что одиночный удар энергией 1 Дж не создавал дефекты в композитах, включая образцы минимальной толщины (0,5 мм). Нанесение последующего удара энергией 2 Дж (суммарная энергия 3 Дж) привело к образованию дефектов в ПКМ толщиной до 2 мм, в том числе, с максимальной площадью неоднородности

равной 120 мм<sup>2</sup> на фронтальной поверхности и 180 мм<sup>2</sup> на тыльной поверхности для пластин толщиной 1 мм. Минимальное значение суммарной энергии удара, необходимой для образования дефектов в углепластиковых композитах толщиной 3,1 и 4,5 мм, составило 6 Дж и 10 Дж соответственно.

Из полученных результатов следует, что, по мере увеличения толщины композита, измеренная площадь ударного повреждения уменьшается, как и ожидалось, при разработке плана эксперимента. Композиты толщиной 5 мм не были повреждены в ходе нанесения циклов ударов с повышением/понижением энергии удара от 1 до 15 Дж, что свидетельствует о высокой прочности ПКМ указанной толщины к низкоэнергетическим ударным воздействиям. Также важно отметить, что нанесение одиночного удара энергией 1 Дж не создало повреждений в исследуемых композитах, включая образцы минимальной толщины (0,5 мм).

По результатам анализа данных, полученных при понижении/повышении энергии удара, было установлено, что площадь дефектов, образованных при уменьшении энергии удара, превосходит величину площади дефектов, образованных при повышении энергии удара. Максимальное различие данных достигает 40% для ПКМ толщиной 0,5 мм с ударным повреждением суммарной энергией 15 Дж. Из этого следует, что нанесение циклов ударов с увеличением энергии удара более щадяще влияет на формирование области неоднородности в силу более равномерного распределения ударной нагрузки в структуре материала. Следует отметить, что энергия первичного удара, предположительно, определяет формирование области неоднородности и характер её увеличения при нанесении последующих ударов с повышением/понижением энергии удара.

При детальном рассмотрении данных, полученных при ударных воздействиях с понижением энергии удара, было установлено, что толщина композита существенно влияет на площадь повреждения при нанесении ударных повреждений. В частности, нанесение повреждения максимальной энергии (5 Дж в условиях проведенного эксперимента) привело к

существенному разрушению материала толщиной от 0,5 до 1,1 мм, создав дефекты площадью 1660 мм<sup>2</sup> и 940 мм<sup>2</sup> соответственно (данные получены при исследовании тыльной поверхности образцов). В данном случае, при последующем понижении энергии удара и достижения максимального значения суммарной энергии удара (15 Дж), изменение площади неоднородности не превысило 40 %. Это свидетельствует о существенном вкладе первичных ударных повреждений энергией 5 Дж (около 60% площади конечного размера дефекта) в формирование дефектных зон в тонких ПКМ.

Для ПКМ толщиной более 1,5 мм изменение площади неоднородностей, образованных при увеличении суммарной энергии удара от 5 Дж до 15 Дж, составляет от 57% до 90%. Таким образом, вклад первичного удара энергией 5 Дж в образование максимальной площади неоднородности композитов (при достижении суммарной энергии удара равной 15 Дж) варьируется в диапазоне от 10% до 43%, в зависимости от толщины материала.

Последовательное увеличение энергии ударных повреждений сопровождается более равномерным распределением нагрузки в структуре ПКМ и уменьшению площади образованных дефектных зон по сравнению с последовательными циклами понижения энергии удара, как было отмечено выше. В связи с тем, что результирующие величины площади дефектов при понижении/увеличении энергии удара имеют существенные различия, после определения толщины композита и измерения площади ударного повреждения, можно выполнить приближенную оценку суммарной энергии нанесенных ударов в ПКМ. Наименьшая погрешность проведения оценки может быть получена при исследовании композитов, подвергнутых одиночным ударным повреждениям, что исключает вероятность возникновения ошибки измерения ввиду формирования дефектов сложной структуры, которые образуются при многократном нанесении ударов различной энергии.

#### 4.7 Влияние укладки слоев на устойчивость материала к ударным повреждениям

На следующем этапе диссертационных исследований было проведено исследование ПКМ с использованием комплексной диагностической системы на основе явления резонанса дефекта с целью оценить способность материалов сопротивляться воздействию ударных нагрузок в зависимости от конфигурации слоев композита. Объектом исследования были выбраны пластины гибридных ПКМ, армированных натуральным и синтетическим волокнами различной конфигурации и ослабленных ударными повреждениями. Композиты, используемые в настоящей работе, были изготовлены в автоклаве с использованием двух однонаправленных систем склеивания материалов на основе эпоксидной матрицы ( $180 \text{ г/м}^2$  для льна (F) и  $300 \text{ г/м}^2$  для углерода (C)), поставляемого компанией Lineo и DeltaPreg SpA. Два различных типа гибридных ламинатов были изготовлены в соответствии со следующими конфигурациями: FCF  $[(0_2/90_2)^F/(0_2/90_2)^C/0^C]^S$  (лен-углерод-лен) и CFC  $[(0_2/90_2)^C/(0_2/90_2)^F/0^F]^S$  (углерод-лен-углерод), причем оба композита характеризовались общей объемной долей волокна, равной 0,60. Исследуемые пластины размером  $100 \times 150$  мм подвергали ударным воздействиям энергией удара 10 Дж и 40 Дж при комнатной температуре в соответствии с международным стандартом ASTM D7136. Испытания на ударную нагрузку с низкой скоростью проводили с использованием ударной машины (CEAST/Instron 9340), оснащенной полусферическим наконечником (диаметром 16 мм). Масса падающего груза копра составила 4 кг, в то время как энергию удара изменяли путем изменения высоты высвобождения массы.

При исследовании гибридных ПКМ резонансные колебания были обнаружены в различных участках повреждений в зависимости от частоты возбуждающей акустической волны. Наличие набора резонансных частот в поврежденной области обусловлено многослойной структурой ПКМ, где одиночные разрывы представляют собой независимые осцилляторы,

характеризующиеся определенными резонансными частотами. Однако в ходе экспериментальных исследований для каждого из четырех образцов гибридных ПКМ была определена конкретная резонансная частота, на которой в процессе вибрации были задействованы основные части дефекта. В случае рассмотрения дефектов в гибридном ПКМ, ударные повреждения образовали дефектную зону, включающую в себя два расслоенных участка, как показано на рисунках 4.11 – 4.13.

В процессе комплексной диагностики гибридных ПКМ было проведено лазерное вибросканирование поверхности материалов в диапазоне частот от 10 Гц до 50 кГц. Результатом сканирования явился амплитудно-частотный спектр (рисунок 4.10) вибраций каждой точки сканирования на поверхности материала и соответствующие изображения для визуализации данных (рисунки 4.11 – 4.14).

