

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

На правах рукописи



Шпильной Виктор Юрьевич

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ СИНТЕЗА
ДАНЫХ ТЕПЛОВОГО И УЛЬТРАЗВУКОВОГО
ВИБРОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, Д.А. Дерусова

Томск – 2021

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

Научный руководитель:

Дерусова Дарья Александровна
кандидат технических наук

Официальные оппоненты:

Клопотов Анатолий Анатольевич
доктор физико-математических наук,
профессор, ФГАОУ ВО «Томский
государственный архитектурно-
строительный университет», профессор
кафедры прикладной механики и
материаловедения (г. Томск)

Лобода Егор Леонидович
доктор физико-математических наук,
ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский
государственный университет»,
заведующий кафедрой физической и
вычислительной механики Механико-
математического факультета (г. Томск)

Защита состоится «15» марта 2022 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 502.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.13,
к.т.н., доцент



Шевелева Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Применение одного или нескольких методов неразрушающего контроля (НК) обеспечивает выявление дефектов в тестируемых объектах, а также выработку рекомендаций для проведения их ремонта или замены. Указанный подход позволяет своевременно предотвратить возникновение аварийных ситуаций, а также обеспечить длительную и безопасную эксплуатацию изделий. В связи с этим, совершенствование существующих диагностических методов, а также создание новых технологий контроля качества, является актуальной темой научных исследований. Последнее замечание тем более справедливо для теплового вида неразрушающих испытаний композитов, который в последние годы приобретает все бóльшую популярность.

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 данной области активны 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 эта тематика разрабатывается в Lawrence Livermore National Laboratory, Wayne State University, Sandia National Laboratories и др. В Великобритании – это 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 – Университет Бейханг, в Сингапуре – Национальный Университет Сингапура и др. Исследования по тепловому НК в России проводятся преимущественно в ЦПТ при НИИ ТПУ (г. Томск), ЦНИИ СМ (г. Хотьково), ОмГТУ (г. Омск), НИИИМ 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 проводились на основе классических методов НК, разработанных ранее В.П. Вавиловым, Д.А. Дерусовой и А.О. Чулковым в Томском политехническом университете (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;
- провести 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 программно-аппаратного комплекса 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 и сканирующей лазерной Допплеровской виброметрии обеспечивает взаимодополняющую информацию о структурных дефектах в ПКМ и повышает достоверность обнаружения и оценки параметров дефектов различного происхождения.

- Различие физических принципов, лежащих в основе теплового контроля и лазерной виброметрии, 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.

- Качественный анализ выявляемости дефектов в композитах показал, что различия условий проведения теплового контроля и лазерной виброметрии влияет на результаты испытаний и благоприятствует осуществлению синтеза данных: метод лазерной виброметрии является чувствительным к расстоянию между точкой ввода ультразвука и дефектами, а результаты ТК зависят от равномерности нагрева объекта.

- В результате анализа дефектов в углепластиковых композитах с использованием активной ИК термографии, установлено, что площадь ударных повреждений в углепластике нелинейно связана с энергией удара в диапазоне малых энергий (от 0 до 10 Дж). Установлено, что площадь дефектов, возникающих в результате последовательных ударов с повышением и понижением энергии, сопоставимы и не превышают размеров дефектов, полученных в результате нанесения одиночных ударов эквивалентной энергии.

Практическая значимость работы.

- Разработан алгоритм автоматического анализа результатов теплового НК и лазерной виброметрии с целью обнаружения и определения 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 сканирующей лазерной виброметрии фирмы

Polytec позволяет производить сканирование виброперемещений вплоть до единиц микрометров в секунду в широком диапазоне частот (от 0 до 250 кГц). Примененная в 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 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:

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

- 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);

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

- Международный индивидуальный грант Европейского союза по обмену студентами по программе «Erasmus+» в Политехническом университете г. Бари (Италия, 2019);

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

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

- 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 119 страниц текста (без учета приложений), 31 рисунок, 12 формул и 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описаны актуальность и научная новизна темы диссертационной работы, а также практическая значимость научных исследований. Сформулированы цель и задачи диссертационных исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена обзору современных методов НК ПКМ: рассмотрены основные принципы, лежащие в основе различных методов НК композиционных материалов, а также методики синтеза данных. Описаны методы анализа свойств ПКМ с использованием теплового потока и упругих акустических волн. Описаны основные проблемы теплового и ультразвукового НК композитов, а также проведен анализ развития аппаратуры ТК и ЛВ за последнее десятилетие. Описаны перспективные методы, разрабатываемые ведущими отечественными и зарубежными научными группами в области НК ПКМ, включая задачи исследования физических свойств материалов. По материалам эксперта в области НК авиакосмической промышленности США D. Burleigh, приведены результаты оценки эффективности различных методов НК при исследовании энергетических оболочек ракет, изготовленных из ПКМ (Табл. 1).

