

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Д. Дерусова

Дерусова Дарья Александровна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-
ВИБРОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО
КОНТРОЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНТАКТНЫХ И ВОЗДУШНО-СВЯЗАННЫХ
ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов,
изделий, веществ и природной среды

Томск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Научный консультант:

Вавилов Владимир Платонович

Доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», заведующий лаборатории НПЛ ТК

Официальные оппоненты:

Плехов Олег Анатольевич

Доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, ФГБУН Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, директор

Скрипняк Владимир Альбертович

Доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», заведующий кафедры механики деформируемого твердого тела Физико-технического факультета

Клопотов Анатолий Анатольевич

Доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», профессор кафедры прикладной механики и материаловедения

Защита состоится «26» декабря 2023 г., в 15.00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 на базе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.13
кандидат технических наук, доцент



Е.А. Шевелева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Развитие технологий производства современных конструкционных материалов, таких как полимерные композиты, приводит к расширению сферы их применения. Такие материалы активно используют в транспортной промышленности, авиации и ракетно-космической технике. Многие практические применения указанных материалов, например, высокоскоростные поезда, автомобили, космические аппараты, предъявляют высокие требования к качеству изготовления плоских и изогнутых панелей, а также обеспечению их безопасной эксплуатации. Однако ввиду особенностей структуры, слоистые материалы являются сложными объектами неразрушающего контроля (НК) и требуют создания проблемно-ориентированных методов испытаний, что определяет актуальность проведения научных исследований в указанной области.

Сканирующая лазерная доплеровская виброметрия (СЛДВ) сравнительно недавно нашла свое применение в различных акустических приложениях НК и активно развивается в последнее десятилетие. Метод лазерной виброметрии заключается в бесконтактном измерении скорости колебаний на поверхности материалов и конструкций. Его главными достоинствами являются нечувствительность к температуре и другим внешним факторам, отсутствие влияния присоединенной массы, возможность проведения измерений в вакууме, воде, через стекло и на объектах под высоким электрическим потенциалом. В связи с этим лазерно-виброметрический метод находит все большее применение в современных диагностических системах НК, позволяя измерять вибрации на поверхности контролируемых изделий в широком диапазоне частот, визуализировать процессы распространения поверхностных волн, регистрировать изменения температурного отклика на поверхности контролируемых изделий при параллельном использовании инфракрасной (ИК) термографии.

Степень разработанности темы исследования.

Акустические методы НК традиционно считаются одними из наиболее надежных и широко применяемых для диагностики качества полимерных композиционных материалов, используемых в авиационной и ракетно-космической технике [1-3]. СЛДВ в свою очередь сравнительно недавно нашла своё применение в различных акустических приложениях НК и активно развивается в последнее десятилетие.

Отечественные научные достижения в области акустики, полученные с использованием оборудования лазерной виброметрии, изложены в диссертационных

работах [4-6], начиная с 2006 года. Так, в работе [4] изучены физические механизмы структурной нелинейности твёрдых тел, оценено влияние внутренней структуры материалов с дефектами на их линейные и нелинейные свойства в задачах НК. Применение лазерной виброметрии позволило исследователям контролировать поверхностные слои материалов с использованием волн Рэля и Лэмба: определять наличие дефектов в материалах путем оценки нелинейных свойств распространяющихся акустических волн. Значительный объем исследований в смежных областях, включая термомеханические эффекты, ультразвуковой контроль и инфракрасную термографию, были выполнены в России Смотровой С.А. и Смотровым А.В. (ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского), Будадиным О.Н. (ЦНИИСМ), Наймарком О.Б. и Плеховым О.А. (ИМСС УрО РАН), Е.А. Мойсейчиком (БГТУ, Белоруссия), Шаркеевым Ю.П. (ИФПМ СО РАН) и др.

За рубежом работы по использованию лазерной виброметрии в НК материалов проводятся с 90-х годов прошлого века [7], и в последние годы результаты этих исследований находят практическое применение. В частности, исследование контактно-акустических нелинейностей, возникающих при резонансной стимуляции дефектов в материалах, проводятся под руководством профессора Солодова И. Ю. и профессора Busse G. в Штутгартском университете (Германия) [8, 9]. Исследователи идентифицируют возникающие акустические нелинейности с использованием СЛДВ и применяют их в качестве индикатора дефектов в НК. В последнее десятилетие к исследованиям резонансных явлений в материалах присоединилась научная группа из Католического университета Левена (г. Гент, Бельгия), которая опубликовала ряд работ, подтверждающих результаты других исследователей по обнаружению дефектов в композитах [10, 11] с использованием СЛДВ, оснащенных ИК-детекторами для повышения точности сканирования твердых тел, отличающихся низкой отражающей способностью.

Следует отметить, что наличие локальных дефектов в материалах приводит к возникновению аномальных нелинейностей измеренных акустических параметров [4], а в некоторых случаях также сопровождается генерацией тепла при резонансной стимуляции [12]. Однако природа термоакустических эффектов, возникающих в дефектах, до сих пор составляет предмет дискуссии. Считается, что тепловая энергия генерируется в зонах неоднородностей благодаря ряду феноменов, а именно: внутреннему трению, пластической деформации, механическому гистерезису и

термоупругости [13, 14]. В связи с этим исследование принципов резонансной акустической стимуляции дефектов и физических явлений, лежащих в их основе, является **актуальным** и имеет научную значимость, что подтверждается публикацией научных статей по указанной тематике в высокорейтинговых международных изданиях, в том числе [7, 8, 10].

Помимо нелинейной акустики, перспективной тенденцией исследований является применение бесконтактных излучателей для НК тонких и хрупких композитов. Несмотря на значительный интерес научного сообщества, вопрос создания универсальных воздушно-связанных акустических преобразователей, отличающихся широким диапазоном рабочих частот, до сих пор не решен. Прежде всего, это объясняется жесткими требованиями к параметрам ультразвукового воздействия, предъявляемыми к источникам возбуждения акустических колебаний в НК [15]. Вышеперечисленные особенности широко распространенных систем возбуждения ультразвуковых колебаний усложняют анализ дефектов на практике. В тоже время, есть предпосылки, указывающие на возможность использования импульсного электрического разряда для генерации акустических колебаний звукового и ультразвукового диапазона. В частности, известны особенности протекания импульсного электрического разряда в газе, изложенные в ряде авторских свидетельств и патенте на газоразрядные устройства для возбуждения упругих колебаний [16-18], которые позволяют обосновать возможность решения задачи широкополосной генерации акустических волн в воздушной среде с использованием мощного импульсного электрического разряда и служат основой для дальнейшего проведения научных исследований. Настоящее диссертационное исследование рассматривает использование импульсного электрического разряда для генерации акустических волн в воздушной среде в широком диапазоне частот. На основе проведенных исследований разработан новый тип бесконтактного газоразрядного излучателя.

Целью настоящей работы является разработка метода лазерно-виброметрического неразрушающего контроля полимерных и композиционных материалов, учитывающего их физические свойства и резонансные характеристики дефектов, включая разработку воздушно-связанного режима передачи ультразвука в контролируемые изделия путем создания и исследования бесконтактных акустических излучателей магнитострикционного и газоразрядного типа.

Для достижения вышеуказанной цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Провести теоретический расчет, численное моделирование и экспериментальные исследования резонансных явлений, возникающих в дефектах однородных полимерных и слоистых композиционных материалов.

2. Экспериментально исследовать термо- и виброакустические эффекты, возникающие при стимуляции материалов на частоте основного резонанса дефектов, ее высших гармониках и в широком диапазоне частот, с использованием трехкомпонентной сканирующей лазерной доплеровской виброметрии и инфракрасной термографии.

3. Разработать методики применения метода лазерно-виброметрического неразрушающего контроля для оптимизации физических свойств композиционных и полимерных материалов в процессе их производства, определения динамических характеристик объектов космического назначения.

4. Разработать способ бесконтактной ультразвуковой стимуляции композиционных материалов с использованием воздушно-связанного магнитострикционного преобразователя в сборке с волноводами оптимальной конфигурации, с учетом интерференционных явлений, возникающих при распространении ультразвуковых волн через воздушную среду в твердые тела.

5. Разработать методику и оборудование для генерации акустических волн в воздушной среде на основе газового разряда при проведении лазерно-виброметрического неразрушающего контроля, исследовать электроакустические эффекты, возникающие при протекании тока в газоразрядном излучателе.

6. Исследовать эффективность использования традиционных и разработанных воздушно-связанных излучателей для неразрушающих испытаний полимерных композиционных материалов, определить границы их применимости и оценить достоверность получаемых данных по сравнению с результатами классических методов НК.

Объекты исследования: композиционные и полимерные материалы с дефектами различного происхождения.

Предмет исследования: процессы взаимодействия акустических волн с дефектами различного происхождения в полимерных и композиционных материалах.

Методология и методы диссертационного исследования. Изучение явления локального резонанса дефекта в настоящей диссертационной работе проводилось с

использованием взаимодополняющих теоретических расчетов, экспериментальных исследований и компьютерного моделирования. В частности, теоретический расчет резонансных частот дефектов различной геометрической формы и термомеханических эффектов, сопутствующих резонансной стимуляции, проводили с использованием теории упругости Тимошенко С. П., известных выражений термодинамики и акустики. Результаты теоретических расчетов были сопоставлены с экспериментальными данными СЛДВ и ИК термографии, отличающихся высокой точностью и информативностью результатов измерений. Для определения вклада трех составляющих компонент вибрации дефекта при его резонансной стимуляции было проведено конечно-элементное моделирование, основанное на анализе собственных частот несквозных отверстий простой геометрической формы. Указанный подход позволил определить резонансные частоты дефектов и оценить распределение механических колебаний пластины в трех взаимно перпендикулярных плоскостях декартовой системы координат. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными, полученными при проведении трехмерного сканирования с использованием трехкомпонентного СЛДВ. Экспериментальные результаты были использованы для верификации разработанной математической модели и позволили с удовлетворительной точностью рассчитать вклад каждой из трех компонент колебаний в результирующую виброграмму и результаты НК в целом.

Положения, выносимые на защиту:

1. Акустическая резонансная стимуляция структурных неоднородностей материалов за счёт активации интенсивных вибраций приводит к локальному тепловыделению в зоне дефектов, причём при резонансных колебаниях открытых дефектов основной вклад вносят деформации изгиба, в то время как резонансные колебания скрытых дефектов сопровождаются деформациями растяжения-сжатия.

2. Термомеханические явления, возникающие в дефектах при резонансной акустической стимуляции, обусловлены физическими свойствами материалов и вкладом резонансных гармоник высшего порядка, отвечающих за распределение резонансных узловых линий и колец по всей площади и на границах дефектов.

3. Предложенный воздушно-связанный магнитострикционный преобразователь оптимальной конфигурации позволяет проводить неразрушающий контроль полимерных композитов на расстояниях до 80 мм от контролируемого изделия при соблюдении условия фазового согласования падающей и отраженной

ультразвуковых волн, при обеспечении резонансного угла ввода ультразвука через воздух в твёрдое тело, в то время как наличие высших гармоник в спектре излучения магнитострикционного преобразователя приводит к расширению спектрального состава сигнала возбуждения.

4. Амплитуда виброперемещения на мембране газоразрядного излучателя обусловлена напряжением источника заряда и при пробойном напряжении (10-12) кВ в среднем составляет около 30 мкм в воздухе при нормальных условиях, что сопоставимо с показателями источников возбуждения на основе преобразователей пьезоэлектрического и магнитострикционного типа. Конфигурация мембраны газоразрядного излучателя оказывает существенное влияние на амплитудно-частотный спектр излучателя, а использование мембраны открытого типа позволяет расширить спектральный состав сигнала возбуждения до 4 МГц.

5. Проведение неразрушающих испытаний композиционных материалов возможно с применением воздушно-связанного акустического излучателя газоразрядного типа, для которого установлены необходимые параметры источника заряда, геометрии электродной системы и конфигурации излучателя, позволяющие регулировать мощность акустического излучения, достаточную для обнаружения дефектов в композитах, в частности, ударных повреждений энергией более 15 Дж в углепластике.

Научная новизна работы. По результатам диссертационного исследования разработана проблемно-ориентированная методика неразрушающих испытаний композитов с использованием трехкомпонентной СЛДВ при резонансной стимуляции дефектов, осуществлен переход к бесконтактной стимуляции материалов с использованием воздушно-связанных систем магнитострикционного и газоразрядного типа.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Впервые исследованы физические феномены, лежащие в основе явления локального резонанса, по трем компонентам колебаний дефектов в гомогенных полимерных и слоистых композиционных материалах: теоретически с использованием теории упругости Тимошенко С. П., экспериментально с применением метода сканирующей лазерной доплеровской виброметрии и с использованием конечно-элементного моделирования.

2. С целью повышения достоверности дефектометрии установлены зависимости термо- и виброакустических откликов в дефектах полимерных и композиционных материалов от спектрального состава сигнала возбуждения, используемого для их резонансной стимуляции.

3. Определена оптимальная конфигурация титановых волноводов, позволяющая повысить эффективность электромеханического преобразования энергии ультразвукового воздушно-связанного магнестрикционного преобразователя (обеспечить виброперемещение на торцевой поверхности волновода не менее 30 мкм при потребляемой электрической мощности 650 Вт); определены условия размещения излучателя по отношению к объекту контроля, что позволило минимизировать искажения регистрируемых виброметрических данных и повысить достоверность результатов лазерно-виброметрического контроля.

4. Исследование электроакустических эффектов, возникающих в разработанном газоразрядном излучателе в ходе его эксплуатации, показало, что амплитуда виброперемещения на мембране излучателя может достигать 60 мкм при межэлектродном зазоре около 12 мм и приблизительно пропорциональна энергии, запасенной в емкостном накопителе на момент пробоя газоразрядного промежутка. Для эффективной передачи энергии из области плазмы разряда необходимо регулировать межэлектродный зазор, а электродная система должна иметь объем, меньший объема канала разряда.

5. Предложенный метод электроакустической бесконтактной стимуляции композиционных материалов с использованием разработанного газоразрядного излучателя позволяет осуществить широкополосную акустическую стимуляцию композитов, при которой возникает мультисоставный резонансный отклик исследуемых объектов и их дефектов, а в воздушном пространстве между излучателем и объектом контроля не формируется стоячая волна, в связи с чем не требуется фазовое согласование падающих и отраженных акустических волн.