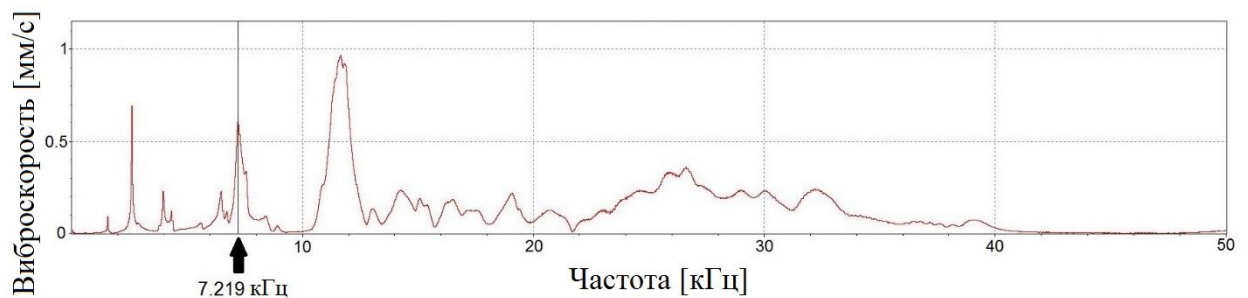


Рисунок 4.10 – Среднее значение амплитудно-частотного спектра вибраций на поверхности CFC композита (с ударным повреждением энергией 10 Дж в центре).

Происхождение каждого максимума амплитуды скорости вибраций на амплитудно-частотном спектре колебаний проверяли на наличие резонанса. Среднее значение амплитудно-частотного спектра вибраций на поверхности CFC композита (энергия удара 10 Дж) показано на рисунке 4.12. Резонансные колебания наблюдались в области ударного повреждения на частоте 7,219 кГц с участием двух частей дефекта. Соответствующее изображение колебаний, представленное на рисунке 11, показывает, что, при правильно подобранной резонансной частоте стимулирующих акустических волн, основная часть

дефекта участвует в колебаниях. Экспериментальные результаты, полученные с помощью общих моделей колебаний, показаны на рисунках 4.12 и 4.13, а также в таблице 4.9.

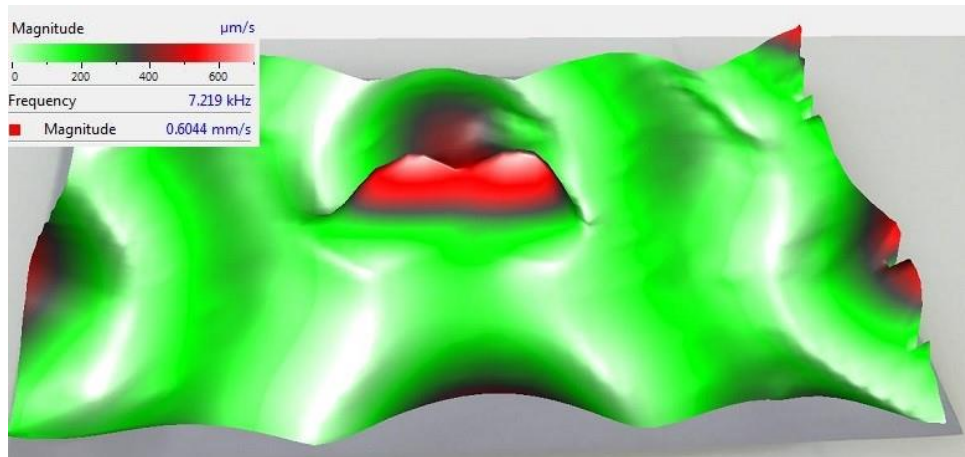


Рисунок 4.11 – Резонансные колебания на поверхности гибридного композита CFC-конфигурации (с ударным повреждением энергией 10Дж в центре) на частоте 7,219 кГц.

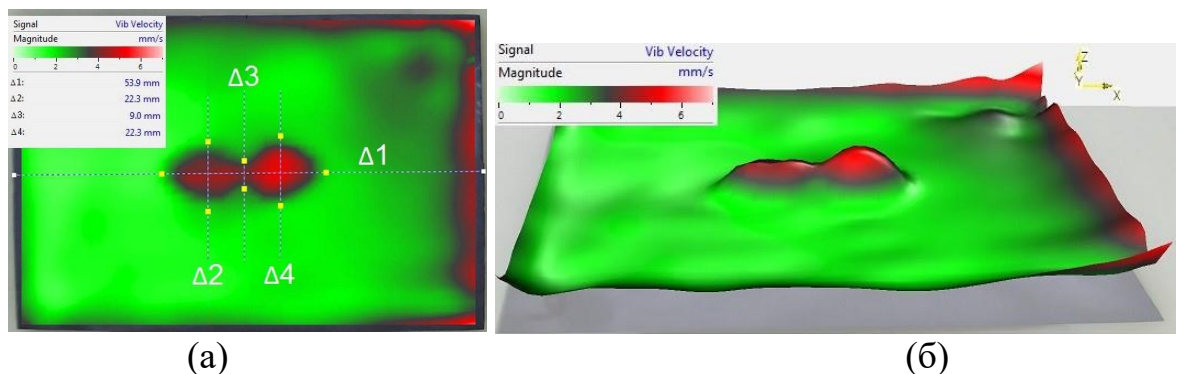


Рисунок 4.12 – Определение максимальных размеров дефекта  $\Delta 1$  и  $\Delta 2$  на поверхности образца CFC композита (ударное повреждение 10 Дж), путем анализа 2D (а) и 3D (б) изображений усредненных вибраций на поверхности материала во всем спектре частот.

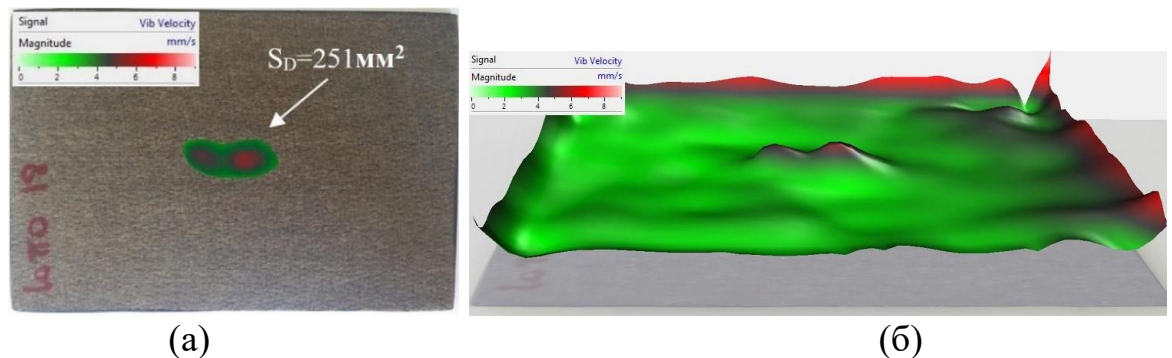


Рисунок 4.13 – Определение бокового размера дефекта на поверхности образца FCF композита (ударное повреждение 10 Дж), путем анализа 2D (а) и 3D (б) изображений усредненных колебаний пластины.



Таблица 4.9. Площадь дефектов и демпфирующие характеристики гибридных CFC и FCF композитов, подвергнутых ударным повреждениям энергией 10 и 40 Дж.