Таблица 1 - Оценка результатов неразрушающего контроля энергетических оболочек ракет из полимерных композитов.

Типовые дефекты, требующие обнаружения	Методы НК						
	УЗ (На проход)	УЗ (импедансный)	МКВ	Рентген	Компьютерная томография	ТК	ЛВ
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
Скорость измерений	5	5	2	5	6	6	7
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

Вторая глава содержит информацию о методиках распознавания дефектов при использовании методов НК, отличающихся по способам физического воздействия на объект и получения первичных данных. Проведен обзор существующих методов оценки субъективности решений оператора (мера Жаккара и критерий Танимото) при выявлении дефектов, а также исследован метод оценки дефектных областей на основании критерия отношения сигнал-шум (SNR) для теплового контроля (ТК, $SNR > 1$) и лазерной виброметрии (ЛВ, $SNR > 3$). Рассмотрена возможность обработки результатов различных методов НК, представленных в виде графических изображений с RGB-интерпретацией сигнала: определение значения SNR , распознавание дефектных областей, определение

характеристик дефектов, а также синтез данных. Разработанный алгоритм анализа данных, реализованный в программном обеспечении DeFinder, показан на рисунке 1.

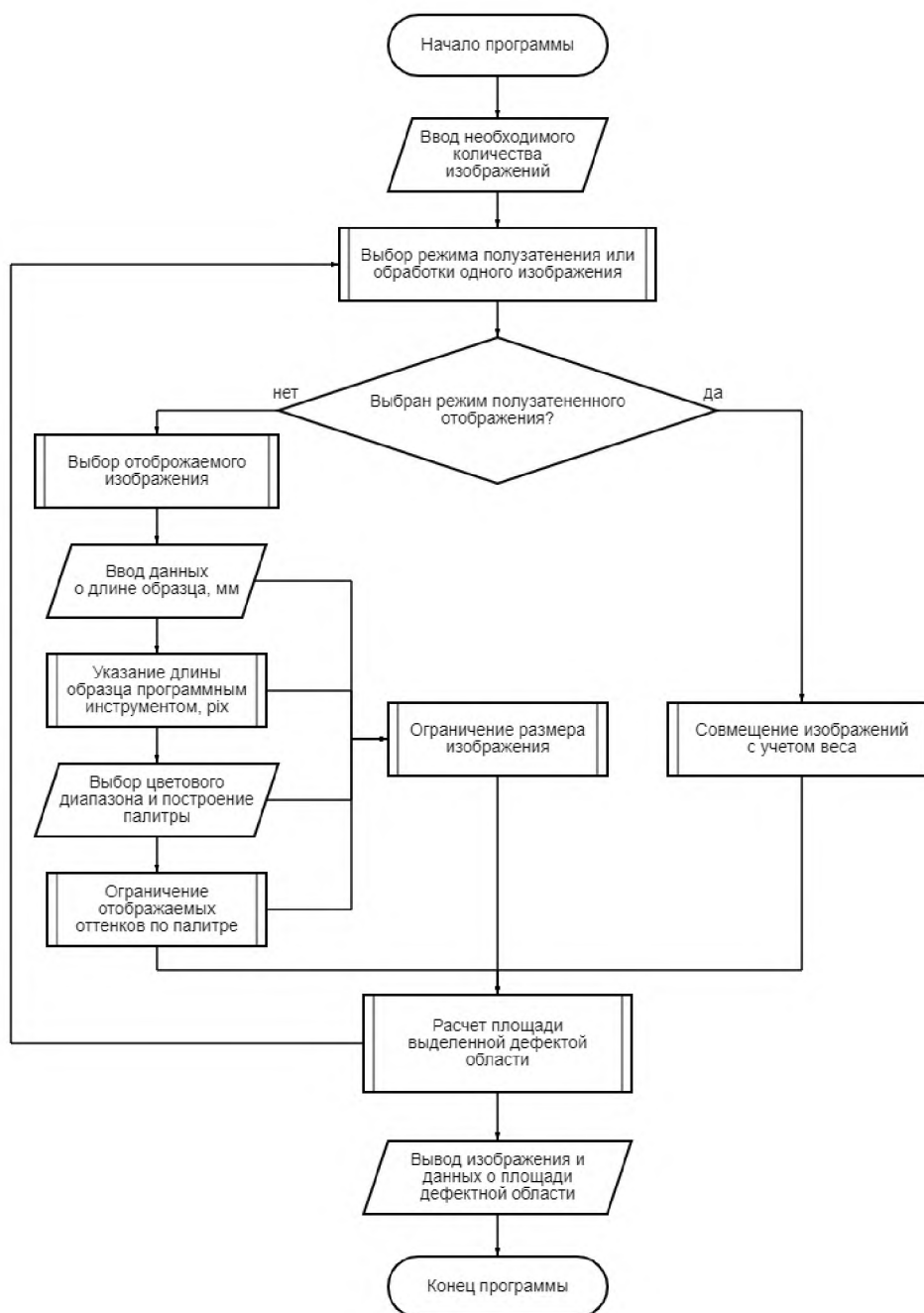


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма распознавания и определения характеристик дефектов.