Полученные результаты использованы для выработки базовых технологических принципов работы устройств и оценки границ их применимости.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в расширении знаний о влиянии как физических свойств материалов, так и геометрии дефектов на их резонансные характеристики, обосновании термомеханических явлений,

возникающих при резонансной стимуляции дефектов. Также в работе оценено влияние порядка резонансных гармоник и компонент колебаний дефекта, расположенных в трех взаимно перпендикулярных плоскостях декартовой системы координат, на формирование результирующего вибрационного и температурного сигналов. В ходе исследования воздушно-связанного магнитострикционного излучателя проведен теоретический анализ влияния конфигурации титановых волноводов на механические и акустические характеристики устройства, оценена эффективность передачи акустической энергии через воздушную среду путем измерения возникающих в ней акустических полей. В рамках исследования газоразрядного излучателя определено влияние конфигурации электродной системы и физических характеристик источника заряда на вибрационные характеристики устройства, диапазон его рабочих частот, спектральный состав сигнала возбуждения, мощность акустического излучения и энергию в импульсе разряда.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в получении следующих результатов:

1. Создан лабораторный стенд комбинированного лазерно-виброметрического и термоакустического (теплового) неразрушающего контроля материалов и изделий с использованием контактных и воздушно-связанных акустических преобразователей пьезоэлектрического, магнитострикционного и газоразрядного типа.

2. Предложено устройство бесконтактной стимуляции для лазерно-виброметрического контроля дефектов в композитах на основе воздушно-связанного магнитострикционного преобразователя с оптимизированным титановым волноводом.

3. Разработано и экспериментально исследовано устройство для генерации акустических волн в воздушной среде на основе протекания электрического разряда в газе для задач неразрушающего контроля полимерных и композиционных материалов.

Способ определения частоты основного резонанса дефектов в композиционных материалах при их ультразвуковой стимуляции с целью интенсификации процесса тепловыделения при проведении вибротермографии внедрены в АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения» (г. Хотьково, Московская обл.) (акт о внедрении представлен в приложении В диссертации).

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением строгих математических методов решения уравнений теории упругости

Тимошенко С. П. для расчета осесимметричных колебаний тонких пластин, их собственных частот и максимальных напряжений, возникающих при воздействии нагрузок; использованием оборудования СЛДВ, отличающегося высокой точностью и информативностью; непротиворечивостью полученных результатов общефизическим представлениям и данным, полученным другими авторами.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы представлены на всероссийских и международных научных конференциях, симпозиумах и конгрессах: VIII Международный конгресс по энергетическим потокам и радиационному воздействию (Томск, Россия, 2022), 4th International Conference on Photonics Research (Олудениз, Турция, 2022); XXXII, XXXIII Уральская конференция с международным участием «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» (Екатеринбург, Россия, 2021, 2022), 3rd Singapore International NDT Conference & Exhibition (Сингапур, 2019), Международный междисциплинарный симпозиум «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций» (Томск, Россия, 2020), международная конференция Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVIII, XXXIX, XL (Балтимор, США, 2016; Аннахайм, США, 2017; Орландо, США, 2018), International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures (Томск, Россия, 2017), 1st QIRT Asia Conference on Quantitative Infrared Thermography (Махабалипурам, Индия, 2015), International Scientific Conference on Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials (Томск, Россия, 2014).

Личный вклад автора. Результаты работ, представленные в диссертации, получены автором лично или при его непосредственном участии. Автором лично сформулированы тема, цель и задачи диссертационной работы, проведены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, обработка и анализ полученных данных, сформулированы выводы и положения, выносимые на защиту, в соавторстве опубликованы результаты теоретических и экспериментальных исследований в ведущих рецензируемых научных изданиях в области физики, оптики, акустики, по тематике неразрушающего контроля, технологии изготовления ультразвуковых излучателей, материаловедения в области композиционных материалов.

Результаты диссертационного исследования были получены в том числе в рамках выполнения под руководством автора следующих проектов:

проект МК-1221.2021.4 «Разработка метода и аппаратуры бесконтактной ультразвуковой стимуляции для проведения контроля качества композиционных и полимерных материалов с использованием лазерной виброметрии» по гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (2021–2022 гг.), при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: проекты № 16-32-00138 «Исследование резонансных термомеханических явлений, возникающих в процессе неразрушающего контроля полимерных материалов с использованием маломощной ультразвуковой термографии» (2016–2018 гг.), № 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, включающего сканирующую лазерную виброметрию и численное моделирование» (2018–2019 гг.), № 19-29-13004 «Теоретическое моделирование и экспериментальные исследования нестационарных трехмерных тепловых полей в анизотропных композиционных материалах, используемых в авиакосмической технике, для дефектоскопии и дефектометрии скрытых дефектов» (2020–2023 гг.); при поддержке Российского научного фонда: проекты № 23-79-10107 «Разработка теоретических основ и экспериментальная реализация лазерно-виброметрического неразрушающего контроля композиционных материалов и пенометаллов при импульсной и непрерывной акустической стимуляции» (2023–2026 гг.), № 18-79-00029 «Разработка методики комплексной диагностики композиционных материалов в процессе резонансной ультразвуковой вибротермографии» (2018–2020 гг.), № 21-79-00169 «Электроимпульсный излучатель акустических колебаний для задач неразрушающего контроля» (2021–2023 гг.), № 22-19-00103 «Разработка методических, программных и аппаратных основ автоматизированного теплового неразрушающего контроля композиционных материалов и изделий авиационной и ракетно-космической техники» (2022–2025 гг.), № 17-19-01047 «Разработка метода и аппаратуры динамической тепловой томографии композиционных материалов» (2017–2020 гг.); при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации: проект № FSWW-2023-0004 по теме: «Разработка научно-технических основ комплексного анализа качества композиционных материалов» (2023 г.); по международному индивидуальному гранту Европейского союза по обмену преподавателями по программе «Erasmus+» для

проведения научных исследований и чтения лекций в Политехническом университете г. Бари (Италия, 2019 г.).

Публикации. По результатам исследования опубликовано 43 научные работы, включая 28 статей в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, в 30 статьях в журналах, рекомендованных ВАК, 38 публикациях в журналах РИНЦ и сборниках трудов конференций, получено 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ. Общий список трудов автора по теме диссертации включает 45 наименований.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 301 странице, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка использованной литературы, трех приложений, содержит 136 рисунков и 15 таблиц. Список использованной литературы включает 256 источников, в том числе 173 на иностранном языке.

Благодарности.

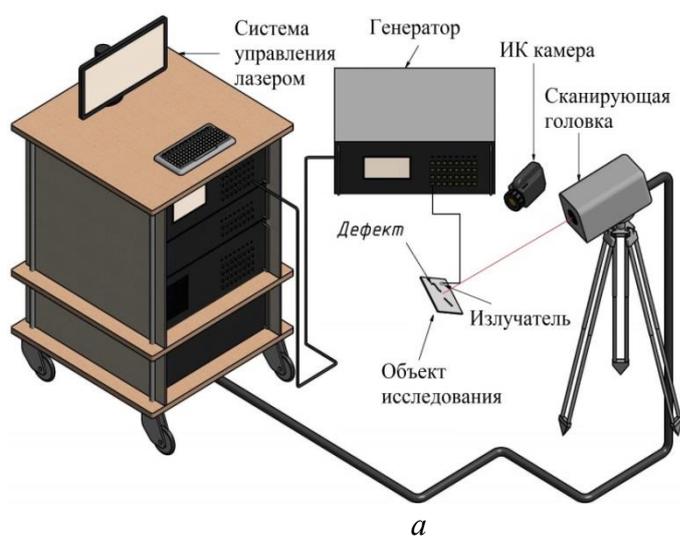
Автор выражает благодарность научному консультанту д.т.н., профессору Вавилову В.П., а также коллективу ЦИТ ИШНКБ ТПУ, Нехорошеву В.О. (ИСЭ СО РАН), Дружинину Н.В. и коллективу ЛККМиК (ИФПМ СО РАН), профессору И.Ю. Солодову (Университет г. Штутгарта, Германия), за оказанную поддержку и помощь, а также предоставленное научно-техническое оборудование.

Содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность, обозначена практическая и теоретическая значимость диссертационных исследований, сформулированы цель и задачи научного исследования, представлены положения, выносимые на защиту, а также научная и практическая значимость работы.

В первой главе выполнен обзор современных методов контроля крупных конструкций из полимерных композитов, а также подробно рассмотрены области применения сканирующей лазерной виброметрии для НК материалов и изделий авиационной, транспортной и ракетно-космической промышленности. Обозначены проблемы НК композитов с использованием контактной и бесконтактной ультразвуковой стимуляции. Описаны перспективные направления развития и современные методы, разрабатываемые ведущими отечественными и зарубежными научными группами в области лазерной виброметрии, включая решение задач в области нелинейной акустики и их практического использования в НК.

Вторая глава содержит базовые принципы классического метода ультразвуковой инфракрасной термографии с использованием мощной стимуляции и обосновывает переход к использованию резонансной стимуляции дефектов как основы проблемно-ориентированной методики испытаний композитов. Ниже приведена лабораторная установка (Рисунок 1) и описаны научные основы лазерно-виброметрического метода НК, базирующегося на определении тепло-, механико-физических свойств композиционных материалов за счет интерпретации данных, полученных в процессе лазерного вибросканирования при резонансной стимуляции дефектов и регистрацией температурных полей методом инфракрасной термографии.

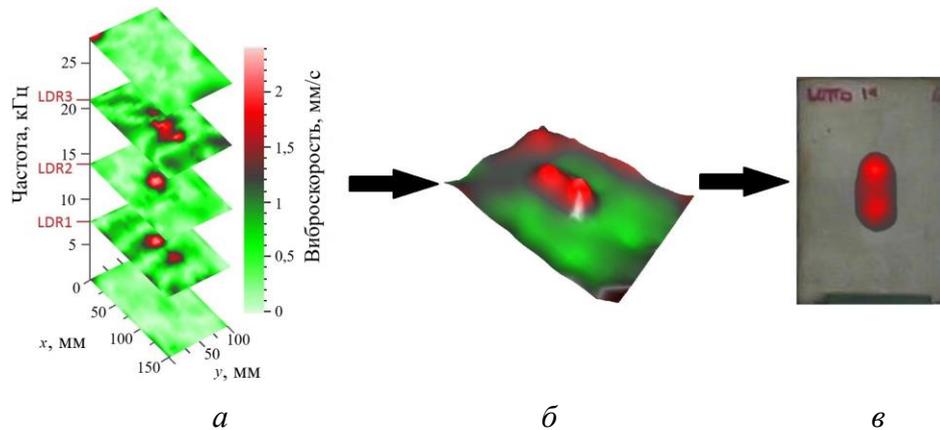


а – структурная схема установки, *б* – изображение установки

Рисунок 1 – Установка трехкомпонентной СЛДВ при резонансной УЗ стимуляции

Лабораторная установка включает в себя сканирующий лазерный доплеровский виброметр PSV-500-3D-NV (Polytec), генератор сигналов специальной формы, набор ультразвуковых излучателей и инфракрасную камеру. Результатами лазерного сканирования являются амплитудно-частотный спектр колебаний каждой исследуемой точки на поверхности контролируемого объекта, виброграммы, отражающие распределение амплитуды виброперемещения или виброскорости на ней, и термограммы, отображающие распределение температурного поля на исследуемой поверхности. Анализ амплитудно-частотного спектра вибраций позволяет обнаруживать структурные неоднородности исследуемых материалов. В частности, наличие дефектных включений приводит к локальному уменьшению жесткости материала, что проявляется в виде резонансного пика на характерной частоте амплитудно-частотного спектра вследствие направленной механической стимуляции дефектной зоны. Это также

сопровождается выделением тепла в зоне дефекта за счет механизмов внутреннего трения, что регистрируется с использованием тепловизионного оборудования. На рисунке 2 обозначены разработанные подходы для определения частоты резонанса дефектов и процедур спектроскопического анализа материалов.



a – анализ амплитудно-частотного спектра колебаний, *б* – анализ виброграмм на резонансных частотах, *в* – дефектометрия

Рисунок 2 – Спектроскопический анализ материалов с использованием СЛДВ

Совместное использование методов акустической стимуляции и лазерного вибросканирования позволяет исследовать и определять все возможные резонансные пики на регистрируемом амплитудно-частотном спектре колебаний. Происхождение каждого максимума на спектре проверяют на наличие резонанса исследуемого образца или дефектов. Однако для получения более точной информации о размерах и положении дефектов следует использовать процедуру усреднения данных, полученных при широкополосной акустической стимуляции композитов. Таким образом, полный цикл спектроскопического анализа включает три этапа анализа данных: 1 – анализ амплитудно-частотного спектра колебаний на наличие резонансных пиков, 2 – анализ виброграмм на резонансных частотах, 3 – дефектометрия, как показано на Рисунке 2.

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

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

В этом случае для вывода выражения K_{eff} и M_{eff} необходимо оценить потенциальную и кинетическую энергии колебаний дефекта. Приведенные ниже результаты расчётов описаны в кандидатской диссертации автора [19].

В случае определения основной частоты резонанса сквозного отверстия круглой формы имеем:

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

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

Подставив (2) в выражение (1), получим выражение для определения линейной частоты резонанса пластины в области круглого отверстия [19]:

$$f_{0 \text{ круг}} = \frac{1,6h}{R^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}, \quad (3)$$

где ρ – плотность материала.

В случае прямоугольного отверстия, выражение для определения основной линейной частоты колебаний пластины в области отверстия, имеет вид [19]:

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

где a, b – длина сторон прямоугольного отверстия.

Представленные подходы являются упрощенными, однако позволяют уточнить физическую природу явления резонанса дефекта. Выражение (4), полученное выше, применимо к оценке основных резонансных частот дефектов, таких как сквозные отверстия простой геометрической формы, а также ламинарные дефекты листового проката металлов и расслоения в композитах [20].

В настоящем диссертационном исследовании теоретически и экспериментально изучены термомеханические явления, возникающие в области дефектов простой геометрической формы в гомогенных материалах, а также резонансные явления в области реальных дефектов в полимерных композитах. На Рисунке 3 приведен амплитудно-частотный спектр колебаний пластины полиметилметакрилата (ПММА) с прямоугольным отверстием ($32,5 \times 31 \times 0,9$ мм³), измеренный с помощью СЛДВ в трех взаимно перпендикулярных направлениях (x, y, z) декартовой системы координат. Анализ спектра проводился с целью определения резонансных частот отверстия, а затем для каждой измеренной резонансной частоты было определено отношение сигнал/шум (SNR) на соответствующей виброграмме [21]:

$$SNR = \frac{|\bar{v}_d - \bar{v}_{nd}|}{\sigma_{nd}}, \quad (5)$$

где v_d и v_{nd} — амплитуда виброскорости в дефектных и бездефектных зонах, σ_{nd} — стандартное отклонение v_{nd} .