Образец	$f_{LDR}$ , кГц	SNR	Площадь дефекта ( $S_D$ ), мм <sup>2</sup>	Коэффициент демпфирования
CFC_10 Дж	7,219	15,2	663	0,9
CFC_40 Дж	2,406	10,9	817	
FCF_10 Дж	19,688	8,7	251	0,85
FCF_40 Дж	7,5	9,5	372	

На данном этапе был проведен анализ влияния конфигурации слоев углепластиковых волокон на степень устойчивости пластин к ударным повреждениям фиксированной энергии. В процессе работ были исследованы углеродные ПКМ трёх конфигураций: 1X [-45/90/+45/90/0/90/+45/90/-45]; 2X [+45/0/-45/90/0/90/-45/0/+45]; 3X [90/-45/+45/90/0/90/+45/-45/0]. Пластины размером 150×100×6 мм по три образца для каждого типа укладки были изготовлены методом автоклавного формования. Для оценки степени устойчивости композитов к ударным повреждениям в пластинах были нанесены ударные повреждения фиксированной энергии 25 Дж.

Исследование взаимодействия упругих волн с дефектными зонами в материалах было проведено путем их акустической стимуляции и лазерного вибросканирования. По результатам анализа данных виброметрии были определены размер и положение ударных повреждений в образцах каждого исследуемого типа укладки. В соответствии с тем, что ударные повреждения в углепластиковых ПКМ имеют форму усеченной пирамиды [80], в рамках настоящей работы по данным ЛВ также были рассчитана площадь дефектов. Погрешность измерений площади составила 0,025 мм<sup>2</sup>. Результаты анализа данных приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 Результаты оценки площади ударных повреждений в пластинах ПКМ трех типов укладки.

№ образца	1 тип укладки (1X)			2 тип укладки (2X)			3 тип укладки (3X)		
	S <sub>1</sub> , мм <sup>2</sup>	S <sub>2</sub> , мм <sup>2</sup>	V(V*), мм <sup>3</sup>	S <sub>1</sub> , мм <sup>2</sup>	S <sub>2</sub> , мм <sup>2</sup>	V(V*), мм <sup>3</sup>	S <sub>1</sub> , мм <sup>2</sup>	S <sub>2</sub> , мм <sup>2</sup>	V(V*), мм <sup>3</sup>
X01	1467	1767	9689 (10,77%)	1948	393	6432 (7,15%)	1354	1242	7786 (8,65%)
X02	1238	1869	9255 (10,28%)	1276	1074	7045 (7,83%)	1022	1601	7805 (8,67%)
X03	911	2176	(9,99%)	990	1359	7021 (7,8%)	1073	1403	7406 (8,23%)

\* – Объем, занимаемый областью ударного повреждения в пластине углепластикового композита.

Для количественной оценки устойчивости трёх конфигураций углепластиковых композитов к ударным повреждениям расчетный объем дефектной области был сопоставлен с объемом всей пластины композита, который являлся идентичным для всех девяти рассматриваемых образцов и составил 90000 мм<sup>3</sup>.

Области дефектов, наложенные друг на друга соосно расположению образцов, позволяют оценить интервалы вероятного удара на лицевой и оборотной сторонах образца и интервалы распространения дефекта, оцененные по величине площади ударного повреждения. Согласно полученным данным интервалы вероятного удара образцов 1X01-1X03, 2X01-2X03, 3X01-3X03 на оборотной стороне составляют 10%, 4% и 7% (с учетом общей площади пластины) и 8%, 9%, 8% на фронтальной поверхности соответственно (сторона нанесения удара). Изображение интервалов вероятного удара на обратной стороне углепластиковых пластин первого (а), второго (б) и третьего (в) типа укладки приведены на рисунке 4.14.

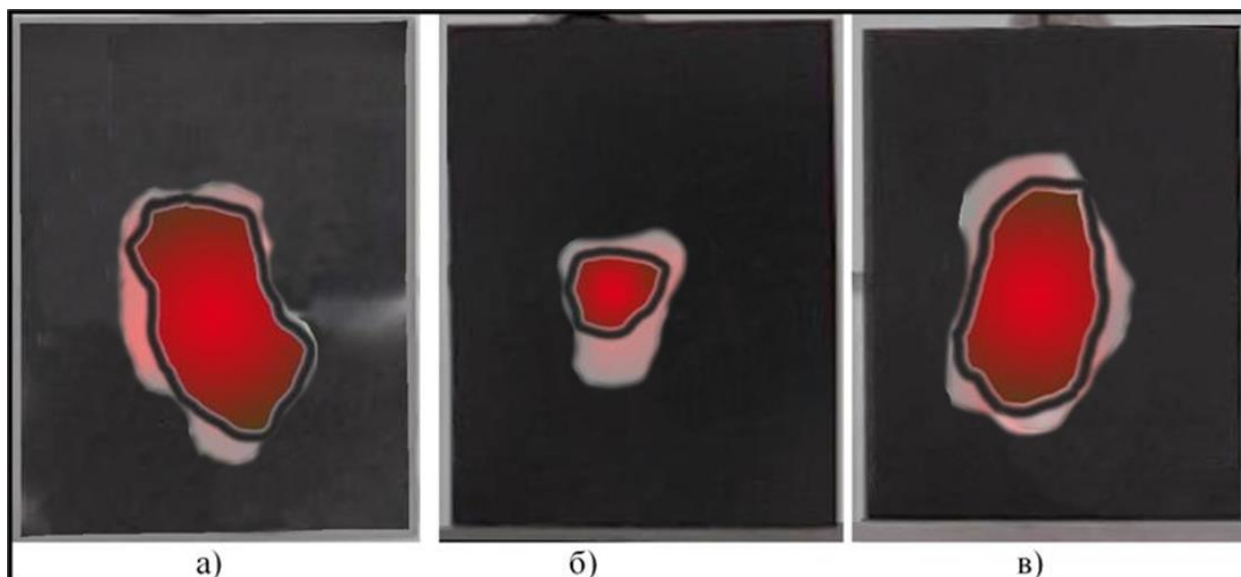


Рисунок 4.14 – Области вероятного удара на оборотной стороне углепластиковых пластин в зависимости от типа укладки:

- а) – первый тип укладки;
- б) – второй тип укладки;
- в) – третий тип укладки.

Согласно полученным данным, наиболее устойчивыми к образованию дефекта оказались образцы второго типа укладки (средний показатель площади повреждений составил 7,69% от общей площади пластины), а худшую устойчивость показали образцы, имеющие укладку первого типа (11,81%). В соответствии с этим следует вывод о том, что оптимизация укладки слоев ПКМ позволит уменьшить среднее значение площади ударного повреждения более чем на 4%, а относительно максимальных повреждений более чем в 4 раза: с 11,81% до 2,46%.