Приведены результаты тестирования чувствительности алгоритма распознавания дефектов в программе DeFinder к изменению цветовой палитры, а также выполнен анализ точности определения характеристик дефектов при заданном значении отношения сигнал/шум с сохранением исходного пространственного разрешения изображения.

Проведена апробация работы вышеуказанной программы путем анализа трех контрольных образцов ПКМ: №1 - стеклопластикового образца из композита с дефектами различного происхождения (воздушная полость, вспененный наполнитель, непроклей,

связующее), №2 – стеклопластикового образца из композита с дефектами в виде несквозных отверстий круглой формы, №3 – образца из углерод-углеродного композита с ударными повреждениями. На рисунке 2 приведены результаты тестирования образцов №1 и №2.

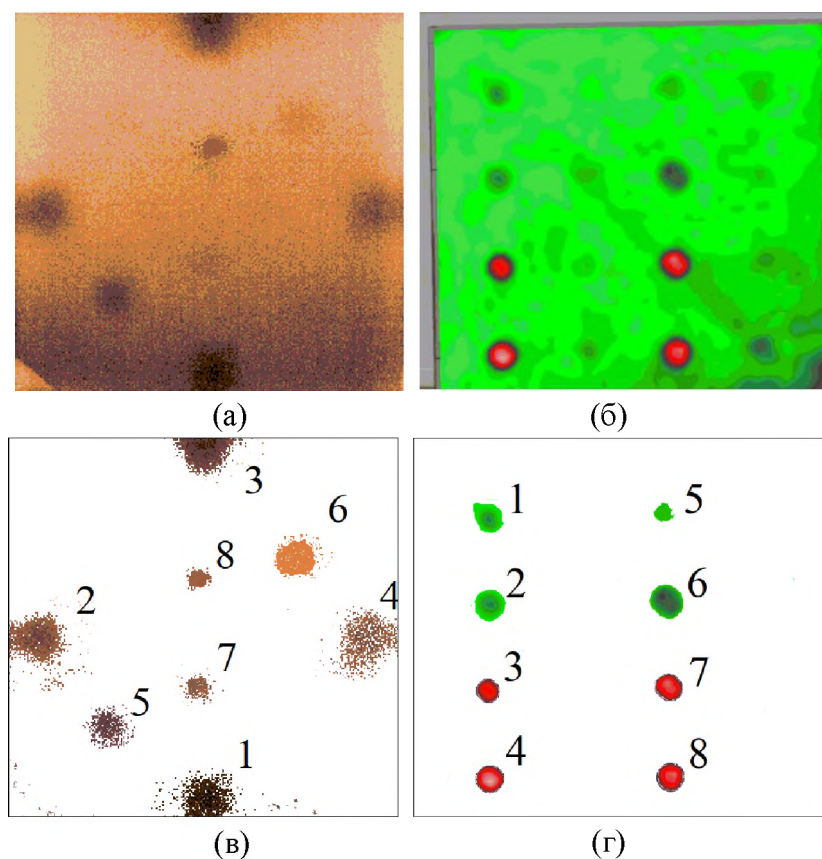


Рисунок 2 – Исходные изображения (а, б) и результаты обработки с помощью программы DeFinder (в, г) при тепловом контроле образца №1 (а, в) и лазерной виброметрии образца №2 (б, г).

На основании результатов контроля ПКМ показано, что разработанный алгоритм автоматического распознавания дефектов и определения их площади применим к анализу экспериментальных данных, получаемых с использованием нескольких методов НК и представленных в графическом формате. Результаты определения площади дефектов в тестовых образцах ПКМ с использованием программы DeFinder приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Оценка площади дефектов по результатам НК тестовых образцов ПКМ в программе DeFinder.