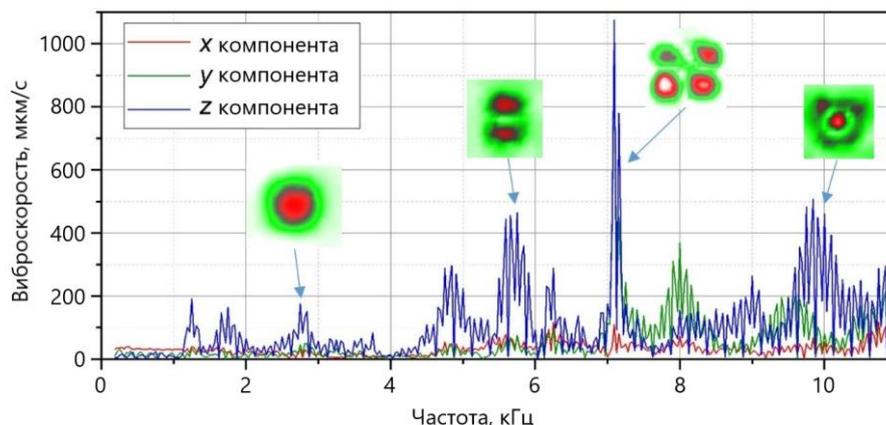
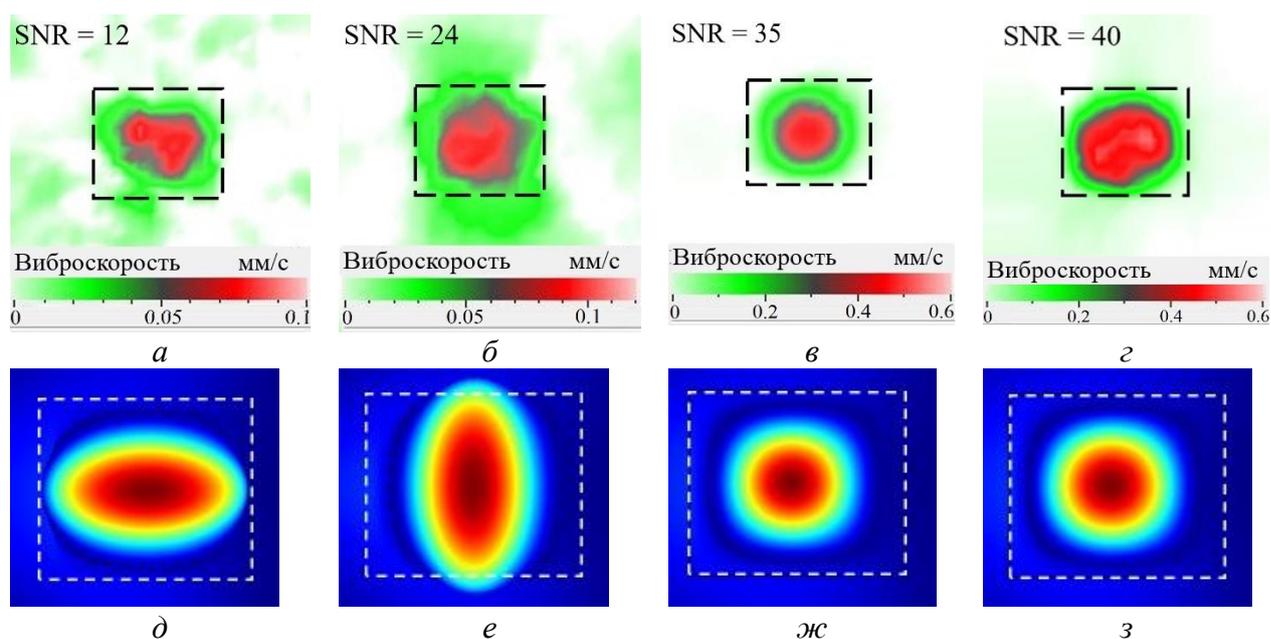


Рисунок 3 – Амплитудно-частотный спектр колебаний пластины ПММА в диапазоне частот от 50 Гц до 10 кГц (а)

Для каждой координаты были рассчитаны средние значения амплитуды колебаний в выбранных частотных диапазонах, а затем проведено их сравнение, чтобы показать вклад компонент колебаний в результирующую виброграмму. Далее проведено сравнение экспериментальных данных с результатами конечно-элементной модели, разработанной в программном обеспечении Comsol Multiphysics с учётом геометрических размеров и физических свойств исследуемой пластины. На Рисунке 4 (а-в) приведен пример виброграмм прямоугольного отверстия, зарегистрированных по каждой из трех компонент колебаний в диапазоне частот от 2334 Гц до 2750 Гц, а также при их усреднении (Рисунок 4 г). Результаты численного моделирования представлены на Рисунке 4 (д-з) и сравнены с экспериментальными данными.



Виброграммы: a – по координате x (2,34 кГц), b – по координате y (2,56 кГц), v – по координате z (2,75 кГц), z – по координатам xuz в диапазоне частот 2,33–2,75 кГц.

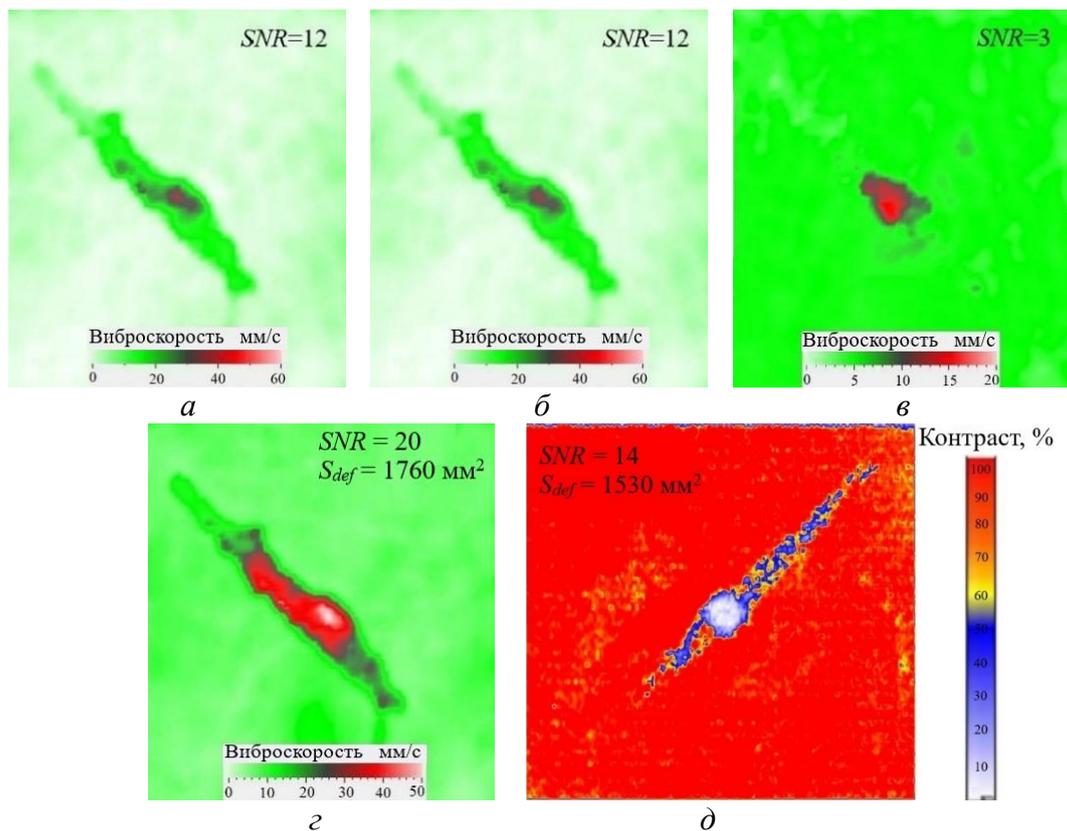
Результаты моделирования на частоте 2,69 кГц по координатам: d - x , e - y , $ж$ - $z, z-xuz$.

Рисунок 4 – Виброграммы несквозного отверстия прямоугольной формы в пластине ПММА на частоте основного резонанса отверстия, измеренные с использованием трехкомпонентной СЛДВ и соответствующие результаты конечно-элементного моделирования, выполненного в программе Comsol Multiphysics

Результаты лазерной виброметрии показали, что максимальное отношение SNR наблюдалось на частоте основного резонанса дефекта (2,75 кГц), определенной по координате z (внеплоскостная компонента), и составило 35, что превосходит соответствующие значения SNR по координатам x и y (в плоскости отверстия) в 2,9 и 1,45 раз соответственно. Установлено, что внеплоскостные компоненты колебаний играют решающую роль в формировании результирующих сигналов открытых дефектов на основных частотах резонанса. Экспериментальные данные также подтверждают результаты численного моделирования. Показано, что расчетные формы колебаний дефекта, усредненные по трем координатам, повторяют формы колебаний по координате z . Это объясняется преобладающим вкладом амплитуд z -компоненты колебаний в результирующее изображение.

Виброграммы дефектов простой геометрической формы, полученные в ходе СЛДВ при резонансной стимуляции, позволяют визуализировать контуры дефектов и, следовательно, применимы для определения их размеров. Однако для полной оценки местоположения и формы дефектов, виброграммы, полученные для различных резонансных частот дефекта, должны быть усреднены по амплитуде измеряемого сигнала. Следуя данной концепции, были проведены исследования композиционных материалов с реальными дефектами на примере пластины углепластикового композита толщиной 1,5 мм с ударным повреждением энергией 16 Дж. Результаты ультразвукового С-сканирования были использованы для оценки достоверности СЛДВ.

Результаты лазерно-виброметрического контроля позволили определить более 20 резонансных частот в диапазоне от 185 Гц до 100 кГц, на которых наблюдались интенсивные колебания в области расслоений. Важно отметить, что в случае рассмотрения многослойного ударного повреждения, колебания дефекта, зарегистрированные в трех взаимно перпендикулярных плоскостях x , y и z , различаются по форме и имеют различные амплитуды колебаний (см. Рисунке 5).



Виброграммы: *a* – по координате *x*, *б* – по координате *y*, *в* – по координате *z*, *г* – по координатам *xuz*,
д – результаты ультразвукового *C*-сканирования

Рисунок 5 – Виброграммы углепластикового композита, измеренные с использованием трехкомпонентной СЛДВ и усредненные в диапазоне частот от 185 Гц до 100 кГц

Из полученных данных видно, что в процессе резонансных колебаний по *xu*-компоненте (в плоскости пластины) задействована большая площадь дефекта по сравнению с зоной дефекта, вовлеченной в процесс колебаний по *z*-компоненте (вне плоскости). Полученные данные показывают, что расслоения в полимерном композите отличаются преимущественным вкладом *xu*-компоненты (деформация растяжения–сжатия) колебаний в результирующую виброграмму дефекта, в то время как упрощенная геометрия дефектов в виде несквозных отверстий характеризуется максимальным вкладом деформации изгиба при резонансной стимуляции.

Площадь дефекта, измеренная в процессе трёхкомпонентной СЛДВ, составила 1760 мм² (Рисунок 5, *г*), что соответствует 85% от результатов УЗ контроля (Рисунок 5, *д*). Модулированный по частоте сигнал вовлекает в процесс колебаний всю зону неоднородности за счет активации вибрации как основной частоты резонанса дефекта, так и ее высших гармониках. Данные результаты подтверждают необходимость

использования широкополосного акустического сигнала для воспроизведения полной формы и размеров дефектов.

Защищаемое положение 1: Акустическая резонансная стимуляция структурных неоднородностей материалов за счёт активации интенсивных вибраций приводит к локальному тепловыделению в зоне дефектов, причём при резонансных колебаниях открытых дефектов основной вклад вносят деформации изгиба, в то время как резонансные колебания скрытых дефектов сопровождаются деформациями растяжения-сжатия.

При УЗ стимуляции в области дефекта происходят изгибные деформации, деформации растяжения-сжатия и трение, что приводит к локальному увеличению амплитуды колебаний и нагреву материала, вызванному диссипацией механической энергии в тепловую. Для описания дополнительных потерь вводят силу трения $f_{тр}$, которая пропорциональна скорости движущейся поверхности. При линейной связи внешних и внутренних сил трения последние выражаются через первую степень скорости перемещений \dot{q} . Мерой перемещения каждой точки тела являются относительные деформации. В связи с этим элементарные силы линейного внутреннего трения пропорциональны скоростям деформаций. Общее выражение для упругопластического (деформированного) напряженного состояния (по закону Гука) имеет вид [22]:

$$\sigma = E(\varepsilon + r_\sigma \dot{\varepsilon}); \quad \tau = G(\gamma + r_\tau \dot{\gamma}), \quad (6)$$

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

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

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t; \quad \sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \varphi). \quad (7)$$

Соотношения (6) графически изображаются петлей гистерезиса, которая ориентирована относительно прямой линии, описывающей закон Гука. Таким образом, силы трения «рассеивают» работу, пропорциональную площади эллипса ($S_{эл}$) [22]:

$$S_{эл} = \pi \varepsilon_0^2 E \eta. \quad (8)$$

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

$$P_{\text{тепл}} = \frac{\Delta W}{\Delta t}, \quad (9)$$

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

Время цикла колебаний определяется: $\Delta t = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$, где f – частота колебаний, ω – угловая частота. Таким образом, мощность, затраченная на образование тепла в единице объема, определяется как:

$$P_{\text{тепл}} = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \Delta W \times f = \frac{\pi \epsilon_0^2 E \eta \omega}{2\pi} = \frac{\epsilon_0^2 E \eta \omega}{2}, \quad (10)$$

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

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

$$P_{\text{тепл}} = \frac{\epsilon_0^2 E \eta \omega}{2} \times V \quad (11)$$

Исходя из выражения (11), генерируемая тепловая мощность пропорциональна частоте (ω) и квадрату амплитуды деформации (ϵ_0) пластины, возникающей в процессе колебаний. Поэтому, использование явления локального резонанса дефекта, который основан на увеличении амплитуды локальных колебаний в области дефектов, способствует повышению эффективности ИК термографии.

Определим температурный отклик материала в области дефекта, возникающий в результате акустической стимуляции материала в течение времени t . Количество теплоты, выделяемое телом при нагреве:

$$Q = c_n m \Delta T, \quad (12)$$

где c_n – теплоемкость материала, m – масса материала.