В результате исследований было сделано заключение о том, что технология лазерной виброметрии при резонансной акустической стимуляции дефектов доказала свою эффективность при обнаружении ударных повреждений в ПКМ благодаря использованию явления локального резонанса дефектов. Усредненные изображения колебаний на поверхности ПКМ, полученные по результатам вибросканирования, позволяют определить форму дефектов и их поперечные размеры, а также оценить демпфирующие характеристики исследуемых материалов. Описываемая комплексная диагностическая система была успешно использована для оптимизации

последовательностей укладки слоев гибридных ПКМ, а также их механической прочности и ударопрочности. Было показано, что удары с энергией от 10 Дж до 40 Дж создают поврежденные участки, которые приблизительно вдвое меньше в композитах FCF конфигурации, то есть имеют лучшие демпфирующие характеристики по сравнению с композитами CFC, отличающимися более высоким коэффициентом демпфирования.

#### **4.8 Выводы по Главе 4.**

Результаты проведения экспериментальных испытаний устойчивости тонких композитов к ударным повреждениям различной энергии позволили определить критические значения суммарной энергии ударов, а также единичных воздействий, способных привести к разрушению структуры углепластикового композита толщиной 1 мм. Анализ дефектов, образованных в результате нанесения циклических ударов с повышением/понижением энергии удара, а также при фиксированном значении удара, позволил оценить динамику изменения площади повреждения в зависимости от энергии внешнего ударного воздействия. Указанные результаты могут быть использованы для анализа ударных повреждений в конструкциях из углепластиковых композитов, а также прогнозирования срока службы эксплуатируемого устройства.

Исследование устойчивости углепластика толщиной 1 мм к ударам с низкой энергией (до 10 Дж) продемонстрировало нелинейное увеличение площади видимых повреждений при увеличении энергии удара от 1 до 10 Дж. Для удара с энергией 1 Дж не было выявлено повреждений композита, а с энергией 2 Дж площадь повреждения составила 200 мм<sup>2</sup> (на лицевой стороне) и 220 мм<sup>2</sup> (с обратной стороны). Последующее увеличение энергии удара привело к значительному увеличению измеренной площади повреждения до 430 мм<sup>2</sup> (для удара 5 Дж) и более 1190 мм<sup>2</sup> (при ударе 8 Дж и больше).

Для оценки устойчивости полимерных композитов к низкоэнергетическим ударам был проведен эксперимент с последовательным

повышением энергии удара от 1 до 5 Дж и понижением от 5 до 1 Дж с шагом 1 Дж для композитов с толщиной от 1 до 5 мм. При пяти последовательных ударах с повышением энергии площадь дефекта стала видимой и достигла  $\sim 1800 \text{ мм}^2$ , с понижением энергии  $\sim 1700 \text{ мм}^2$ . Площадь поражения композитов, образовавшихся в результате последовательных ударов (при суммировании энергии удара), не превысила область дефектов, образовавшихся в результате единичных ударов с одинаковой энергией. При этом во многих случаях площадь повреждения от одиночных ударов была сопоставима по размеру с дефектами, созданными последовательными ударами с одинаковой энергией, которые имеют большую общую энергию удара.

Проведение лазерного вибросканирования при акустической стимуляции позволило оценить эффективность использования слоев льна для повышения уровня поглощения энергии в гибридных композитах на основе углеродных волокон. Усредненные изображения амплитуд вибраций на поверхности композитов, имеющих ударные повреждения энергией до 40 Дж, были использованы для оценки степени повреждения гибридных композитов путем анализа показателя отношения сигнал/шум (SNR), рассчитанного по амплитудному значению скорости вибрации на поверхности материала. Анализ величины SNR и демпфирующих характеристик двух конфигураций гибридных композитов подчеркнул влияние демпфирующих характеристик материала на размер образованной в результате ударных нагрузок области повреждения. В гибридных композитах с льняным покрытием и углепластиковым сердечником среднее значение коэффициента демпфирования, измеренного в диапазоне частот от 10 Гц до 100 кГц, составило 0,85; в отличие от коэффициента демпфирования композитов, имеющих углеродное покрытие и льняной сердечник, равного 0,9. Демпфирующие свойства композитов с различным типом укладки слоев оказали влияние и на устойчивость материалов к ударным нагрузкам, что подтвердили результаты НК. Ударные повреждения, нанесенные в гибридных композитах с льняным покрытием, создали дефект, площадь которого в два

раза меньше площади ударных повреждений, образованных в гибридных композитах с углеродным покрытием при одинаковых условиях нанесения ударных нагрузок. Результаты тестирования позволили оптимизировать порядок укладки слоев углеродных и льняных волокон с целью обеспечения лучшей устойчивости композитов к ударным нагрузкам. Из полученных данных также следует, что резонансная ультразвуковая вибротермография может быть использована для количественной оценки степени повреждения композитов и оптимизации укладки слоев разрабатываемых материалов, включая гибридные конфигурации натуральных волокон с синтетическими волокнами, извлеченными из различных частей растений (листьев, стеблей или плодов), характеризующихся по своей природе различными механическими свойствами для различных промышленных применений.

На основе результатов лазерного вибросканирования оценено влияние конфигурации слоев углепластиковых волокон на площадь ударного повреждения, вызванного ударом с энергией 25 Дж. Установлено, что наиболее устойчивыми к образованию дефектов оказались образцы с укладкой [+45/0/-45/90/0/90/-45/0/+45] (средний показатель площади повреждений составил 7,7% от общего объема пластины), а худшую устойчивость показали образцы, имеющие укладку [-45/90/+45/90/0/90/+45/90/-45] - площадь повреждений составила 11,81%. Средний показатель площади повреждений образцов с укладкой [90/-45/+45/90/0/90/+45/-45/0] составил 8,5%. В соответствии с экспериментальными данными следует вывод о том, что оптимизация укладки слоев композита позволяет уменьшить среднее значение площади ударного повреждения более чем на 4% в абсолютном значении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрено текущее состояние синтеза данных различных методов НК. Доказана актуальность процедуры синтеза и необходимость ее внедрения в производство, а следовательно – необходимость достижения эффективности и оперативности при получении результатов в ходе процедуры комбинирования данных.

- Проведено исследование устойчивости тонких углепластиковых композитов к ударным повреждениям. Характер роста повреждений таков, что при нанесении последовательных ударов с повышением их энергии относительно предыдущего на 1 Дж в диапазоне от 1 до 10 Дж и наоборот, площади итоговых дефектных зон для двух различных методов нанесения ударов различаются не более, чем на 6%. Проведен анализ влияния укладки слоев на ударопрочность материала. Показана возможность применения методов НК для проектирования композитов с улучшенными прочностными характеристиками, что может быть достигнуто путем оптимизации ориентации слоев на основе результатов НК.

- Разработан алгоритм автоматического распознавания дефектов и определения их характеристик по результатам использования нескольких методов НК, представленных в графическом формате, а также комбинирования полученных результатов на основе исходных данных одного из рассматриваемых методов или фотографии тестового образца.

- Алгоритм анализа данных, реализованный в программном обеспечении Defect Finder (DeFinder), предназначен для обработки графических изображений в различных форматах (\*.bmp, \*.jpg, \*.jpeg), получаемых в результате применения различных методов НК. Алгоритм является охраняемым результатом интеллектуальной деятельности (РИД) [Программа для ЭВМ «Выявление дефектов и расчет их площади по предоставленному изображению в заданном диапазоне оттенков», номер регистрации (свидетельства) 2020612786. Дата регистрации: 03.03.2020].