Номер дефекта	ТК, образец №1			ЛВ, образец №2		
	$S_d, \text{мм}^2$	$S_{real}, \text{мм}^2$	δ	$S_d, \text{мм}^2$	$S_{real}, \text{мм}^2$	δ
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

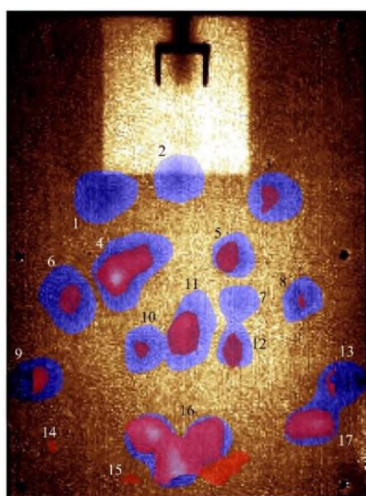
6	439	400	9,8	438	400	9,5
7	109	100	9	405	400	1,3
8	101	100	1	411	400	2,8

Согласно полученным данным, расхождение оценок с истинными величинами не превышает 9,8% при проведении ТК искусственных дефектов в образце №1 и 9,5% при проведении ЛВ несквозных отверстий в образце №2. В рамках верификации алгоритма расчета площади дефектов по результатам ТК и ЛВ показано, что погрешность оценки площади дефектов в программе DeFinder определяется погрешностью используемого метода НК.

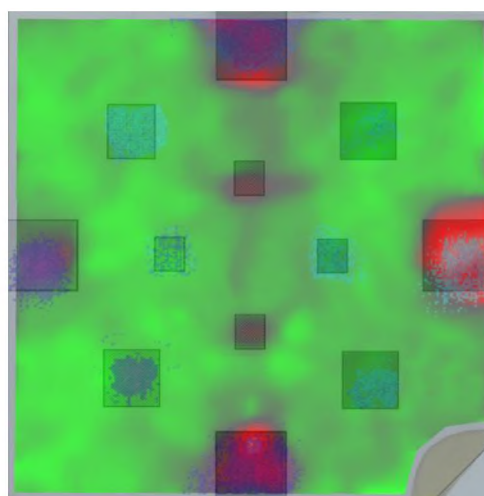
С целью повышения достоверности обнаружения дефектов различного происхождения было проведено комбинирование результатов ТК и ЛВ на примере тестирования образцов №3 и №1 (рисунок 3) в программе DeFinder.

Различие физических принципов, лежащих в основе ТК и ЛВ, позволило в определенной степени скомпенсировать ограничения вышеуказанных методов, а также обосновать необходимость проведения синтеза данных нескольких методов НК.

В главе 3 рассмотрена задача модернизации существующих и создания новых методов НК, связанных с разработкой новых видов ПКМ. Традиционно для повышения достоверности экспериментальных данных применяют комбинирование различных методов НК, однако определение характеристик дефектов имеет критическое значение для прогнозирования срока службы и принятия решения о возможности эксплуатации изделия. С целью сокращения времени проведения НК и автоматизации процесса обработки данных в настоящей работе предложена методика синтеза данных ТК при оптической стимуляции и ЛВ при акустической стимуляции объекта исследования на основе анализа соответствующих графических изображений. Анализ данных выполнен на примере исследования контрольных образцов ПКМ с нормированными дефектами.



(a)



(б)

Рисунок 3 – Комбинирование результатов ТК (синий цвет) и ЛВ (красный цвет) углерод-углеродного композита с ударными повреждениями (а) и стеклопластикового композита с искусственными дефектами (б).

Исходя из анализа физических процессов, лежащих в основе ТК, сделаны выводы о целесообразности его использования при экспрессной диагностике изделий из ПКМ толщиной до 20 мм, включая определение ориентации волокон, количества слоев, а также выявление подповерхностных дефектов. Продемонстрировано, что при исследовании теплофизических характеристик (ТФХ) материалов возможно определение параметров дефектов, включая глубину залегания дефектов (до 6 мм), по анализу карт ТФХ материалов. К недостаткам метода следует отнести сравнительно высокие энергозатраты на нагрев при исследовании светоотражающих и полупрозрачных материалов, небольшую глубину обнаружения дефектов, а также наличие излучательной помехи после окончания оптической стимуляции (устраняется конструктивно).

Следуя физическому принципу работы ЛВ, выделяют следующие преимущества метода: высокая точность измерений (мкм/сек при измерении виброскорости и нм – при определении амплитуды виброперемещения), частотная избирательность (возможность исследования резонансных частот и форм колебаний дефектов как в заданном диапазоне частот, так и на выбранной частоте стимулирующих акустических волн), отсутствие влияния присоединенной массы, нечувствительность к температуре объекта, возможность проведения контроля в различных средах (жидкости, вакууме и т.п.). К недостаткам метода относят ограничения при контроле массивных и инертных изделий с повышенными демпфирующими свойствами, а также трудности выявления заложенных дефектов, имеющих схожие демпфирующие характеристики с исследуемым материалом.