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

$$P_{\text{тепл}} = \frac{Q}{t} = \frac{c_n \times m \times \Delta T}{t} = \frac{c_n \times \rho \times V \times \Delta T}{t}. \quad (13)$$

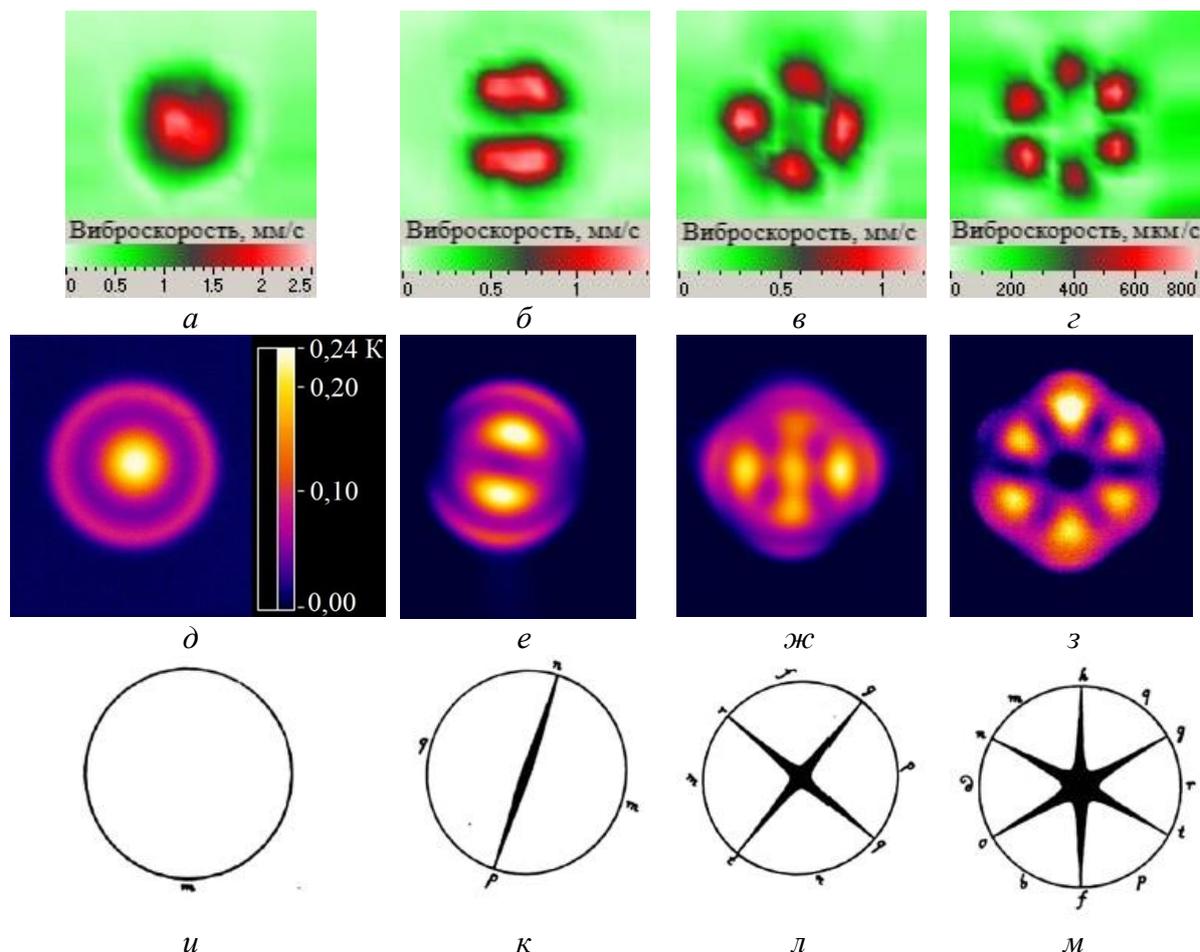
Таким образом, изменение температурного сигнала описывается квадратичной зависимостью от амплитуды деформации:

$$\Delta T = \frac{\epsilon_0^2 \times E \eta \times \omega \times t}{2 c_n \times \rho} \quad (14)$$

Используя полученные выражения, можно определить температурный отклик при известной скорости вибраций дефекта.

Экспериментальные исследования вибраций и температурного отклика, регистрируемых на поверхности пластины ПММА, ослабленной круглым несквозным

отверстием (радиус 10 мм, толщина пластины в области отверстия 1 мм), позволили установить зависимости термо- (Рисунок 6 *д-з*) и виброакустических (Рисунок 6 *а-г*) откликов дефектов от спектрального состава сигнала возбуждения. Полученные данные были сравнены с соответствующими классическими изображениями Хладни Э. Ф. Ф. [23] для круглых пластин (Рисунок 6, *и-м*), отличающимися количеством узловых колец (*m*) и пересекаемых линий (*n*).



а-г – виброграммы, *д* – термограмма, *е-з* – фазовые термографические изображения;
 Частоты резонанса: *а, д* – 5,75 кГц, *б, е* – 12,53 кГц, *в, ж* – 19,19 кГц, *г, з* – 27,88 кГц,
и-м – сравнительные картины вибраций Хладни

Рисунок 6 – Сравнение картин вибраций Хладни с вибрационным откликом, температурным откликом, фазовыми изображениями в области несквозного квадратного отверстия в пластине ПММА, полученными при резонансной стимуляции дефекта

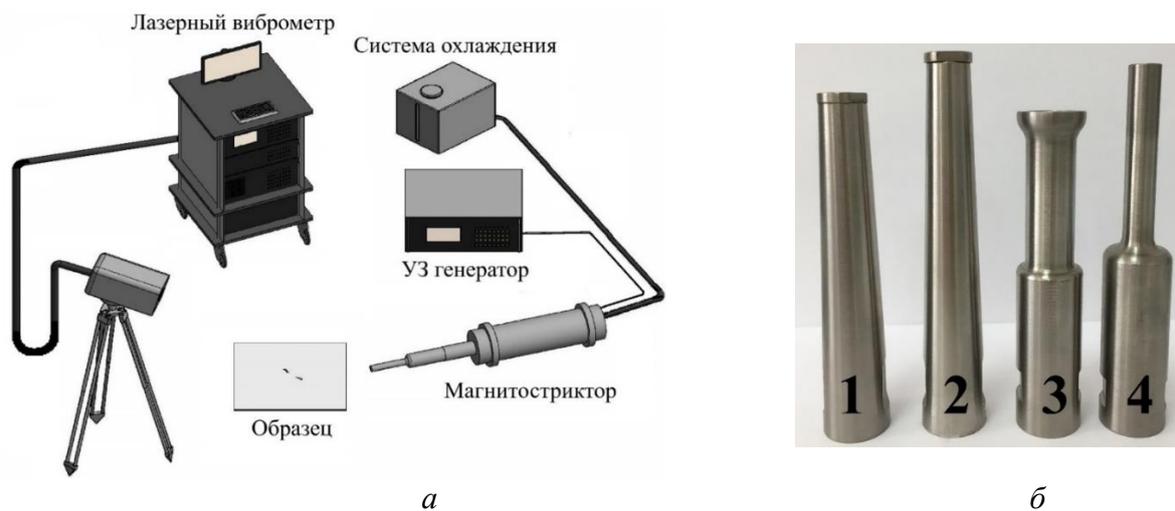
По результатам лазерной виброметрии были определены резонансные частоты несквозного отверстия в пластине ПММА: основная частота резонанса отверстия составила 5,75 кГц, в то время как высшие резонансные гармоники наблюдались на частотах 12,53 кГц (Рисунок 6, *б*); 19,19 кГц (Рисунок 6, *в*) и 27,88 кГц (Рисунок 6, *г*).

Благодаря использованию высокочувствительной ИК камеры IRCAM Equus 327 K (чувствительность 15 мК), и специализированного программного обеспечения для обработки данных, в результате эксперимента были получены фазовые изображения температурных градиентов в области отверстия (см. Рисунок 6, *e-з*).

В ходе исследования установлено, что виброграммы сопоставимы с классическими фигурами Хладни цилиндрических резонаторов. Термограммы имеют некоторые отличия от виброграмм и фигур Хладни, состоящие в увеличении количества узловых колец на единицу ($m+1$) при количестве колец аналогичной частоты резонансной вибрации равном m . При этом количество пересекаемых линий n является одинаковым для виброграмм и термограмм, зарегистрированных при акустической стимуляции дефекта на одной и той же резонансной частоте. Данный факт приводит к образованию дополнительных узловых линий и тепловых колец вблизи границ несквозного отверстия, которые из-за деформации растяжения-сжатия обеспечивают достаточно сильный нагрев и четкое изображение границ дефекта (Рисунок 6, *д-з*), что можно объяснить квадратичной зависимостью регистрируемого температурного сигнала от амплитуды деформации. Так, вибрации на частоте основного резонанса дефекта в течение 10 секунд приводят к увеличению температурного сигнала на 0,24 К (Рисунок 6, *д*) по сравнению с бездефектной зоной, а при увеличении порядка резонансных гармоник изменение сигнала существенно снижается. Дальнейшее измерение тепловыделения в области несквозного отверстия при увеличении порядка резонансных гармоник является нецелесообразным, так как изменение температурного сигнала приближается к уровню шума (температурный сигнал в бездефектной области). Для получения полной информации о расположении и форме дефектов, зарегистрированные ИК термограммы и виброграммы должны быть усреднены во всем диапазоне измеряемых частот.

Защищаемое положение 2: Термомеханические явления, возникающие в дефектах при резонансной акустической стимуляции, обусловлены физическими свойствами материалов и вкладом резонансных гармоник высшего порядка, отвечающих за распределение резонансных узловых линий и колец по всей площади и на границах дефектов.

В третьей главе предложен способ НК композиционных и полимерных материалов на основе взаимодополняющего СЛДВ и бесконтактной ультразвуковой стимуляции с использованием магнитострикционного преобразователя и титановых волноводов различной конфигурации (Рисунок 7).



а – схема экспериментальной установки, *б* – фотография волноводов

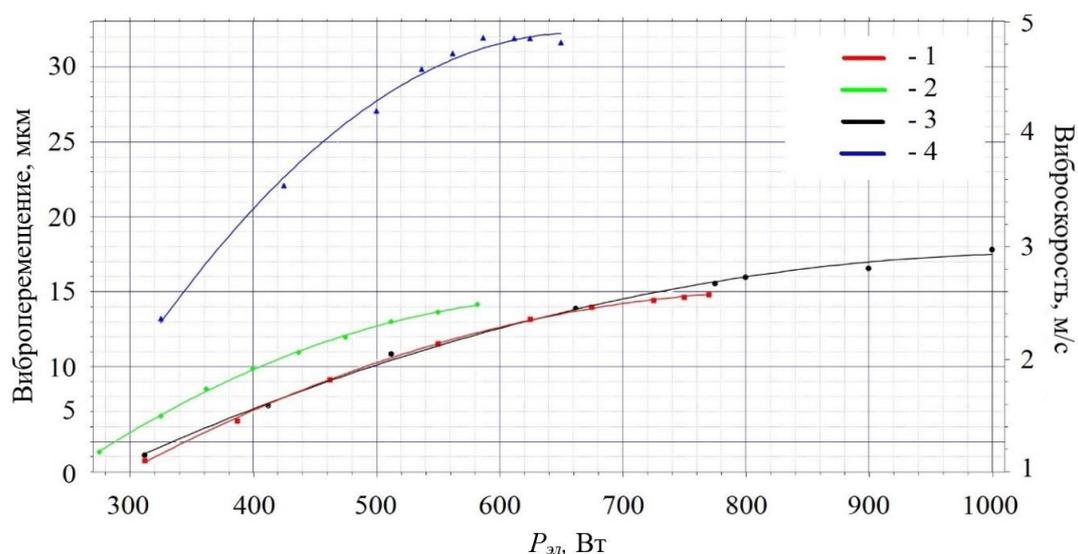
1 – конусовидный с плоским наконечником, 2 – конусовидный со сферическим наконечником, 3 – гиперболический параболоид, 4 – ступенчатый

Рисунок 7 – Схема экспериментальной установки СЛДВ при бесконтактной ультразвуковой стимуляции с использованием магнестрикционного излучателя и фотография титановых волноводов

Разработанная лабораторная установка СЛДВ при бесконтактной ультразвуковой стимуляции включает магнестрикционный преобразователь (резонансная частота $22 \pm 1,65$ кГц, мощность $0,63 \pm 10\%$ кВт), ультразвуковой генератор USG-2-22-MS-1 (диапазон частот 14-48 кГц, мощность $2000 \pm 10\%$ Вт) и сканирующий лазерный доплеровский виброметр PSV-500-3D-HV как показано на рисунке 7, *а*. Система управления генератора обеспечивает автоматический поиск и стабильное поддержание работы устройства на частоте резонанса электромеханической системы установки.

Ключевым моментом исследования является оптимизация работы воздушно-связанного акустического преобразователя с целью обеспечить информативный уровень вибрационного сигнала на поверхности контролируемых изделий, достаточный для обнаружения структурных неоднородностей. Проведены исследования титановых волноводов четырех конфигураций (ступенчатый параболоид, ступенчатый плоский, сферический, конусоидальный), используемых в сочетании с магнестрикционным преобразователем. Общий вид титановых волноводов приведен на рисунке 7, *б*.

В ходе исследования измерен амплитудно-частотный спектр излучателя в сборке с волноводами различной конфигурации, получены зависимости виброперемещения торцевой поверхности излучателя от потребляемой электрической мощности прибора (см. рисунок 8).



1 – конический с плоским наконечником, 2 – конический со сферическим наконечником, 3 – гиперболический параболоид, 4 – ступенчатый

Рисунок 8 – Зависимость виброперемещения и виброскорости на торцевой части волновода от величины потребляемой электрической мощности магнитостриктора

Как видно из полученных данных (рисунок 8), скорость нарастания фронта экспериментальных кривых, отражающих зависимость виброперемещения и виброскорости на торцевой части волновода от потребляемой электрической мощности магнитостриктора, различна в зависимости от типа волноводов. Следовательно, конфигурация волновода существенно влияет на эффективность электромеханического преобразования энергии во всей системе, включая электромеханический преобразователь и волновод. В частности, оптимизация конфигурации акустического волновода позволяет увеличить амплитуду виброперемещения на торце преобразователя до 2,5 раз, что значительно повышает эффективность ультразвуковой стимуляции. Максимальная амплитуда виброперемещения измерена на торце ступенчатого цилиндрического волновода и составляет $\xi_{exp} = 31,9$ мкм. Указанные преимущества определили дальнейшее использование ступенчатого цилиндрического волновода для контроля качества материалов и изделий.

Измерение диаграммы направленности бесконтактного магнитострикционного излучателя, а также рефрактовиброметрия воздушного пространства между излучателем и объектом контроля с использованием СЛДВ позволили определить пространственную направленность излучения и оптимизировать условия проведения НК. На рисунке 9 приведена виброграмма, измеренная в воздушном пространстве между

магнестрикционным излучателем и углепластиковым композитом, которая отражает процесс распространения ультразвуковой волны.