- В результате апробации программы установлено, что алгоритм программного обеспечения DeFinder пригоден для анализа монохромных и градиентных графических изображений с целью определения площади дефектных областей в соответствии с заданным уровнем порогового значения сигнал/шум. Программа предназначена для операторов 2-го уровня квалификации (в системе Ростехнадзора).

- Качественный анализ выявляемости дефектов в композитах показал, что различия в условиях проведения ТК и ЛВ влияют на результаты испытаний, что благоприятствует осуществлению синтеза данных. В частности, метод ЛВ является чувствительным к расстоянию между точкой ввода ультразвука и дефектами, а результаты ТК зависят от равномерности нагрева объекта. Полученные результаты синтеза данных подтверждают целесообразность взаимного дополнения данных ТК и ЛВ для повышения достоверности обнаружения дефектов различного происхождения.

- Исследование искусственных дефектов и несквозных отверстий в контрольных образцах ПКМ показало, что различие физических принципов, лежащих в основе ТК и ЛВ позволяет расширить номенклатуру выявляемых дефектов, а также скомпенсировать ряд ограничений вышеуказанных методов НК путем проведения синтеза данных. Эти ограничения связаны с определением глубины залегания дефектов, повышением эффективности оценок геометрических параметров, а также обнаружением неоднородностей, расположенных в композитах на глубине более 12 мм, что является ограничением для некоторых традиционных методов НК.

- Экспериментальное исследование прочности ПКМ толщиной 1-5 мм при нанесении последовательных повреждений копром показало нелинейное увеличение площади дефектов. Площадь дефектов, определенная по результатам нанесения последовательных ударов с повышением энергии, имеет расхождение не более 6% от площади дефектов, образованных при нанесении циклов ударов с понижением энергии эквивалентной величины.



- Установлено, что оценки площади дефектов, полученных в результате единичных ударов, а также при последовательных ударах с повышением/понижением энергии, различается не более чем на 5% при одинаковой суммарной энергии ударов. Проведение ТК и ЛВ может быть использовано для оптимизации конфигурации полимерных композитов с целью обеспечить оптимальные демпфирующие характеристики материалов и их устойчивость к ударным повреждениям.

- В современном мире, наряду с усилением требований к композиционным материалам, растут и требования к применяемым методам НК. Синтез данных результатов нескольких методов позволяет расширить границы и эффективность применения методов НК, что отвечает современным тенденциям в науке и производстве.

## 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.

**Тепловой неразрушающий контроль** – метод 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 температуры на поверхности контролируемого объекта.

**Температуропроводность (коэффициент температуропроводности)** - справочная характеристика материала, характеризующая скорость изменения температуры материала в условиях нестационарного теплообмена,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

**Теплопроводность (коэффициент теплопроводности)  $\lambda$**  – справочная характеристика материала, характеризующая мощность теплового потока, распространяющегося от точки с бóльшей температурой к точке с меньшей температурой,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

**Тепловая инерция  $e$**  - справочная характеристика материала, характеризующая «инерционность» изменения поверхностной температуры при импульсном нагреве,  $\text{Дж}/(\text{м}^2\cdot\text{К}\cdot\text{с}^{1/2})$ .

**Тепловой поток (мощность теплового потока)** – тепловая энергия, передаваемая через объект контроля в единицу времени (обычно на единицу площади),  $\text{Вт}$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

**Ультразвуковой неразрушающий контроль** – метод неразрушающего контроля материалов и изделий, основанный на регистрации параметров упругих волн, возникающих при распространении ультразвуковых колебаний с частотой от 20кГц до 50МГц в объектах контроля.

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

**Тепловой неразрушающий контроль** – метод неразрушающего контроля материалов и изделий, основанный на регистрации и анализе изменения температурных сигналов на поверхности объекта контроля.

**Лазерная Доплеровская виброметрия** – метод измерения и анализа виброскорости, виброускорения, амплитуды и частоты колебаний частиц среды на поверхности контролируемых объектов, в основе которого лежит эффект Доплера.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- $T$  – температурный сигнал, °С;  
 $\Delta T$  – дифференциальный температурный сигнал, °С;  
 $\Delta T_m$  – максимальный дифференциальный температурный сигнал, °С;  
 $\alpha$  – температуропроводность материала, м<sup>2</sup>/с;  
 $K$  – теплопроводность материала, Вт/(м×К);  
 $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  
 $C, c_n$  – теплоемкость материала, Дж/(кг×К),  
 $t$  – текущее время, с;  
 $\lambda$  – длина акустической волны, м;  
 $f$  – частота колебаний, Гц;  
 $\omega$  – угловая (циклическая) частота колебаний, рад/с;  
 $v$  – колебательная скорость частиц среды, м/с;  
 $v_0$  – амплитуда колебательной скорости частиц среды, м/с;  
 $U_{вых}$  – выходное напряжение, В;  
 $f_{вых}$  – частота генерации УЗ колебаний, кГц;  
 $S_{нов.}$  – площадь контролируемой поверхности, м<sup>2</sup>;  
 $i$  – количество слоев и источников тепла, т.е. дефектов;  
 $L_x, L_y, L_z$  – геометрические размеры образца, м;  
 $L$  – толщина изделия, м;  
 $l$  – глубина залегания дефекта, м;  
 $d$  – толщина дефекта, м.

УЗ – ультразвуковой

УЗК – ультразвуковой контроль

УЗС – ультразвуковая спектроскопия

ИК – инфракрасный

ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь

ТК – тепловой контроль

АТК – активный тепловой контроль

ТФХ – теплофизические характеристики

НК – неразрушающий контроль

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика

СВЧ – сверхвысокочастотные

УФО – ультразвуковая финишная обработка

ПММА – полиметилметакрилат

ЛДР – локальный резонанс дефекта

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н.П. Клименко Применение метода неразрушающего магнитного контроля при оценке нагруженности элементов СТС / Клименко Н.П., Коржов В.И., Кудинов С.А. // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2018. № 2. С. 45-51.
2. А.А. Абу Газал Результаты применения электрофизического метода неразрушающего контроля в заводских условиях / Абу Газал А.А., Сурин В.И., Алвахеба А.И., Бекетов В.Г., Дембицкий А.Е., Гусев Д.А. // В книге: Современные проблемы физики и технологий. VII Международная молодежная научная школа-конференция. Тезисы докладов. 2018. С. 181-182.
3. Е.В. Кузнецова Применение ультразвуковых методов неразрушающего контроля конструкций из полимерных композитных материалов / Кузнецова Е.В., Романюк В.Н. // В сборнике: роль и место информационных технологий в современной науке. сборник статей Международной научно-практической конференции. 2019. С. 82-84.123
4. А.А. Абу Газал Перспективы применения методов электрофизического неразрушающего контроля для исследовательских ядерных реакторов / Абу Газал А.А., Сурин В.И. // В книге: Инновационные ядерные реакторы малой и сверхмалой мощности. Тезисы докладов III Международной конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов. 2018. С. 10-11.31
5. Е.Э. Смирнова Применение метода неразрушающего контроля при восстановлении исторических памятников // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2019. № 2 (39). С. 118-129.123
6. А.А. Сатанов Современные методы неразрушающего контроля состояния материалов // В сборнике: VIII Всероссийский фестиваль науки. Сборник докладов. В 2-х томах. Под редакцией И.С. Соболя, Н.Д. Жилиной [и др.]. 2018. С. 68-71.
7. А.А. Никифоров Современные методы определения дефектов неразрушающими методами контроля (обзор) / Никифоров А.А., Душаньков

М.Д., Сорокин А.И. // В сборнике: современные материалы, техника и технология. Материалы 3-й Международной научно-практической конференции. Ответственный редактор Горохов А.А., 2013. С. 249-251.