Сравнительный анализ двух методов НК показал преимущества проведения синтеза данных с целью повышения достоверности результатов контроля. Лабораторная установка для проведения синтеза данных ТК и ЛВ приведена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Лабораторная установка для проведения синтеза данных ТК и ЛВ.

Оборудование для проведения двухсторонней процедуры ТК включает нагреватели (галогенные лампы суммарной мощностью 2 кВт) и инфракрасную камеру Optris PI640 (температурное разрешение 75 мК, частота записи кадров до 120 Гц), расположенные с двух сторон от изделия.

Оборудование для проведения ЛВ включает сканирующий лазерный виброметр PSV-500-3DHV (Polytec), генератор сигналов специальной формы AWG-4163 (Актаком) и амплитудный усилитель AVA-1810 (Актаком). Акустическую стимуляцию изделий осуществляли с использованием пьезопреобразователя FT-27Т, закрепленного на поверхности композита.

Оценка повторяемости и достоверности результатов двух методов НК была проведена на примере контрольного образца размером 450×350×10 мм, состоящего из 14 армирующих слоев углерод-углеродной ткани, спеченной и спрессованной в графитной матрице. Для нанесения ударов использован копер, соответствующий ГОСТ 33496-2015. Карта дефектов композиционного материала приведена на рисунке 5 (г).

Двухсторонний ТК был проведен на расстоянии 0.4 м от источника стимуляции до объекта. Регистрацию температурного поля на поверхности исследуемого ПКМ проводили во время оптической стимуляции и последующих 30 секунд. Дальнейшую математическую обработку ИК термограмм и их анализ проводили с использованием программы ThermoLab Pro (Томский политехнический университет), включающей набор алгоритмов обработки данных, общепринятых в ТК.

Диагностика ПКК методом ЛВ при акустической стимуляции была проведена с использованием лазерного виброметра PSV-500-3D-HV. Акустическую стимуляцию композита осуществляли синусоидальным сигналом, модулированным в диапазоне частот

от 50 Гц до 100 кГц, с использованием пьезокерамического преобразователя ССН-5938D-28LBPZT-4. 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 5 приведены результаты ТК (а), ЛВ (б), а также результаты синтеза данных (в).