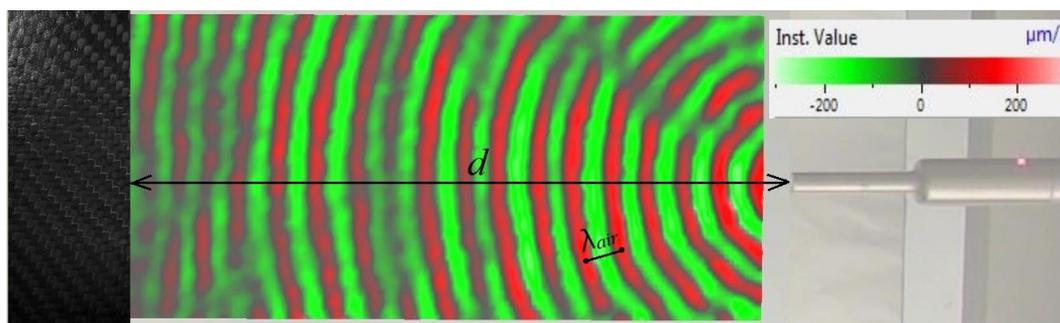


Рисунок 9 – Виброграмма распространения в воздухе ультразвуковой волны, генерируемой магнестрикционным преобразователем

При резонансной ультразвуковой стимуляции в воздушной среде между излучателем и объектом контроля происходит наложение падающей на объект контроля и отраженной от него ультразвуковой волны в соответствии с принципом суперпозиции. Возникающие интерференционные явления могут привести как к увеличению амплитуды колебаний в результирующей волне, так и к её снижению. Регулирование воздушного зазора (d) между излучателем и исследуемым материалом существенно изменяет эффективность передачи ультразвука. Подобные явления в принципе характерны для воздушно-связанных систем возбуждения непрерывного действия. На рисунке 9. приведен график распределения амплитуды вибраций в воздушной среде между магнестрикционным излучателем и композитом.

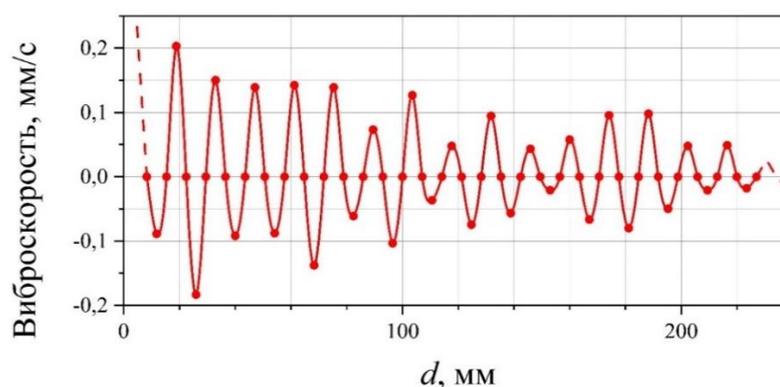
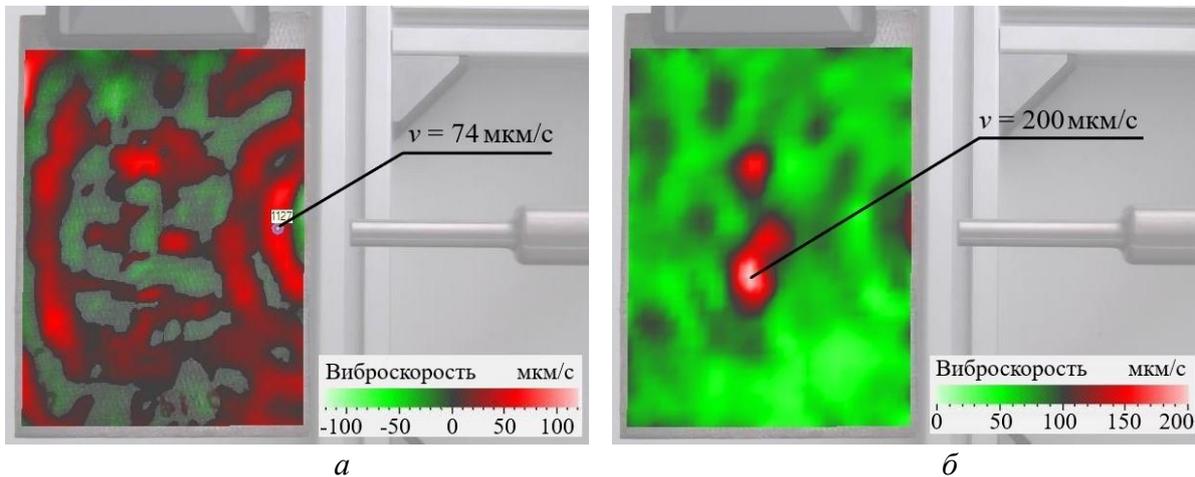


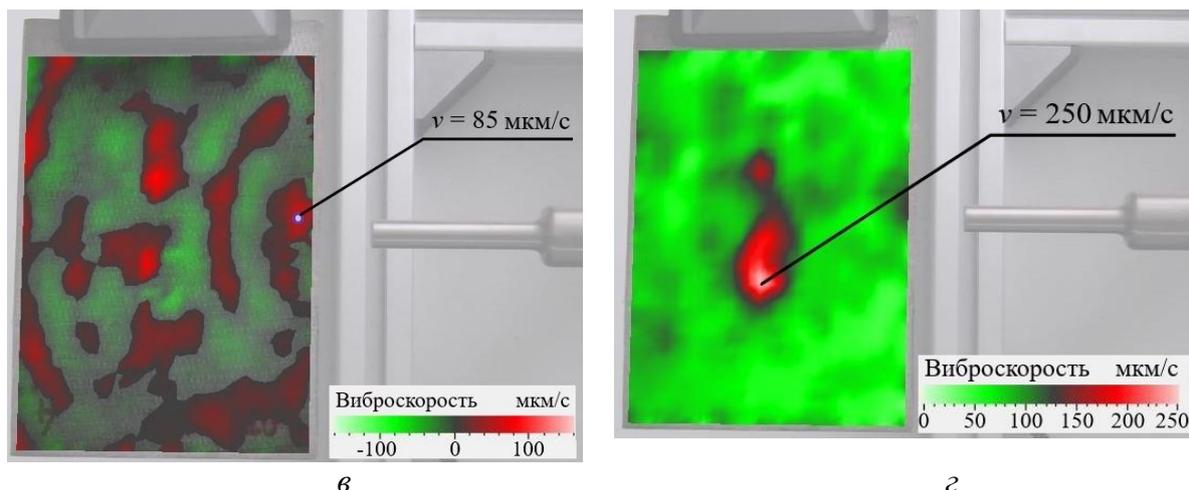
Рисунок 10. Распределение амплитуды виброскорости в воздушной среде на расстоянии d до 340 мм между излучателем и исследуемым объектом на частоте 23 кГц

Из рисунка 10 видно, что амплитуда виброскорости ультразвуковой волны в воздухе спадает неравномерно, поскольку интерференция падающей и отраженной волн определяет амплитуду результирующего сигнала. Наличие высших гармоник излучателя и нелинейных явлений также приводит к расширению спектрального состава сигнала

возбуждения. В связи с этим необходима фазовая синхронизация падающей и отраженной волн для повышения эффективности бесконтактного ввода ультразвука и НК в целом. Исходя из теоретических представлений, для достижения оптимального согласования системы величина воздушного зазора должна быть кратна половине длины акустической волны (λ_{air}), распространяющейся в воздушной среде. Таким образом, условие согласования можно записать в виде $d = n \times \lambda_{air}/2$, где $n \in \mathbb{N}$, что физически означает условие согласования по фазе колебаний в образовавшейся стоячей волне. Это условие подтверждается экспериментально. На рисунке 10 видно, что на частоте 23 кГц длина волны в воздушной среде составляет 14,3 мм, и пучности (локальные максимумы амплитуды виброскорости) располагаются на расстояниях, кратных половине длины волны от торца волновода. Из этого следует, что расстояние между контролируемым объектом и воздушно-связанным преобразователем должно выбираться так, чтобы одновременно обеспечить необходимый уровень амплитуды сигнала возбуждения и фазовую синхронизацию в системе.

Вышеприведенные положения были апробированы на примере исследования распространения упругих волн в гибридном лён-углерод-лён композите. В частности, вибросканирование гибридного композита проводили при размещении воздушно-связанного магнитострикционного излучателя на расстоянии 15 мм (λ_{air}) и 21,5 мм (соответствует $3\lambda_{air}/2$) от торцевой поверхности пластины (см. рисунок 11).





a, в – фазовые изображения вибраций, *б, г* – виброграммы, отображающие усреднение амплитуды виброскорости в измеренном диапазоне частот,

Расстояние между пластиной и торцом излучателя: *a, б* – 15 мм, *в, г* – 21,5 мм

Рисунок 11 – Виброграммы, отражающее фазовое изображение и распределение вибраций на поверхности гибридного лен-углерод-лен композита при бесконтактной ультразвуковой стимуляции на частоте 21 кГц

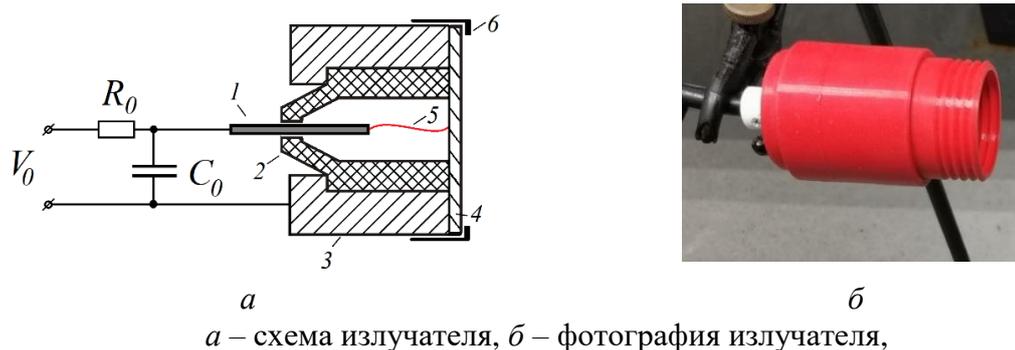
Экспериментально было показано, что использование воздушно-связанного магнитострикционного излучателя для бесконтактной акустической стимуляции позволяет обнаружить дефекты в полимерных композитах даже без предварительного анализа резонансных частот объекта. Однако важно отметить, что для непрерывного возбуждения с помощью воздушно-связанных систем характерны интерференционные явления в пространстве между излучателем и объектом контроля, поэтому необходимо обеспечивать фазовую синхронизацию падающей на объект контроля и отраженной от него акустических волн. В частности, размещение волновода на меньшем расстоянии до контролируемого материала не приводит к увеличению амплитуды вводимого акустического сигнала. В то же время, при обеспечении фазовой синхронизации между волной, падающей на объект контроля, и волной, отраженной от него, наблюдается повышение эффективности бесконтактного ввода ультразвука и проведения НК. Сравнительный анализ результатов лазерной виброметрии при бесконтактной ультразвуковой стимуляции и ультразвукового С-сканирования подтвердил эффективность бесконтактной стимуляции на расстояниях не более 80 мм до исследуемого материала в задачах НК.

Защищаемое положение 3: Предложенный воздушно-связанный магнитострикционный преобразователь оптимальной конфигурации позволяет проводить НК полимерных композитов на расстояниях до 80 мм от контролируемого

изделия при соблюдении условия фазового согласования падающей и отраженной ультразвуковых волн, при обеспечении резонансного угла ввода ультразвука через воздух в твёрдое тело, в то время как наличие высших гармоник в спектре излучения магнитострикционного преобразователя приводит к расширению спектрального состава сигнала возбуждения.

В четвертой главе предложена методика и оборудование для генерации акустических волн в воздушной среде в импульсном режиме на основе газового разряда при проведении лазерно-виброметрического НК, исследованы электроакустические эффекты, возникающие при протекании тока в газоразрядном излучателе.

Разработанный газоразрядный излучатель представляет собой электродную систему, позволяющую осуществлять вывод в окружающую среду акустических колебаний, формирующихся при протекании импульса тока разряда (Рисунок 12). В частности, емкостной накопитель C_0 заряжается через токоограничительный резистор R_0 от источника заряда V_0 ($V_0 < 12$ кВ, $I = 650$ А), что соответствует приблизительно 10 кВт импульсной электрической мощности (пиковое значение). При достижении некоторого порогового напряжения в электродной системе излучателя происходит пробой и емкостной накопитель разряжается через плазму образовавшегося искрового разряда. При этом формируются импульс тока разряда и сопутствующий ему скачок давления в среде, окружающей разрядный канал. Часть энергии механических колебаний диафрагмы излучается в виде акустических волн в окружающую среду. Частота следования импульсов тока разряда составляет от 1 до 4 Гц.



V_0 – напряжение источника заряда емкостного накопителя, R_0 – токоограничивающий резистор, C_0 – емкостной накопитель, 1 – потенциальный электрод, 2 – изолятор, 3 – корпус излучателя (обратный токопровод), 4 – диафрагма, 5 – схематичное положение разрядного канала, б – прижимной фланец

Рисунок 12 – Схематичное изображение конструкции прототипа газоразрядного излучателя и его фотография

Вибрационные характеристики газоразрядного излучателя были исследованы с использованием экспериментальной установки на СЛДВ, функциональная схема которой представлена на рисунке 13.

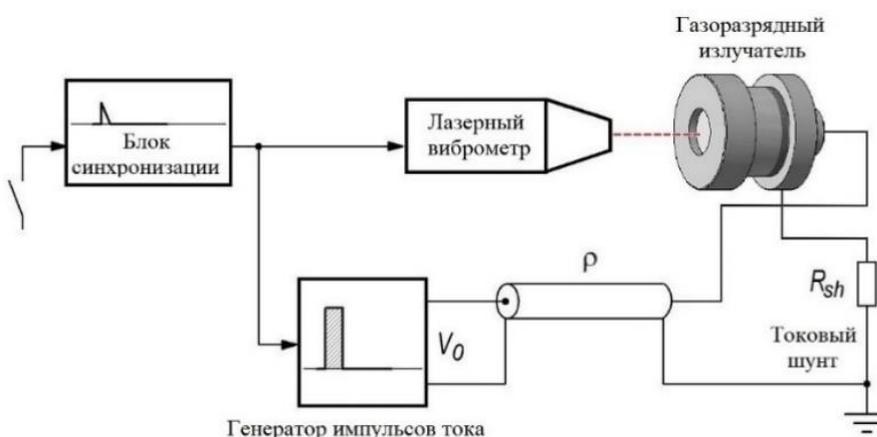


Рисунок 13 – Функциональная схема установки для исследования вибрационных характеристик газоразрядного излучателя

Установка включает генератор импульсов тока, линию связи, газоразрядный излучатель, виброметр PSV-500-3D-HV (Polytec, Германия) и осциллограф OWON DS5032EV. Разряд возбуждали от генератора импульсов тока с частотой следования импульсов 4 Гц. С помощью СЛДВ был зарегистрирован временной ход виброперемещения мембраны при протекании импульса тока разряда (рисунок 14) и затухающие колебания мембраны после прекращения подачи возбуждающего сигнала.