8. А.В. Алифанов Актуальные проблемы прочности / Алифанов А.В., Андреев В.А., Антанович А.А., Асланян Н.С., Белоцерковский М.А., Белявин К.Е., Бердник О.Б., Бурнаев А.В., Веремейчик А.И., Викарчук А.А., Викторов С.Д., Волоконский М.В., Гончарова И.В., Грызунова Н.Н., Гусев Д.Е., Жорник В.И., Кийко В.М., Колесников С.А., Коллеров М.Ю., Коржов В.П. и др. // Витебск, 2018. Том 1 Неразрушающий контроль Соснин Ф.Р Справочник в 8 томах / Под общей редакцией В.В. Клюева. Москва, 2008. Том 1 Книга 1: Визуальный и измерительный контроль. Книга 2: Радиационный контроль (2-е издание, исправленное)

9. Burleigh, D., Kuns, D., Cowell, S., Engel, J.: Thermographic nondestructive testing of honeycomb composite structural parts of Atlas space launch vehicle. Proc, SPIE "Thermosense-", Vol.2473. pp. 132-138 (1994)

10. Д.В. Ардашев Пути повышения эффективности УЗК литых деталей для нефтегазовой промышленности / Ардашев Д.В., Лебедев С.Н. // В сборнике: Наука ЮУрГУ. Материалы 66-й научной конференции (Электронный ресурс). Ответственный за выпуск: Ваулин С.Д., 2014. С. 375-380.

11. В.М. Юмашев Комплексный радиационный контроль изделий, слоистых и композитных материалов в промышленности, авиационной и космической технике / Юмашев В.М., Кузелев Н.Р., Маклашевский В.Я. // Контроль. Диагностика. 2001. № 5. С. 35-36.

12. А.В. Равко Радиационный контроль отвалов угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий беловского района // В сборнике: Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования. Сборник научных статей международной конференции. Ответственный редактор Е. Д. Родионов. 2017. С. 148-153.

13. А.С. Бойчук Вероятностная оценка достоверности результатов ультразвукового неразрушающего контроля конструкций из ПКМ, применяемых в авиационной промышленности / Бойчук А.С., Генералов А.С., Далин М.А., Степанов А.В. // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2013. № 9. С. 36-39.

14. Д.А. Малышкин Об актуальности применения ультразвукового контроля в угольной промышленности // В сборнике: Перспективы инновационного развития угольных регионов России. Сборник трудов IV Международная научно-практическая конференция. Редакционная коллегия: Пудов Е.Ю. (ответственный редактор), Клаус О.А. (ответственный редактор), Бершполец С.И., Конопля А.А., 2014. С. 194-195.

15. И. Бухмейер-Хеврони Автоматизированные системы ультразвукового контроля элементов каркаса аэрокосмических изделий из композиционных материалов / Бухмейер-Хеврони И., Брон М., Браинин А., Сурис А. // В мире неразрушающего контроля. 2017. Т. 20. № 4. С. 7-9.

16. А.Ю. Чайкина Инновационные средства технической диагностики и неразрушающего контроля сварных и прессовых соединений трубопроводов на основе рентгеновской и ультразвуковой томографии / Чайкина А.Ю., Кабакова А.В., Иванников В.П. // В сборнике: Современные технологии извлечения нефти и газа. Перспективы развития минерально-сырьевого комплекса (российский и мировой опыт). Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции с международным участием в честь 25-летия высшего нефтяного образования Удмуртской Республики, посвященной памяти основателя нефтяного факультета УдГУ доктора технических наук Кудинова Валентина Ивановича (24.05.1931 -19.05.2017). 2018. С. 389-399.

17. В.П. Иванников Развитие современных технологий диагностики и контроля на основе методов ультразвуковой томографии / Иванников В.П., Чайкина А.Ю., Кабакова А.В. // В сборнике: Приоритеты стратегии научно-технологического развития России и обеспечение воспроизводства



инновационного потенциала высшей школы. Материалы Всероссийской научной конференции. Ответственный редактор А.М. Макаров. 2019. С. 49-55

18. В.М. Юмашев Радиационная интроскопия и томография контроля слоистых и композитных материалов в авиационной и космической технике / Юмашев В.М., Кузелев Н.Р., Маклашевский В.Я. // Тяжелое машиностроение. 2005. № 9. С. 6-7.

19. В.А. Горшков Трансмиссионная радиационная томография и томография на обратно рассеянном излучении / Горшков В.А., Кузелев Н.Р., Маклашевский В.Я., Юмашев В.М. // Контроль. Диагностика. 2014. № 3. С. 41-44.

20. П.А. Сенюткин Использование ПЭП с различным типом фокусировки при ультразвуковом контроле труб // Контроль. Диагностика. 2007. № 9. С. 69-71.

21. А.Д. Мирошник Способ ультразвуковой толщинометрии с высоким разрешением / Мирошник А.Д., Гурин С.Ф., Лексахов О.Б., Елисеев В.Н. // Патент на изобретение RU 2554323 С1, 27.06.2015. Заявка № 2014122386/28 от 03.06.2014.

22. Л.И. Романова Метод А-эхографии. Биометрия глаз / Романова Л.И., Луговкина К.В., Бедретдинов А.Н. // В книге: Ультразвуковые исследования в офтальмологии. Руководство для врачей. Москва, 2019. С. 53-76.

23. И.Э. Азнаурян Измерение поперечного размера глазного яблока методом в-сканирования с использованием линейного датчика / Азнаурян И.Э., Шпак А.А., Баласанян В.О., Узуев М.И., Кудряшова Е.А. // Российская детская офтальмология. 2020. № 4. С. 38-43.

24. А.Л. Галиновский Технологии производства и диагностики композитных конструкций летательных аппаратов / Галиновский А.Л., Бочкарев С.В., Нелюб В.А. // Учебное пособие / Старый Оскол, 2019.

25. М.А. Комков Технология производства и диагностика качества композитных конструкций ракетно-космической техники. Обеспечение

качества производства композитных конструкции / Комков М.А., Бочкарев С.В., Галиновский А.Л., Нелюб В.А., Тарасов В.А., Романенков В.А., Баскаков В.Д. // Учебник / Под редакцией М. А. Комкова, А. Л. Галиновского. Старый Оскол, 2021.