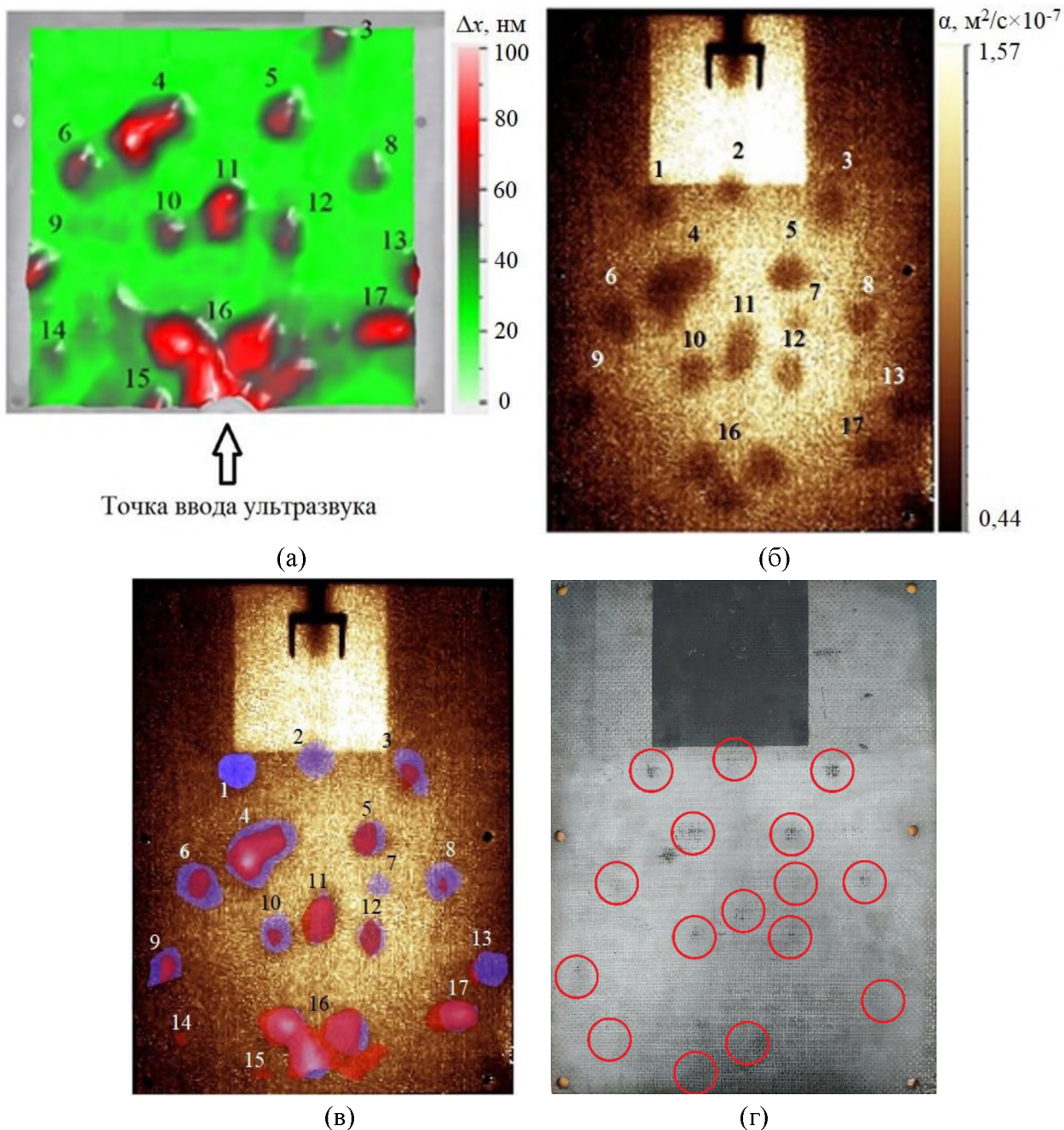


Рисунок 5 – Распределение амплитуды виброперемещений (а) на поверхности углерод-углеродного композита и карта его температуропроводности (б), используемые для синтеза данных (в) ЛВ (красный цвет) и ТК (синий цвет), а также схема расположения дефектов (г).

При исследовании ПКМ с ударными повреждениями энергией 5 Дж было показано, что области дефектов №3, 6, 8-10 и 13, определенные двумя методами НК, отличаются

между собой, что, по-видимому, обусловлено различными физическими принципами, лежащими в основе методов исследований, а также различными условиями проведения испытаний. Ключевым моментом является взаимное дополнение результатов, полученных при выявлении дефектов №1, 2, 7 методом ТК и дефектов №14, 15, 17 с использованием 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), выявленные двумя методами НК. Такие дефекты свидетельствуют о высокой степени повреждения контролируемого изделия.

По результатам синтеза данных были обнаружены все ударные повреждения в углерод-углеродном композите, что подтверждает взаимное дополнение данных ТК и ЛВ и повышение достоверности испытаний.

В главе 4 рассмотрена динамика развития дефектных областей в тонких пластинах ПКМ (толщина до 5 мм) при нанесении последовательных ударных повреждений с повышением/понижением энергии от 1 до 10 Дж с шагом 1 Дж. Размеры исследуемых образцов ПКМ составили 100×150 мм при толщинах от 1 до 5 мм. После каждого удара проводили НК тестовых ПКМ с использованием ТК и ЛВ.

Испытания тестовых ПКМ методом ТК с оптической стимуляцией включали исследование изменения ТФХ материала с дефектами вследствие появления расслоения при нанесении ударных повреждений. Наличие воздушных полостей в ПКМ позволило определить характеристики дефектов на основании анализа карт ТФХ рассматриваемых материалов.

Исследование ударных повреждений в ПКМ при лазерной виброметрии проводили с использованием резонансной стимуляции дефектов. Указанный подход подразумевает определение резонансных частот дефектов при их широкополосной акустической стимуляции с целью интенсификации процесса вибраций в области неоднородностей, а, значит, их более эффективному обнаружению при лазерном вибросканировании. Широкополосную стимуляцию проводили синусоидальным сигналом, модулированным в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц. Это обеспечило возможность определить размер и расположение дефектных областей за счет активации вибраций дефектов на их собственной резонансной частоте. Результаты лазерной виброметрии приведены на рисунке 6.

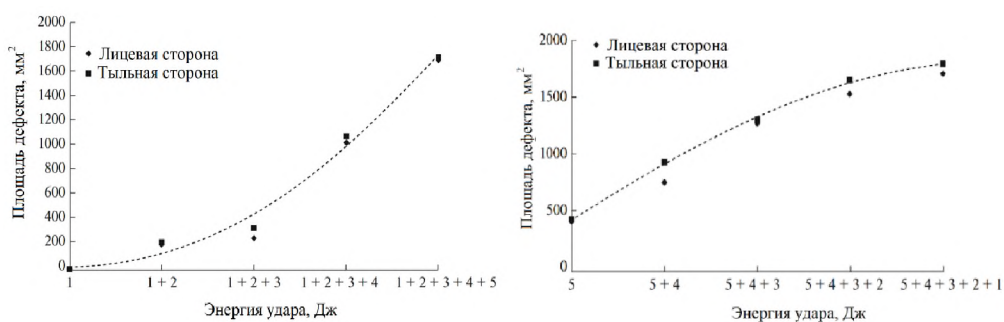


Рисунок 6 – Изменение оценки площади дефектов при повышении (а) и понижении (б) энергии ударного повреждения в образце из ПКМ толщиной 1 мм.