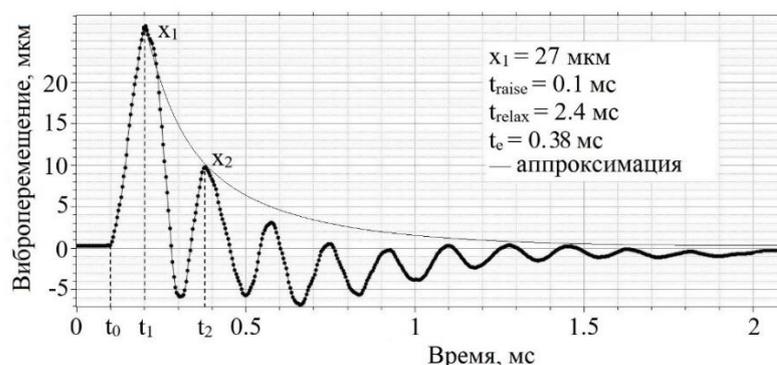


Рисунок 14 – Колебания мембраны газоразрядного излучателя, выведенной из состояния покоя импульсом искрового разряда

Максимальная амплитуда колебаний мембраны (x_1, t_1) определяется напряжением источника заряда и при напряжении 10÷12 кВ и достигает 27 мкм за 0,1 мс ($t_{\text{raise}} = t_1 - t_0$) после начала импульса искрового разряда ($t_0 = 0,1$ мс). Указанное значение является средним, получено при проведении 100 измерений при минимальной величине межэлектродного зазора равной 5 мм, и сопоставимо с источниками возбуждения на

основе преобразователей пьезоэлектрического и магнитострикционного типа. Ресурс газоразрядного излучателя может достигать 1 млн. импульсов при допустимом пределе отклонений по амплитуде импульса на уровне 20%, а при оптимизации конфигурации электродов может быть увеличен до 10 млн. импульсов.

Далее было проведено преобразование вибрационного сигнала из временной области в фазо-частотную и исследованы амплитудно-частотные спектры колебаний мембран различного металлического состава (латунь, титан, алюминий и сталь). Амплитудно-частотный спектр газоразрядного излучателя в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц, измеренный в центре алюминиевой мембраны, приведен на рисунке 15.

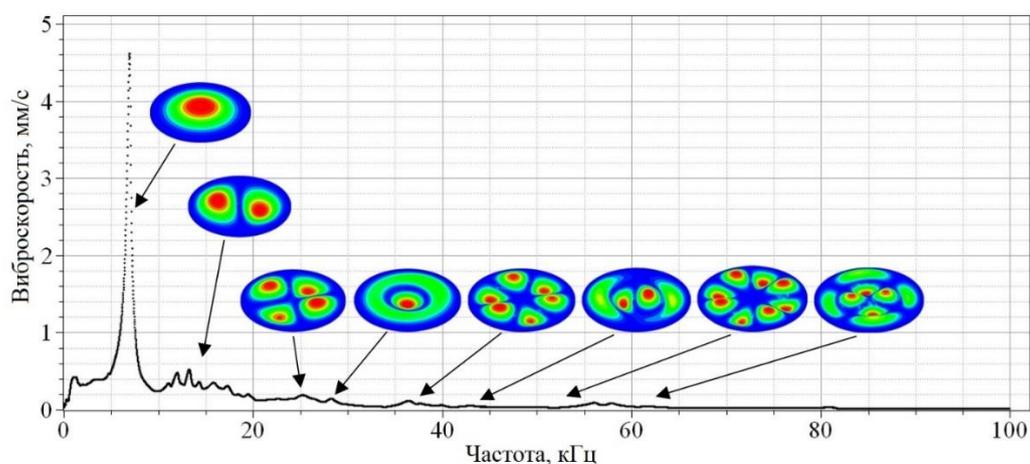


Рисунок 15 – Амплитудно-частотный спектр колебаний мембраны газоразрядного излучателя в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц

Происхождение некоторых резонансов в спектре на рисунке 15 было объяснено экспериментально путем лазерного вибросканирования мембраны, а также в ходе конечно-элементного моделирования модальных характеристик алюминиевой мембраны в программном обеспечении Autodesk Inventor. В процессе моделирования, мембрана была принята зафиксированной по периметру, что соответствует реальной конфигурации устройства (фиксация прижимным фланцем). В результате моделирования было определено 20 резонансных мод мембраны в диапазоне частот от 0 до 100 кГц, восемь из которых приведены на рисунке 15. Из анализа происхождения резонансных пиков в спектре установлено, что частота резонанса элементов электродной системы излучателя существенно влияет на диапазон его рабочих частот.

На рисунке 16 представлен амплитудно-частотный спектр газоразрядного излучателя в диапазоне частот от 50 Гц до 30 кГц, измеренный в центре мембран толщиной 2 мм, изготовленных из алюминия, титана, латуни и стали.

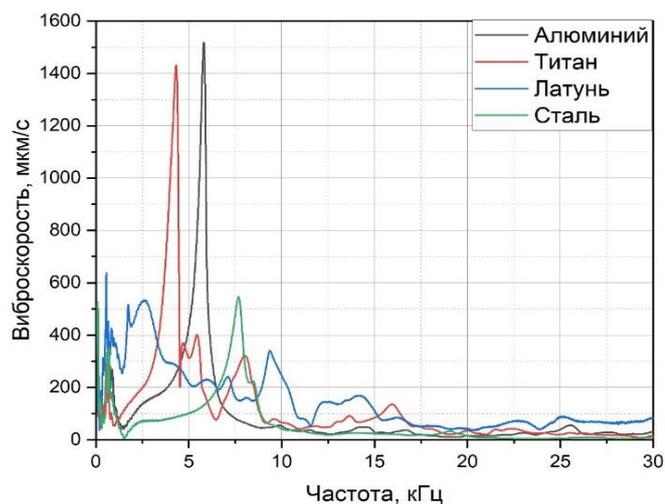
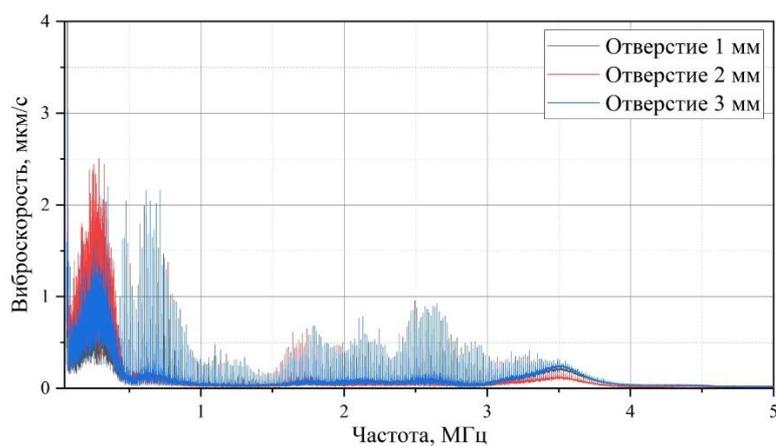


Рисунок 16 – Амплитудно-частотный спектр колебаний в центре мембран толщиной 2 мм, различного металлического состава

Как показано на графике (рисунок 16), амплитудно-частотные спектры колебания мембран одинаковой геометрии, но различного состава, отличаются. В связи с этим, использование электродов различных размеров, конфигурации и металлического состава позволит реализовать требуемую частоту резонансных колебаний электрода, определяя тем самым спектр акустического излучения газоразрядной системы.

С целью расширения спектрального состава сигнала возбуждения излучателя было проведено исследование мембраны открытого типа (отличается от закрытого типа негерметичным исполнением разрядной камеры путем использования сквозного отверстия). Измеренный амплитудно-частотный спектр колебаний мембраны открытого типа с центральными отверстиями диаметра от 1 до 3 мм приведен на рисунке 17.



а

б

а – амплитудно-частотные спектры колебаний излучателя, *б* – фотография мембраны открытого типа с отверстием диаметром 3 мм

Рисунок 17 – Амплитудно-частотные спектры колебаний газоразрядного излучателя при использовании мембран открытого типа

Из приведенных на рисунке 17 (а) амплитудно-частотные спектров видно, что основная энергия выделяется в диапазоне частот от 100 кГц до 500 кГц, но небольшая доля энергии также может быть сосредоточена на гармониках до 4 МГц, что расширяет спектральный состав сигнала возбуждения излучателя. Увеличение диаметра отверстия в центре мембраны приводит к увеличению амплитуды измеренного вибрационного сигнала.

Исследование электродной системы позволило установить зависимость амплитуды виброперемещения поверхности мембраны (алюминий толщиной 1 мм) от межэлектродного зазора излучателя. Результаты приведены на рисунке 18.

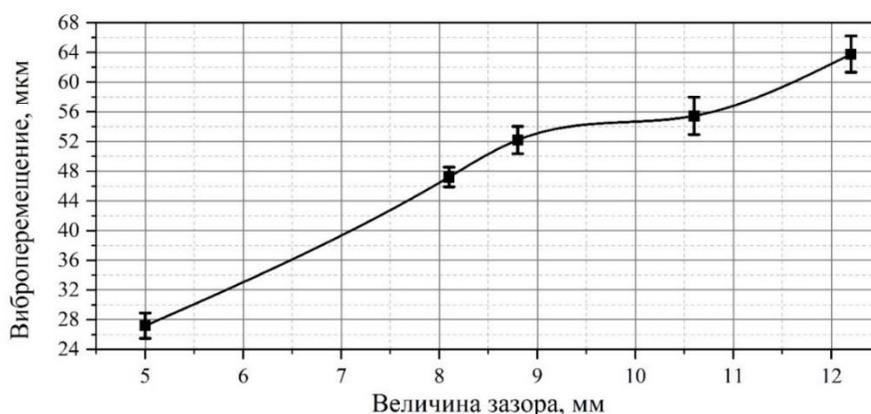


Рисунок 18 – Зависимость амплитуды виброперемещения центра алюминиевой мембраны от величины межэлектродного зазора газоразрядного излучателя.

Как видно из графика на рисунке 18, увеличение межэлектродного зазора газоразрядного излучателя приводит к увеличению амплитуды виброперемещения в центре мембраны закрытого типа. Таким образом, регулируя межэлектродный зазор, можно варьировать амплитуду виброперемещения излучающей поверхности, т. е. регулировать мощность излучения и энергию в импульсе. При межэлектродном зазоре около 12 мм амплитуда виброперемещения в центре мембраны достигает более 60 мкм. Увеличение объема полости под мембраной 2-3 раза приводит к снижению амплитуды виброперемещения в центре мембраны более чем в 10 раз. В связи с этим, для эффективной передачи энергии из области плазмы разряда, электродная система должна иметь небольшой объем в сравнении с объемом канала разряда.

Защищаемое положение 4: Амплитуда виброперемещения на мембране электроимпульсного излучателя обусловлена напряжением источника заряда и при пробойном напряжении (10-12) кВ в среднем составляет около 30 мкм, что сопоставимо с показателями источников возбуждения на основе преобразователей пьезоэлектрического и магнитострикционного типа. Конфигурация мембраны

газоразрядного излучателя оказывает существенное влияние на амплитудно-частотный спектр излучателя, а использование мембраны открытого типа позволяет расширить спектральный состав сигнала возбуждения до 4 МГц.

Далее в четвертой главе диссертационного исследования приведены результаты НК материалов бесконтактным способом с использованием газоразрядного излучателя. Лабораторная установка включает в себя виброметр PSV-500-3D-HV (Polytec), а также систему генерации акустических колебаний, состоящую из генератора импульсов тока, передающей линии и газоразрядного излучателя, как показано на рисунке 19.



Рисунок 19 – Структурная схема лабораторной установки НК материалов методом СЛДВ с использованием газоразрядного излучателя

Выполнен контроль ударного повреждения в углепластиковом композите при изменении расстояния между излучателем и образцом от 10 до 50 мм (см. рисунок 20).

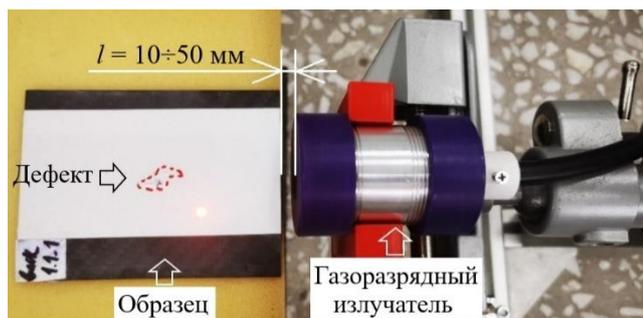
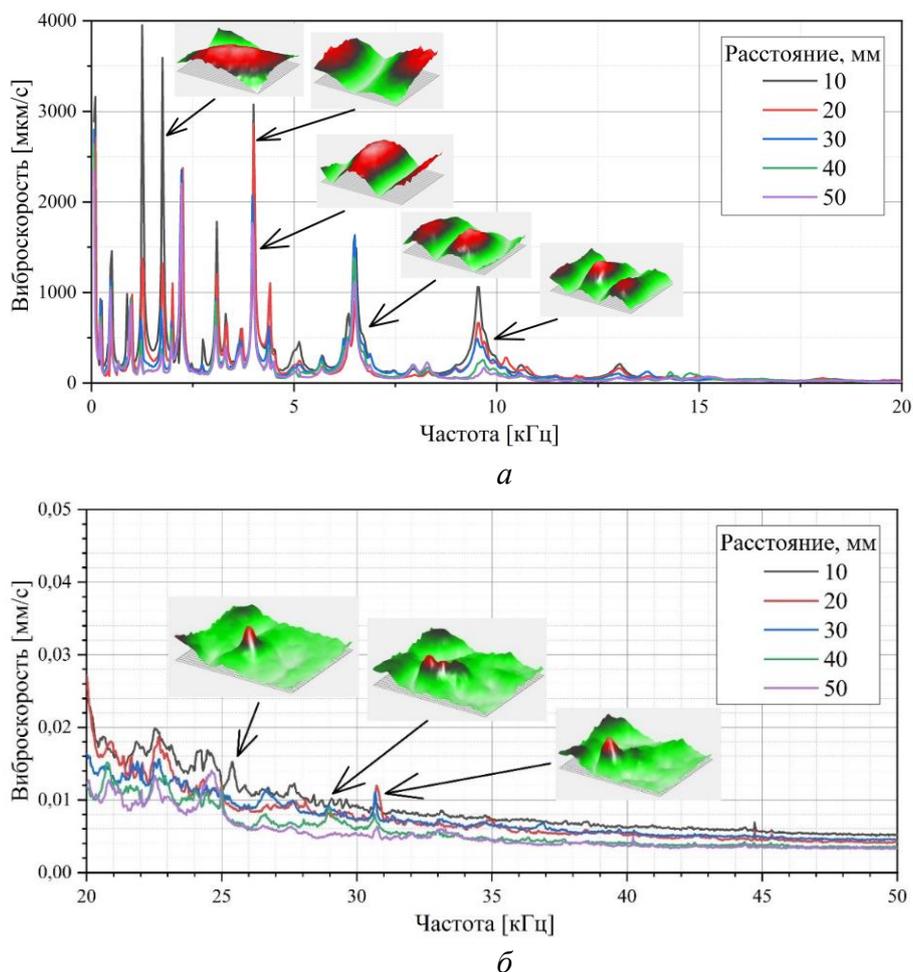