26. Л.В. Осипов Трехмерное ультразвуковое исследование: особенности визуализации объемных данных / Осипов Л.В., Кульберг Н.С., Леонов Д.В., Морозов С.П. // Медицинская техника. 2020. № 2 (320). С. 51-55.

27. В.Д Бучельников Электромагнитное возбуждение ультразвука в антиферромагнетиках типа легкая плоскость / Бучельников В.Д., Никишин Ю.А. // Челябинский физико-математический журнал. 1998. Т. 6. № 1 (2). С. 90-95.

28. Б.Ф. Бочкарев Ультразвуковой диагностический анализатор / Бочкарев Б.Ф., Хадарцев А.А., Смирнов В.А., Лурье И.Б., Рогов М.А. // Патент на полезную модель RU 50396 U1, 20.01.2006. Заявка № 2005127213/22 от 30.08.2005.

29. В.В. Ваганов Датчики полиграфического оборудования / Ваганов В.В., Клюкин В.Ю., Харитонов В.С. // Санкт-Петербург, 2014.

30. А.Г. Годнев Дискретный емкостный уровнемер // Годнев А.Г., Лукашин Ю.В., Свицын А.А., Сумский В.П. Авторское свидетельство SU 1586372, 30.11.1992. Заявка № 4434681 от 02.06.1988.

31. S.D. Barsukou Features of periodical acoustic impedance structure and acoustic wave interaction in novel controllable saw device / Barsukou S.D., Khakhomov S.A., Jun K. // Problems of Physics, Mathematics and Technics. 2018. № 4 (37). С. 7-12.

32. П.Г. Кузнецов Входной акустический импеданс метаматериала с гексагональной симметрией / Кузнецов П.Г., Шевяхов Н.С. // В сборнике: Физика и технология наноматериалов и структур. материалы Международной научно-практической конференции. Юго-Западный государственный университет. 2013. С. 227-230.

33. К.С. Паврос Исследование распространения ультразвукового импульса в струйном неоднородном волноводе / Паврос К.С., Реука С.В. // Дефектоскопия. 2008. № 3. С. 59-71.

34. Р.С. Коновалов Снижение длительности акустического сигнала на приемнике за счет воздействия на излучатель сигналом сложной формы / И Б.Ч., Коновалов Р.С., Коновалов С.И., Кузьменко А.Г., Ошурков И.Ю., Цаплев В.М. // В сборнике: . сборник статей победителей X Международной научно-практической конференции: в 3 частях. 2017. С. 111-118.

35. Д.О. Аксенов Ультразвуковая ванна для исследования демонтажа обмоток электродвигателей при ремонтах / Аксенов Д.О., Кашин А.И., Немировский А.Е., Сергиевская И.Ю. // В сборнике: Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи. материалы IV российской молодежной научной школы-конференции: в 2 томах. Томский политехнический университет. 2016. С. 46-49.

36. С.К. Астунин Ультразвуковая ванна / Астунин С.К., Нефедьев А.И. // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2019. № 2 (27). С. 57-59.

37. А.В. Кириков Локальная иммерсионная ванна для ультразвукового контроля листов / Кириков А.В., Щербаков В.А., Пашков П.В. // Патент на изобретение RU 2640450 С1, 09.01.2018. Заявка № 2016143051 от 01.11.2016.

38. Г.М. Грачева К вопросу о расчете акустического поля сферически вогнутого излучателя // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 9 (122). С. 246-248.

39. Н. Алешин Особенности возбуждения и распространения ультразвуковых волн / Алешин Н., Ремизов А., Дерябин А. // Москва, 2017.

40. А.И. Солдатов Ультразвуковая аппаратура с волноводным акустическим трактом // автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск, 2011

41. D.A. Derusova Investigating vibration characteristics of magnetostrictive transducers for air-coupled ultrasonic NDT of composites / Derusova D.A., Vavilov V.P., Druzhinin N.V., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. // NDT and E International, 2019, 107, DOI: 102151
42. F. Medel On the use of laser-scanning vibrometry for mechanical performance evaluation of 3D printed specimens / Medel F., Esteban V., Abad J. // 2021 Materials and Design 205, DOI: 109719
43. J. Segers Nonlinear local wave-direction estimation for in-sight and out-of-sight damage localization in composite plates / Segers J., Hedayatrasa S., Poelman G., Van Paeppegem W. Kersemans M. // 2021 NDT and E International 119, DOI: 102412
44. А.И. Коробов Диагностика металлических пластин с остаточными напряжениями и дефектами методами нелинейной лазерной сканирующей виброметрии / Коробов А.И., Изосимова М.Ю., Одина Н.И. // Акустический журнал. 2015. Т. 61. № 3. С. 317.
45. А.И. Коробов Нелинейные упругие волны в твердотельном изотропном клине с дефектами / Коробов А.И., Агафонов А.А., Изосимова М.Ю. // Журнал технической физики. 2018. Т. 88. № 3. С. 385-391.
46. I. Solodov Mode matching to enhance nonlinear response of local defect resonance / Solodov I., Kreutzbruck M. // Journal of Sound and Vibration, 2019, 461, 114916
47. New opportunities for NDT using non-linear interaction of elastic waves with defects Solodov, I., Döring, D., Busse, G. Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering, 2011, 57(3), стр. 169–182
48. I. Solodov A local defect resonance to enhance acoustic wave-defect interaction in ultrasonic nondestructive evaluation / Solodov I., Bai, J., Bekgulyan S., Busse G. // Applied Physics Letters, 2011, 99(21), 211911
49. I. Solodov New opportunities in ultrasonic characterization of stiffness anisotropy in composite materials / Solodov I., Döring D., Rheinfurth M., Busse G. // RILEM Bookseries, 2012, 6, стр. 599–604

50. D.A. Derusova Infrared Thermographic Testing of Hybrid Materials Using High-Power Ultrasonic Stimulation / Derusova D.A., Vavilov V.P., Guo X., Shpil'noi V.Y., Danilin N.S. // Russian Journal of Nondestructive Testing, 2018, 54(10), стр. p.733–739
51. D.A. Derusova Ultrasonic spectroscopic analysis of impact damage in composites by using laser vibrometry // Derusova D., Vavilov V., Sfarra S., Chulkov A., Pawar S. // Composite Structures, 2019, 211, стр. 221–228
52. D.A. Derusova Investigating vibration characteristics of magnetostrictive transducers for air-coupled ultrasonic NDT of composites / Derusova D.A., Vavilov V.P., Druzhinin N.V., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. // NDT and E International, 2019, 107, DOI:0102151
53. Д.В. Харитонов Способ визуально-оптического контроля поверхности / Харитонов Д.В., Терехин А.В., Амосов А.И., Тычинская М.С., и др. // Патент на изобретение 2746674 С1, 19.04.2021. Заявка № 2020128097 от 24.08.2020.
54. А.А. Дунай Современные методы диагностирования. Шерография // В сборнике: Сборник лучших докладов студенческой научно-технической конференции МГТУ ГА. 2017. С. 22-24.
55. С.А. Дегтярев Сканирование сфокусированного лазерного пучка апертурным зондом ближнепольного микроскопа / Дегтярев С.А., Серафимович П.Г. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2014. Т. 57. № 8-9. С. 745-752.
56. Современная теория и технология теплового неразрушающего контроля РЖ 19И. Общие вопросы химической технологии. 2006. № 13. 06.13-19И.197
57. В.П. Вавилов Тепловой неразрушающий контроль материалов и изделий (обзор) // Дефектоскопия. 2017. № 10. С. 34-57.
58. В.П. Вавилов Обработка результатов активного теплового контроля методом вейвлет-анализа / Вавилов В.П., Ширяев В.В., Хорев В.С. // Дефектоскопия. 2011. № 4. С. 70-79.