Как и ожидалось, расширение границ дефекта происходит быстрее при понижении энергии ударных повреждений, что определяет логарифмический вид графика изменения площади дефектов при повышении/понижении энергии ударного повреждения. Важно отметить, что площадь дефектов, измеренная по результатам нанесения последовательных ударов с повышением энергии, составила $\sim 1700 \text{ мм}^2$ и имеет расхождение не более 6% от измеренной площади дефектов, образованных при нанесении циклов ударов с понижением энергии ($\sim 1800 \text{ мм}^2$) эквивалентной величины. Из-за малой толщины (от 1 мм) ПКМ получают повреждения вплоть до 450 мм^2 даже при малой энергии удара (5 Дж). Из этого следует необходимость исследования повреждаемости тонких пластин ПКМ при ударах с энергией до 5 Дж. Определение характеристик дефектов по результатам ЛВ, а также комбинирование полученных данных с фотографиями тестовых образцов, осуществляли в программе DeFinder (рисунок 7).

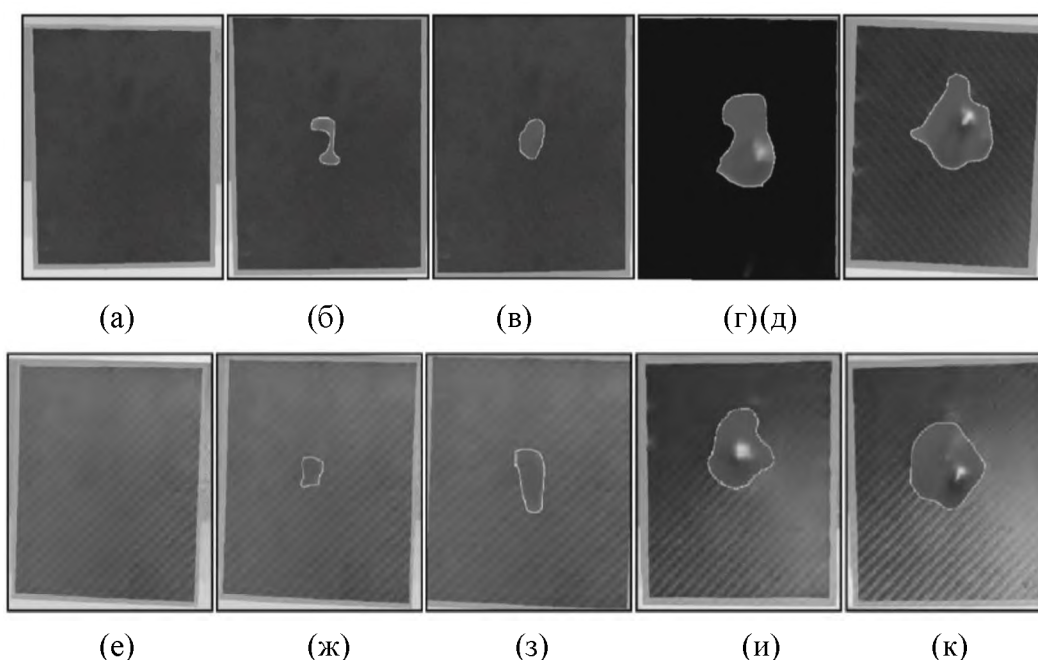


Рисунок 7 – Комбинирование результатов ЛВ и фотографии лицевой (а-д) и оборотной (е-к) сторон ПКМ при нанесении ударов с понижением энергии: (а, е) 5 Дж; (б, ж) 5 + 4 Дж; (в, з) 5 + 4 + 3 Дж; (г, и) 5 + 4 + 3 + 2 Дж; (д, к) 5 + 4 + 3 + 2 + 1 Дж.

В результате сравнения дефектов в тонких пластинах ПКМ, возникающих в результате нанесения последовательных ударов с понижением/повышением энергии, и единичных ударов фиксированной энергии, установлено, что в некоторых случаях площадь повреждения при нанесении одиночных ударов была сопоставима по размеру с ударными повреждениями при повышении/понижении энергии, имеющими бóльшую общую энергию удара; в остальных случаях различия площадей несущественны.