Рисунок 20 – Акустическая стимуляция углепластикового композита с ударным повреждением 15 Дж с использованием газоразрядного излучателя

Установлено, что ввиду короткой длительности импульса разряда спектральный состав генерируемого акустического сигнала содержит набор частот. Соответственно, исследуемая пластина колеблется на всех частотах возбуждающего сигнала, присутствующих в импульсе. Важно отметить, что максимумы амплитуды колебаний на спектре относятся к собственным частотам пластины и к резонансным колебаниям в

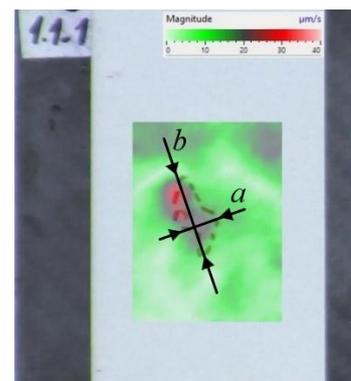
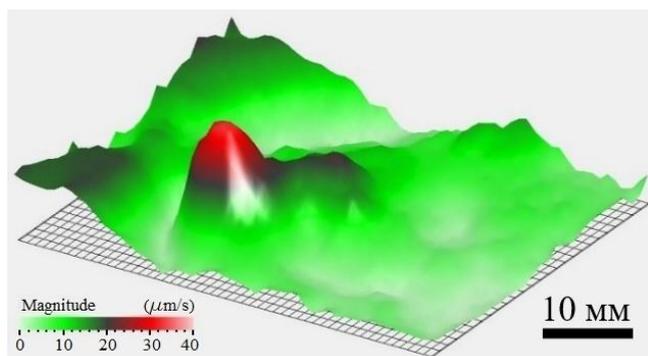
области дефектов, в то время как колебания пластины вне диапазона резонансных частот быстро затухают. На рисунке 21 представлен амплитудно-частотный спектр колебаний композита в диапазоне частот от 50 Гц до 50 кГц (рисунок 21, *a*), а также масштабированный диапазон частот от 50 Гц до 20 кГц (рисунок 21, *б*).



Диапазон частот: *a* – 50Гц÷20кГц, *б* – 20кГц÷50кГц

Рисунок 21 – Амплитудно-частотные спектры колебаний углепластика, расстояние излучатель–образец от 10 до 50 мм

На рисунке 21 видно наличие в спектре характерных резонансных пиков, обусловленных как собственными резонансными частотами композита (рисунок 21, *a*), так и некоторыми локальными резонансами, возникающими в зоне ударного повреждения (рисунок 21, *б*). По результатам усреднения данных, измеренных в диапазоне частот от 50 Гц до 50кГц, получена результирующая виброграмма колебаний композита (рисунок 22, *a*). Латеральные размеры ударного повреждения ($a \times b$) определяли по анализу виброграммы, как показано на рисунке 22, *б*.



a *б*
a – 2D виброграмма, *б* – 3D виброграмма

Рисунок 22 – 2D и 3D виброграммы ударного повреждения в композите, полученные при усреднении амплитуды колебаний в диапазоне частот от 50 Гц до 50 кГц

Зная скорость звука в углепластике ($c = 1133$ м/с), плотность материала ($\rho = 1560$ кг/м²) [20] и используя экспериментально измеренное значение скорости колебания частиц на поверхности пластины в бездефектной области (v_{mean}), определим акустическую мощность (P_{ac}), переносимую упругой волной через поперечную площадку (S), расположенную перпендикулярно направлению распространения волны: $P_{ac} = \rho \times v_{mean} \times c \times S$ [24]. Описанный подход использован для оценки акустической мощности, вводимой в контролируемый композит от газоразрядного излучателя на различном расстоянии до пластины. Полученные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Вибрационные характеристики колебаний композита с ударным повреждением при изменении расстояния от излучателя до пластины

l , мм	v_{min} , мм/с	v_{max} , мм/с	v_{mean} , мм/с	$a \times b$, мм	P_{ac} , мкВт
10	0,005	4,55	0,101	$6,8 \times 17,8$	0,73
20	0,005	3,95	0,09	$5,7 \times 10,4$	0,6
30	0,005	2,44	0,072	$5,7 \times 4,4$	0,4
40	0,004	2,09	0,056	$5,5 \times 9,8$	0,25
50	0,004	1,92	0,051	$2,7 \times 3,1$	0,2

Из полученных данных следует, что на поверхности образца амплитуда колебаний уменьшается в бездефектной зоне с увеличением расстояния между образцом и излучателем, в среднем от 0,1 мм/с до 0,05 мм/с, ввиду затухания акустических волн в воздухе. Однако газоразрядные излучатели могут быть использованы на практике для акустической стимуляции композитов, содержащих дефекты в виде ударных повреждений, в диапазоне частот 0,05–100 кГц, даже при акустической мощности порядка 0,2÷0,75 мкВт. Важно отметить, что широкополосная импульсная стимуляция приводит к возникновению мультичастотного резонансного отклика в области дефектов

в многослойных композитах. При импульсном режиме работы газоразрядного излучателя в воздушном пространстве между излучателем и объектом контроля не формируется стоячая волна, что исключает необходимость обеспечения согласования акустических колебаний по фазе.

Защищаемое положение 5: Проведение неразрушающих испытаний композиционных материалов возможно с применением воздушно-связанного акустического излучателя газоразрядного типа; установлены необходимые параметры источника заряда, геометрии электродной системы и конфигурации излучателя, позволяющие регулировать мощность акустического излучения, достаточную для обнаружения дефектов в композитах.

Заключение

В соответствии с поставленной целью и задачами диссертационной работы проведен ряд взаимодополняющих экспериментальных и теоретических исследований. На базе полученных результатов сформулированы теоретические основы метода лазерно-виброметрического неразрушающего контроля сложных конструкционных материалов с учётом их физических свойств, геометрии, резонансных и термомеханических явлений в дефектах. Разработаны и исследованы воздушно-связанные акустические преобразователи, позволяющие перейти на удаленный режим ввода и регистрации акустических колебаний и минимизировать внешнее воздействие на контролируемые объекты.

Основные выводы, полученные в диссертационном исследовании:

1. Сформулированы фундаментальные основы метода лазерно-виброметрического неразрушающего контроля полимерных и композиционных материалов при резонансной стимуляции дефектов с использованием контактных и воздушно-связанных акустических преобразователей. Определены параметры ультразвукового воздействия на материалы при резонансной ультразвуковой стимуляции, определяющие неразрушающий характер испытаний.
2. На основе результатов экспериментальных исследований полимерных и композиционных материалов разработана конечно-элементная модель дефектов простой геометрической формы, позволяющая в трехмерном представлении охарактеризовать физические феномены, лежащие в основе локального резонанса дефектов по трём компонентам колебаний, а также сопутствующие термомеханические процессы. Показано, что термомеханические явления, возникающие при резонансной стимуляции

дефектов, определяются как физическими свойствами материалов, так и вкладом резонансных гармоник высшего порядка. Наличие высших резонансных гармоник дефекта в спектральном составе сигнала возбуждения приводит к образованию узловых линий и колец по всей площади и на границах дефектов, позволяющих повысить достоверность результатов контроля. Полученные данные были использованы для определения размеров, формы и расположения неоднородностей в композитах, а также для оптимизации последовательностей укладки слоев гибридных композитов с целью повышения их механической прочности и ударопрочности.

3. Экспериментально показана возможность лазерно-виброметрического контроля композитов при бесконтактной ультразвуковой стимуляции с использованием магнитострикционного излучателя в сборке с волноводами оптимальной конфигурации. Определены условия фазовой синхронизации падающей и отраженной волн, а также резонансного угла ввода ультразвука, необходимые для повышения эффективности неразрушающего контроля. Полученные результаты могут быть использованы в промышленности при контроле качества тонких, хрупких и гидрофильных материалов.

4. Разработан и исследован воздушно-связанный газоразрядный излучатель акустических колебаний, позволяющий осуществлять широкополосную акустическую стимуляцию бесконтактным способом с получением мультичастотного резонансного отклика исследуемых объектов и их дефектов. Установлено, что импульсный режим работы устройства не приводит к формированию стоячей волны в воздушном пространстве между излучателем и объектом контроля, что исключает необходимость фазового согласования падающих и отраженных акустических волн. Модификация размера, конфигурации и состава элементов электродной системы позволяет регулировать диапазон рабочих частот газоразрядного излучателя в соответствии с задачами неразрушающих испытаний. Полученные результаты определяют перспективы использования разработанного излучателя в широком спектре акустических систем различного назначения. Отдельно следует обозначить важность практического использования газоразрядного излучателя для неразрушающих испытаний, при которых ключевым фактором условий проведения эксперимента является минимизация внешнего воздействия на контролируемые объекты.

5. С использованием лазерно-виброметрического метода неразрушающего контроля проведены исследования, направленные на оптимизацию физических свойств композиционных материалов при их изготовлении, а также испытания изделий

авиакосмического назначения: 3D напечатанного корпуса нано-спутника «Томск-ТПУ-120», Российского «3D-принтера», изготовленного для космического эксперимента «3D-печать» на Российском сегменте Международной космической станции. По результатам исследований предложены рекомендации к изготовлению, транспортировке и дальнейшей эксплуатации изделий, позволяющие оптимизировать их физические свойства и увеличить срок безопасной эксплуатации. Дальнейшие фундаментальные и прикладные исследования в области лазерно-виброметрического неразрушающего контроля позволят расширить спектр практического применения разработанного метода для контроля качества современных конструкционных материалов и изделий.

Список использованной литературы

1. Post W., Kersemans M., Solodov I., Van Den Abeele K., García S. J., van der Zwaag S. Non-destructive monitoring of delamination healing of a CFRP composite with a thermoplastic ionomer interlayer // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. –2017. – Vol. 101. – P. 243–253.
2. Ambrozinski L., Spytek J., Dziedziech K., Pieczonka L. Damage Identification in Plate-Like Structures Based on Lamb Waves Mode-Conversion Sensing Using 3D Laser Vibrometer // *IEEE International Ultrasonics Symposium: abstract book*. Washington, D.C., USA, September 06–09, 2017. – [S. 1.]: IEEE, UFFC, 2017. – Article number P2-A3-8. – 1 p.
3. Pelivanov I., Ambroziński Ł., Khomenko A., Koricho E.G., Cloud G.L., Haq M., O'Donnell M. High resolution imaging of impacted CFRP composites with a fiber-optic laser-ultrasound scanner // *Photoacoustics*. – 2016. – Vol. 4, is. 2. – P. 55–64.
4. Изосимова М.Ю. Дистанционная диагностика материалов с микро- и наномасштабными дефектами методом сканирующей лазерной виброметрии: дисс. ... канд. техн. наук: 01.04.06 / Изосимова Мария Юрьевна. – М., 2009. – 179 с.
5. Морозов А.В. Развитие методов акустической голографии и лазерной виброметрии для исследования колебаний ультразвуковых излучателей в жидкостях: дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.06 / Морозов Андрей Викторович. – М., 2006. –123 с.
6. Самойлов А.Н. Лазерный доплеровский виброметр для дистанционного контроля изделий и объектов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Самойлов Анатолий Николаевич. – Нижний Новгород, 2013. – 186 с.
7. Gasparetti M., Revel G.M. The influence of operating conditions on the accuracy of in-plane laser Doppler velocimetry measurements // *Measurement*. – 1999. – Vol. 26, is. 3. – P. 207–220.

8. Solodov I., Bernhardt Y., Littner L., Kreutzbruck M. Ultrasonic Anisotropy in Composites: Effects and Applications // *Journal of Composites Science*. –2022. – Vol. 6, is. 3. – Article number 93. – 23 p.
9. Solodov I., Bai J., Busse G. Resonant ultrasound spectroscopy of defects: Case study of flat-bottomed holes // *Journal of Applied Physics*. – 2013. – Vol. 113, is. 22. – Article number 223512. – 7 p.
10. Segers J., Hedayatrasa S., Poelman G., Paepegem W.V., Kersemans M. Robust and baseline-free full-field defect detection in complex composite parts through weighted broadband energy mapping of mode-removed guided waves // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2021. – Vol. 151. – Article number 107360. – 12 p.
11. Delrue S., Tabatabaeipour M., Hettler J., Van Den Abeele K. Non-Destructive Evaluation of Kissing Bonds using Local Defect Resonance (LDR) Spectroscopy: A Simulation Study // *Physics Procedia*. – 2015. – Vol. 70: Proceedings of the 2015 ICU International Congress on Ultrasonics. Metz, France, May 10–14, 2015. – P. 648–651.
12. Rittmann J., Rahammer M., Holtmann N., Kreutzbruck M. A mobile nondestructive testing (NDT) system for fast detection of impact damage in fiber-reinforced plastics (FRP) // *Journal of Sensors and Sensor Systems*. – 2020. – Vol. 9, is. 1. – P. 43–50.
13. Le Bas P.-Y., Ulrich T.J., Anderson B.E., Esplin J.J. A high amplitude, time reversal acoustic non-contact excitation (trance) // *Journal of the Acoustical Society of America Express Letters*. – 2013. – Vol. 134, is. 1. – P. EL52–EL56.
14. Shepard S.M., Ahmed T., Lhota J. Experimental Considerations in Vibrothermography // *Proceedings of SPIE*. – 2004. – Vol. 5405: Thermosence XXVI. Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications. Orlando, USA, April 12–16, 2004. – P. 332–335.
15. Solodov I., Rahammer M., Gulnizkij N., Kreutzbruck M. Noncontact Sonic NDE and Defect Imaging Via Local Defect Resonance // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2016. – Vol. 35, is. 3. – Article number 48. – 8 p.
16. Киселев В.Н., Кузнецов М.Н. Устройство возбуждения упругих колебаний. Авторское свидетельство СССР № 898364, МПК G 01 V 1/157. Заявитель: Научно-производственное объединение «Геофизика». – Заявка № 2865913/18-25, заявл. 07.01.1980, опубл. 15.01.1982, Бюл. № 2. – 4 с.
17. Боцаценко М. Н. Устройство для возбуждения упругих колебаний. Авторское свидетельство СССР № 174381, МПК H 05d. Заявитель не указан. – Заявка № 809738/22-3, заявл. 24.12.1962, опубл. 27.08.1965, Бюл. № 17. – 2 с.