59. А.О. Чулков THERMO\_NN / Чулков А.О., Нестерук Д.А., Вавилов В.П. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020619186, 13.08.2020. Заявка № 2020618447 от 05.08.2020.

60. Д.А. Дерусова Тепловой вибротермографический контроль композитов с использованием резонансной ультразвуковой и оптической стимуляции // автореферат дис. кандидата технических наук / Нац. исслед. Том. политехн. ун-т. Томск, 2016

61. G. Dobmann Non-destructive materials characterization of irradiated nuclear pressure vessel steel samples by use of micromagnetic techniques and in terms of mechanical properties / Dobmann G., Altpeter I., Kopp M. // Defektoskopiya. 2006. № 12. С. 8.

62. К.Е. Черкасов Возможности совершенствования статистического приёмочного контроля качества толстолистового проката для оао "газпром" и опыт их реализации / Черкасов К.Е., Румянцев М.И. // В сборнике: УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ. Материалы VIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Редакционная коллегия: Новиков Д.А. (главный редактор), Чукин М.В., Мезин И.Ю., Гун Г.С., Касаткина Е.Г., Яковлева Е.С., Джержыкина Л.В., 2011. С. 342-346.

63. И.О. Котовщиков Оценка применимости искусственных нейронных сетей в задаче анализа информативных сигналов, полученных методом динамического индентирования // В сборнике: Сборник трудов VII Конгресса молодых ученых. Санкт-Петербург, 2018. С. 106-109

64. Jaccard P. Distribution de la flore alpine dans le Bassin des Dranses et dans quelques regions voisines // Bull. Soc. Vaudoise sci. Natur. 1901. V. 37. Bd. 140. S. 241—272

65. А.О. Chulkov Analyzing efficiency of optical and THz infrared thermography in nondestructive testing of GFRPs by using the Tanimoto criterion / Chulkov A.O., Sommier A., Pradere C., Vavilov V.P., Siddiqui, A.O., Prasad Y.L.V.D. // NDT and E International, Volume 117, 2021, Номер статьи 102383

66. В.П. Вавилов К выбору оптимального алгоритма обработки инфракрасных термограмм в активном тепловом контроле // Дефектоскопия. 2013. № 11. С. 5-14. Watson C.C. Signal-to-noise ratio equalized filtered back-projection for positron emission tomography // IEEE Transactions on Nuclear Science, Volume 56, Issue 1, 2009, Номер статьи 4782139, Pages 108-115
67. В.В. Lee An Evaluation of Ultrasound NDE Correlation Flaw Detection Systems / Lee B.B., Furgason E.S. // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Volume 29, Issue 6, 1982, Pages 359-369
68. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль // М.: Спектр, 2009. 544 с.
69. Li W. Visual recognition in rgb images and videos by learning from rgb-d data / Li W., Van Gool L., Chen L., Xu D. // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2018. Т. 40. № 8. С. 2030-2036.
70. В.Ю. Шпильной Программа для ЭВМ: «Выявление дефектов и расчет их площади по предоставленному изображению в заданном диапазоне оттенков», номер регистрации (свидетельства) 2020612786. Дата регистрации: 03.03.2020
71. А.С. Охотин Анализ температурных зависимостей коэффициента температуропроводности материалов / Охотин А.С., Марюшин Л.А., Пименова Е.Л., Афанасьева Е.В. // Энергосбережение и водоподготовка. 2009. № 1 (57). С. 43-46.
72. V.P. Vavilov Nondestructive testing of composite T-Joints by TNDT and other methods / Vavilov V., Chulkov A., Dubinskii S., Derusova D., Zhvyrbliia V. // Polymer Testing, 2021, 94, DOI:107012
73. V.P. Vavilov Comparative study of active infrared thermography, ultrasonic laser vibrometry and laser ultrasonics in application to the inspection of graphite/epoxy composite parts / Vavilov V.P., Karabutov A.A., Chulkov A.O., Cherepetskaya E.B., Mironova E.A. // Quantitative InfraRed Thermography Journal, 2020, 17(4), стр. 235–248

74. Vavilov V. P., Burleigh D. D. Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing // *NDT & E International*. – 2015. – vol. 73. – pp. 28-52.
75. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль // Москва, ИД Спектр, 2009. 544 стр.
76. Post W. Non-destructive monitoring of delamination healing of a CFRP composite with a thermoplastic ionomer interlayer / Post W., Kersemans M., Solodov I., Van Den Abeele K., García S.J., van der Zwaag S. // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017; 101: 243-253.
77. V.P. Vavilov Determining the Lateral Size of Subsurface Defects during Active Thermal Nondestructive Testing / Vavilov V.P., Pawar S. // *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, Vol. 52, No. 9, pp. 528–531
78. М.И. Денисюк Формирование решеток микролинз методом дозированной фотополимеризации УФ-отверждаемых оптических композитов / Денисюк М.И., Фокина И.Ю. // *Оптический журнал*. 2006. Т. 73. № 11. С. 90-93.
79. А.В. Стукач Технологические режимы формирования антифрикционных покрытий из композитов / Стукач А.В., Башкарев А.Я., Букреев В.В. // *Металлообработка*. 2001. № 4 (4). С. 25-28.
80. А.К. Хрипунов Формирование композита на основе наночастиц  $se^{\circ}$ , стабилизированных поливинилпирролидоном, и гель-пленок целлюлозы *acetobacter xylinum* / Хрипунов А.К., Ткаченко А.А., Баклагина Ю.Г., Боровикова Л.Н., Нилова В.К., Смыслов Р.Ю., Клечковская В.В., Матвеева Н., Волков А.Я., Лаврентьев В.К., Вылегжаина М.Э., Суханова Т.Е., Копейкин В.В. // *Журнал прикладной химии*. 2007. Т. 80. № 9. С. 1516-1524.
81. D.A. Derusova Evaluation of equivalent defect heat generation in carbon epoxy composite under ultrasonic stimulation by using infrared thermography / Derusova D.A., Vavilov V.P., Pawar S.S. // *International Scientific Conference on Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials, RTERP 2014*. – Vol. 81. – Issue 1. – 2015. – P. 012084-1–012084-8.





Справка утверждена на объединенном семинаре лаборатории контроля качества материалов и конструкций и лаборатории локальной металлургии в аддитивных технологиях ИФПМ СО РАН (протокол №57 от 02.09.2021 г.).

Заведующий лабораторией контроля  
качества материалов и конструкций, к.ф.-м.н.

В.Е. Рубцов

Директор Института  
д.т.н.

Е.А. Колубаев