Основные научные результаты и выводы

- Разработан алгоритм автоматического распознавания дефектов и определения их характеристик по результатам 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 лазерной виброметрии 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 теплового контроля и лазерной виброметрии, позволяет расширить номенклатуру выявляемых дефектов, а также путем проведения синтеза данных, скомпенсировать ряд ограничений

вышеуказанных методов НК. Эти ограничения связаны с определением глубины залегания дефектов, повышением эффективности геометрических оценок, 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 копером показало нелинейное увеличение площади дефектов. Площадь дефектов, определенная по результатам нанесения последовательных ударов с повышением энергии, имеет расхождение не более 6% от измеренной 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 обеспечения лучших демпфирующих характеристик материалов и их устойчивости к ударным повреждениям.

Основные результаты диссертации изложены в публикациях:

1. **Shpil'noi, V. Yu.** Nondestructive testing of composite T-Joints by TNDT and other methods / Vavilov V., Chulkov A., Dubinskii S., Burleigh D., Shpilnoi V., Derusova D., Zhvyrbliia V. // Polymer Testing. – 2021. – Volume 94. – article number 107012 (в печати).

2. **Shpil'noi, V. Yu.** Changes in dynamic characteristics of composites caused by the damage with fixed impact energy / Krasnoveikin V.A., Druzhinin N.V.a, Shpil'Noi V.Yu. // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Volume. – article number 020165.

3. **Shpil'noi, V. Yu.** Studying Stability of CFRP Composites to Low-Energy Impact Damage by Laser Vibrometry / Shpil'noi, V.Y., Vavilov, V.P., Derusova, D.A., Krasnoveikin, V.A. // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2019. – Volume 55(9). – Pp. 639-647.

Русскоязычная версия статьи: **Шпильной, В.Ю.** Исследование устойчивости углепластиковых композитов к низкоэнергетическим ударным повреждениям методом лазерной виброметрии / В.Ю. Шпильной, В.П. Вавилов, Д.А. Дерусова, В.А. Красновейкин // Дефектоскопия. – 2019. – № 9 - С. 11-19.

4. **Shpil'noi, V. Yu.** Complex experimental approach to carbon-carbon composite defect detection by laser vibrometry and optical thermography / Krasnoveikin, V.A., Druzhinin, N.V., Shpil'Noi, V.Yu., Derusova, D.A. // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Volume 2167. – article number 020179.

5. **Shpil'noi, V. Yu.** Nondestructive Testing of CubSat Satellite Body Using Laser Vibrometry / D. A. Derusova, V. P. Vavilov, N. V. Druzhinin, O. I. Kazakova, V. O. Nekhoroshev, V. V. Fedorov, S. Yu. Tarasov, V. Yu. Shpil'noi, and E. A. Kolubaev// Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2019. – Volume 55(5). – Pp.418-425.

Русскоязычная версия статьи: **Шпильной, В.Ю.** Неразрушающий контроль корпуса subsat спутника с использованием лазерной виброметрии / Д.А. Дерусова, В.П.

Вавилов, Н.В. Дружинин, О.И. Казакова, В.О. Нехорошев, В.В. Федоров, С.Ю. Тарасов, В.Ю. Шпильной, Е.А. Колубаев // Дефектоскопия. – 2019. – № 5 - С. 57-64.

6. **Shpil'noi, V. Yu.** Infrared Thermographic Testing of Hybrid Materials Using High-Power Ultrasonic Stimulation / D. A. Derusova, V. P. Vavilov, Guo Xingwang, V. Yu. Shpil'noi and N. S. Danilin // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – Volume 54 (10). – Pp.733-739.

Русскоязычная версия статьи: **Шпильной, В.Ю.** Инфракрасный термографический контроль гибридных материалов с использованием мощной ультразвуковой стимуляции / Д.А. Дерусова, В.П. Вавилов, Guo Xingwang, В.Ю. Шпильной, Н.С. Данилин // Дефектоскопия. – 2018. – № 10 - С. 64-70.

7. **Шпильной, В.Ю.** Комплексный экспериментальный подход обнаружения дефектов в углерод-углеродном композите методами лазерной виброметрии и оптической термографии / Красновейкин В.А., Дружинин Н.В., Дерусова Д.А., Шпильной В.Ю. // Тезисы докладов Международного междисциплинарного симпозиума "Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций". – 2019. – с. 485.

8. **Шпильной, В.Ю.** Особенности изменения динамических характеристик композитов при нанесении ударных повреждений фиксированной энергии / Красновейкин В.А., Дружинин Н.В., Дерусова Д.А., Шпильной В.Ю. // Тезисы докладов Международного междисциплинарного симпозиума "Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций". – 2020. – с. 300.