18. Юткин Л.А., Гольцова Л.И. Способ возбуждения упругих волн в толще земной коры при сейсмической разведке. Авторское свидетельство СССР № 106338, класс 21g, 3002. – Заявл. 13.07.1953. – 3 с.
19. Дерусова Д.А. Тепловой вибротермографический контроль композитов с использованием резонансной ультразвуковой и оптической стимуляции: дисс. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Дерусова Дарья Александровна. – Томск, 2016. – 152 с.
20. Композиционные материалы на основе углерода: сборник научных трудов НИИГрафита; гл. ред. Костиков В.И. – М.: ЦНИИцветмет экономики и информации, 1991. – 158 с.
21. Aranguren G., Etxaniz J., Barrera E., Ruiz M., de la Escalera F.M., Essa Y. SHM ultrasound system for damage detection in composite material // NDT.net. – 2018. – Vol. 23, is. 11: 9th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2018). Manchester, UK, July 10–13, 2018.– Article number 149614. – 10 p.
22. Диментберг Ф.М., Шаталов К.Т., Гусаров А.А. Колебания машин. – М.: Машиностроение, 1964. – 308 с.
23. Chladni E.F.F. Entdeckungen über die Theorie des Klanges. – Leipzig: bey Weidmanns Erben und Reich, 1787. – 77 с.
24. Эльпинер, И.Е. Ультразвук/ И.Е. Эльпинер. – М. Физматгиз, 1963. – 420 стр. с илл.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science

1. Derusova D.A., Nekhoroshev V.O., Shpil'noi V.Y., Vavilov V.P. Developing Novel Gas Discharge Emitters of Acoustic Waves in Air for Nondestructive Testing of Materials // Sensors. – 2022. –Vol. 22, is. 23. – Article number 99056. – 14 p. (Q1)
2. Derusova D.A., Vavilov V.P., Druzhinin N.V., Shpil'noi V.Y., Pestryakov A.N. Detecting Defects in Composite Polymers by Using 3D Scanning Laser Doppler Vibrometry // Materials. – 2022. – Vol. 15, is.20 – Article number 7176. – 15 p. (Q1)
3. Derusova D.A., Vavilov V.P., Shpil'noi V.Y., Siddiqui A.O., Prasad Y.L.V.D., Druzhinin N.V., Zhvyrblya V.Yu. Characterising Hidden Defects in GFRP/CFRP Composites by using Laser Vibrometry and Active IR Thermography // Nondestructive Testing and Evaluation. – 2022. – Vol. 37, is. 6. – P. 776–794. (Q2)
4. Vavilov V., Chulkov A., Dubinskii S., Burleigh D., Shpilnoi V., Derusova D., Zhvyrblya V. Nondestructive testing of composite T-Joints by TNDT and other methods // Polymer Testing. – 2021. – Vol. 94. – Article number 107012. – 12 p. (Q1)

5. Derusova D.A., Vavilov V.P., Nekhoroshev V.O., Shpil'noi V.Y., Druzhinin N.V. Features of Laser-Vibrometric Nondestructive Testing of Polymer Composite Materials Using Air-Coupled Ultrasonic Transducers // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2021. – Vol. 57, № 12. – P. 1060–1071.
6. Shpilnoi V., Vavilov V.P., Derusova D.A., Druzhinin N.V., Yamanovskaya A.Y. Specific Features of Nondestructive Testing of Polymer and Composite Materials Using Air-Coupled Ultrasonic Excitation and Laser Vibrometry // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2021. – Vol. 57, № 8. – P. 647–655.
7. Derusova D.A., Vavilov V.P., Chulkov A.O., Shagdirov B.I., Saeed N., Omar M. Evaluating impact damage in Kevlar/carbon composites by using laser vibrometry and active infrared thermography // Electronics Letters. – 2020. – Vol. 56, is. 19. – P.1001–1003.
8. Vavilov V.P., Karabutov A.A., Chulkov A.O., Derusova D.A., Moskovchenko A.I., Cherepetskaya E.B., Mironova E.A. Comparative study of active infrared thermography, ultrasonic laser vibrometry and laser ultrasonics in application to the inspection of graphite/epoxy composite parts // Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2020. – Vol.17, is. 4. – P. 235–248.
9. Derusova D.A., Vavilov V.P., Druzhinin N.V., Kolomeets N.P., Chulkov A.O., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Investigating vibration characteristics of magnetostrictive transducers for air-coupled ultrasonic NDT of composites // NDT and E International. – 2019. – Vol. 107. – Article number 102151. – 10 p. (Q1)
10. Derusova D., Vavilov V., Sfarra S., Sarasini F., Krasnoveikin V., Chulkov A., Pawar S. Ultrasonic spectroscopic analysis of impact damage in composites by using laser vibrometry // Composite Structures. – 2018. – Vol. 211. – P. 221–228. (Q1)
11. Derusova D., Vavilov V., Sfarra S., Sarasini F., Druzhinin N.V. Applying ultrasonic resonance vibrometry for the evaluation of impact damage in natural/synthetic fibre reinforced composites // Polymer Testing. – 2018. – Vol. 68. – P. 70–76. (Q1)
12. Derusova D.A., Vavilov V.P., Druzhinin N.V., Kazakova O.I., Nekhoroshev V.O., Fedorov V.V., Tarasov S.Yu., Shpil'noi V.Yu., Kolubaev E.A. Nondestructive Testing of CubSat Satellite Body Using Laser Vibrometry // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2019. – Vol. 55, № 5. – P. 418–425.
13. Shpil'noi V.Y., Vavilov V.P., Derusova D.A., Krasnoveikin V.A. Studying Stability of CFRP Composites to Low-Energy Impact Damage by Laser Vibrometry // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2019. – Vol. 55, № 9. – P. 639–647.

14. Krasnoveikin V.A., Druzhinin N.V., Shpil'noi V.Yu., Derusova D.A. Complex experimental approach to carbon-carbon composite defect detection by laser vibrometry and optical thermography // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2167, is. 1: International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2019. Tomsk, Russia, October 01–05, 2019. – Article number 020179. – 4 p.
15. Derusova D.A., Vavilov V.P., Xingwang G., Shpil'noi V.Yu., Danilin N.S. Infrared Thermographic Testing of Hybrid Materials Using High-Power Ultrasonic Stimulation // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – Vol. 54, № 10. – P. 733–739.
16. Derusova D.A., Vavilov V.P., Guo X., Druzhinin N.V. Comparing the Efficiency of Ultrasonic Infrared Thermography under High-Power and Resonant Stimulation of Impact Damage in a CFRP Composite // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – Vol. 54, № 5. – P. 356–362.
17. Vavilov V.P., Derusova D.A., Chulkov A.O., Serioznov A.N., Bragin A.A. Inspecting aviation composites at the stage of airplane manufacturing by applying 'classical' active thermal NDT, ultrasonic thermography and laser vibrometry // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2018. – Vol. 10661: Thermosense: Thermal Infrared Applications XL. Orlando, USA, April 16–19, 2018. – Article number 106610W. – 7 p.
18. Derusova D.A., Vavilov V.P., Sfarra S., Sarasini F., Druzhinin N.V., Nekhoroshev V.O. Highly efficient ultrasonic vibrothermography for detecting impact damage in hybrid composites // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2017. – Vol. 10214: Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIX. Anaheim, USA, April 10–13, 2017. – Article number 10214ON. – 10 p
19. Krasnoveikin V.A., Druzhinin N.V., Derusova D.A., Tarasov S.Yu. Modeling Acoustic Wave Propagation in Isotropic Medium // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1909: Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2017. Tomsk, Russia, October 09–13, 2017. – Article number 020101. – 4 p.
20. Krasnoveikin V.A., Smolin I.Y., Druzhinin N.V., Kolubaev E.A., Derusova D.A. Modal testing circuit board assembly of an electronic apparatus by laser vibrometry // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 156, is. 1: International Conference and Youth Scientific School on Materials and Technologies of New Generations in Modern Materials Science. Tomsk, Russia, June 09–11, 2016. – Article number 012005. – 7 p.
21. Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A., Pan Y. Thermal NDT research at Tomsk Polytechnic University // QIRT Journal. – 2016. – Vol. 13, is. 2. – P. 128–143. (Q1)

22. Derusova D.A., Vavilov V.P., Druzhinin N.V. Evaluating impact damage in graphite epoxy composite by using low-power vibrothermography // Proceedings SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2016. – Vol. 9861: Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVIII. Baltimore, USA, April 17–21, 2016. – Article n. 98610F. – 9 p.
23. Solodov I., Derusova D., Rahammer M. Thermosonic Chladni figures for defect-selective imaging // Ultrasonics. – 2015. – Vol. 60. – P. 1–5. (Q1)
24. Vavilov V., Świdorski W. and Derusova D. Ultrasonic and optical stimulation in IR thermographic NDT of impact damage in carbon composites // Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2015. – Vol. 12, is. 2. – P. 162–172. (Q2)
25. Solodov I., Rahammer M., Derusova D., Busse G. Highly-efficient and noncontact vibro-thermography via local defect resonance // Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2015. – Vol. 12, is. 1. – P. 98–111. (Q2)
26. Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A. Evaluating Severity of Impact Damage in CFRP by Determining Thermal Effusivity and Diffusivity // WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer. – 2014. – Vol. 9, is. 1. – P. 251–260.
27. Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A. IR thermographic characterization of low energy impact damage in carbon/carbon composite by applying optical and ultrasonic stimulation // Proceedings of SPIE. – 2014. – Vol. 9105: Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVI. Baltimore, USA, May 05–07, 2014. – Article number 91050J. – 9 p.
28. Derusova D.A., Vavilov V.P., Pawar S.S. Evaluation of equivalent defect heat generation in carbon epoxy composite under ultrasonic stimulation by using infrared thermography // IOP Conference Series: Material Science and Engineering. – 2015. – Vol. 81: International Scientific Conference on Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials. Tomsk, Russia, November 3–8, 2014. –Article number 012084. – P. 251-260.

В Российских изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

29. Федоров В.В., Клименов В.А., Чернявский А.Г., Пожарницкий А.А., Абдулхаликов Р.М., Лямзин А.В., Криницын М.Г., Беликов Р.К., Дерусова Д.А., Юркина В.А., Дерюшева В.Н. Разработка и испытания 3D-принтера для космического эксперимента «3D-печать» на Российском сегменте Международной космической станции // Космическая техника и технологии. – 2023. – № 2 (41). – С. 24–38.
30. Дерусова Д.А., Вавилов В.П. Резонансная ультразвуковая лазерная виброметрия разнородных дефектов в стеклопластике//Контроль.Диагностика,2019,№12(258),с.24-28.

Тезисы докладов, опубликованные по итогам научных конференций

31. Derusova D.A., Nekhoroshev V.O., Vavilov V.P. Generating acoustic vibrations in the air medium by using a gas discharge emitter // 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. 22nd International Symposium on High Current Electronics: Abstracts. Tomsk, Russia, October 2–8, 2022. – Tomsk: TPU Publishing House, 2022. – P. 92.
32. Шпильной В.Ю., Дерусова Д.А., Вавилов В.П. Дефектометрия и синтез данных лазерной виброметрии и теплового контроля // Тезисы докладов XXXIII Уральской конференции ФМНК. Екатеринбург, 19–20 апреля 2022 г. – 2 с.
33. Красновейкин В.А., Дружинин Н.В., Дерусова Д.А., Шпильной В.Ю. Особенности изменения динамических характеристик композитов при нанесении ударных повреждений фиксированной энергии // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии: тезисы докладов Международной конференции. Томск, 5–9 октября 2020 г. – Томск: Изд-во ТГУ, 2020. – С. 300.
34. Derusova D., Vavilov V.P., Chulkov A.O., Shpil'noy V.Yu., Zhvyrbliya V.Yu. Enhancing effectiveness of NDT of GFRP composite by combining results of laser vibrometry and active IR thermography // NDTnet. – 2020. – Vol. 25, is. 4: 3rd Singapore International Non-destructive Testing Conference and Exhibition (SINCE2019): Proceedings. Singapore, December 04–05 2019. – Article number 34-OR-06-8041. – 8 p.
35. Красновейкин В.А., Дружинин Н.В., Дерусова Д.А., Шпильной В.Ю. Комплексный экспериментальный подход обнаружения дефектов в углерод-углеродном композите методами лазерной виброметрии и оптической термографии // Тезисы докладов Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций». Томск, 01–05 октября 2019 г. – Томск: Издательский Дом ТГУ, 2019. – С. 485.
36. Красновейкин В.А., Дерусова Д.А., Чумаевский А.В., Горелова Н.М. Разработка методов и методик виброакустического контроля качества композитов аэрокосмического назначения и конструкций из них с использованием сканирующего лазерного доплеровского виброметра // «Орбита молодежи» и перспективы развития российской космонавтики: сборник докладов всероссийской молодежной научно-практической конференции. Томск, 18–22 сентября 2017 г. – Томск: изд-во ТПУ, 2017. – С. 155–156.
37. Świdarski W., Nesteruk D., Vavilov V., Derusova D. Data Fusion in IR Thermographic Detection of Landmines and NDT of Composites // Atti della «Fondazione Giorgio Ronchi». –

Firenze: Giorgio Ronchi Foundation, 2014. – Vol. LXIX, № 4: Papers of the 12th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications (AITA-12). Turin, Italy, September 10–13, 2013. – P. 473–478.

38. Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A. ‘Classical’ Thermal NDT of Hidden Defects: Passing from Defect Detection to Defect Characterization // Latest Trends in Applied and Theoretical Mechanics: Proceedings of the 10th International Conference on Applied and Theoretical Mechanics (MECHANICS’14). Salerno, Italy, June 03–05, 2014. – Athens: WSEAS Press, 2014. – P. 206–212.

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

39. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU2020612786 «Выявление дефектов и расчет их площади по предоставленному изображению в заданном диапазоне оттенков». В.Ю. Шпильной, Д.А. Дерусова, А.О. Чулков. Заявлено 21.02.2020 г., Опубликовано 03.03.2020 г., Бюл. № 3.

40. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU2020619856 «Thermoson». М.С. Суханов, В.П. Вавилов, А.О. Чулков, Д.А. Дерусова. Заявлено 07.08.2020 г., Опубликовано 25.08.2020 г.

Другие публикации

41. Вавилов В.П., Чулков А.О., Дерусова Д.А., Пань Я. Новые идеи в активном тепловом контроле // Технология машиностроения. – 2017. – № 10. – С. 40–43.

42. Вавилов В.П., Чулков А.О., Дерусова Д.А., Пань Я. Новые идеи в активном тепловом контроле // В мире неразрушающего контроля. – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 5–7.

43. Дерусова Д.А., Вавилов В.П. Неразрушающий контроль материалов методом резонансной ультразвуковой инфракрасной термографии // В мире неразрушающего контроля. – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 21–23.

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

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