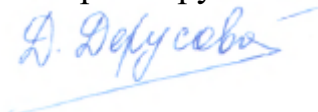


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи



Дерусова Дарья Александровна

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

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

Диссертация
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант
доктор технических наук, профессор
Вавилов Владимир Платонович

Томск – 2023

Оглавление

Введение.....	6
Глава 1. Обзор методов неразрушающих испытаний изделий из современных конструкционных материалов, включая полимерные композиты, с использованием сканирующей лазерной доплеровской виброметрии	21
1.1. Неразрушающий контроль полимерных композиционных материалов.....	21
1.2. Применение сканирующей лазерной доплеровской виброметрии для неразрушающих испытаний материалов и изделий	24
1.2.1. Принцип действия, назначение и области применения.....	24
1.2.2. Модальный анализ	28
1.2.3. Профилирование поверхностей и вибромикроскопия.....	29
1.2.4. Лазерное 3D вибросканирование с использованием ИК-термографии, роботизированных и многолучевых систем.....	33
1.2.5. Линейная и нелинейная лазерная виброметрия.....	34
1.2.6. Лазерная виброметрия при бесконтактной ультразвуковой стимуляции.....	36
1.3. Выводы по главе 1	38
Глава 2. Разработка метода сканирующей лазерной виброметрии при резонансной стимуляции дефектов в полимерных композиционных материалах	39
2.1. Сканирующая лазерная доплеровская виброметрия при резонансной стимуляции дефектов.....	41
2.2. Теоретические основы явления локального резонанса дефекта	46
2.2.1. Теоретический расчет	46
2.2.2. Конечно-элементное моделирование.....	49
2.3. Теплогенерация в процессе резонансной стимуляции дефектов	53
2.3.1. Тепловыделение в области дефекта на частоте основного резонанса ..	53
2.3.2. Тепловыделение в области дефекта в зависимости от порядка резонансных гармоник.....	61

2.4. Исследование резонансных явлений в области дефектов с использованием трехкомпонентной сканирующей лазерной виброметрии.....	66
2.4.1. Исследование дефектов простой геометрической формы в гомогенных материалах в трехмерном представлении	66
2.4.2. Конечно-элементное моделирование дефектов простой геометрической формы в гомогенных материалах в трехмерном представлении.....	68
2.4.3. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных исследований	70
2.4.4. Сравнение уровня акустического воздействия при резонансной ультразвуковой стимуляции дефектов с пределом прочности исследуемых материалов	76
2.5. Неразрушающие испытания материалов и изделий из полимерных композитов с использованием лазерной виброметрии при резонансной ультразвуковой стимуляции дефектов.....	78
2.5.1. Исследование открытых дефектов в стеклопластиковом композите с использованием однокомпонентной сканирующей лазерной виброметрии..	78
2.5.2. Спектроскопический анализ ударного повреждения в углепластике с использованием трехкомпонентной сканирующей лазерной виброметрии	82
2.5.3. Исследование физических свойств гибридных композиционных материалов с дефектами	88
2.5.4. Исследования объектов космического назначения с использованием лазерной виброметрии на примере испытаний наноспутника (CubSat) и Российского «3D-принтера»	100
2.6. Выводы по главе 2.....	106
Глава 3. Бесконтактная ультразвуковая стимуляция материалов воздушно-связанным магнитострикционным излучателем в задачах лазерной виброметрии.....	114
3.1. Исследование основных вибро-акустических характеристик воздушно-связанного магнитострикционного преобразователя в сочетании с титановыми волноводами различной конфигурации.....	117

3.2. Оценка эффективности использования четырех типов волноводов для передачи акустической энергии через воздушную среду	125
3.3. Исследование диаграммы направленности магнестриктора в сборке с титановым волноводом оптимальной конфигурации.....	131
3.4. Применение воздушно-связанного магнестрикционного преобразователя для контроля качества композиционных материалов	136
3.5. Оценка влияния стоячих акустических волн на проведение контроля качества композитов с использованием бесконтактной ультразвуковой стимуляции фиксированной частоты.....	147
3.6. Сравнение лазерной виброметрии при бесконтактной ультразвуковой стимуляции и классических методов неразрушающего контроля для обнаружения дефектов в композиционных материалах	152
3.7. Выводы по главе 3.....	161
Глава 4. Разработка и исследование газоразрядного излучателя акустических колебаний для неразрушающего контроля методом лазерной виброметрии.....	163
4.1. Исследование воздушно-связанного газоразрядного излучателя.....	166
4.1.1. Конструкция излучателя	162
4.1.2. Измерение амплитудно-частотного спектра излучателя и оценка повторяемости амплитуды колебательного смещения диафрагмы.....	168
4.1.3. Определение влияния состава мембраны на диапазон рабочих частот газоразрядного излучателя.....	177
4.1.4. Исследование влияния конфигурации электродной системы на изменение амплитуды колебательного смещения диафрагмы излучателя.....	182
4.1.5. Измерение диаграммы направленности излучателя	185
4.1.6. Оценка электроакустических характеристик газоразрядного излучателя	193
4.1.7. Проведение ресурсных испытаний газоразрядного излучателя	199
4.2. Исследование акустических волн в воздушной среде	206

4.2.1. Рефрактовиброметрия воздушной среды возле газоразрядного излучателя.....	206
4.2.2. Измерение уровня акустического шума от газоразрядного излучателя .	212
4.3. Неразрушающий лазерно-виброметрический контроль композиционных и полимерных материалов бесконтактным способом с использованием газоразрядного излучателя.....	217
4.3.1. Диагностика слабых ударных повреждений энергией до 15 Дж в углепластиковых композитах различной толщины (от 1 до 5 мм)	217
4.3.2. Исследование влияния угла наклона излучателя к контролируемой поверхности на эффективность ввода акустической энергии.....	224
4.3.3. Контроль качества тонких, хрупких и гидрофильных композитов.....	229
4.4. Сравнительный анализ результатов акустической стимуляции композитов с использованием воздушно-связанных преобразователей.....	232
4.4.1. Лазерная виброметрия с использованием воздушно-связанного пьезоэлектрического преобразователя	235
4.4.2. Лазерная виброметрия с использованием воздушно-связанного магнитострикционного излучателя.....	239
4.4.3. Лазерная виброметрия с использованием воздушно-связанного газоразрядного излучателя.....	243
4.5. Выводы по главе 4.....	247
Заключение	250
Список сокращений	254
Список использованной литературы.....	255
Приложение А. Описание работы программного обеспечения «DeFinder».....	290
Приложение Б. Копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ	295
Приложение В. Акт внедрения и рекомендательные письма ведущих мировых ученых	297

Введение

Степень разработанности и актуальность темы диссертационного исследования. Акустические методы неразрушающего контроля (НК) традиционно считаются одними из наиболее надежных и широко применяемых для диагностики качества полимерных композиционных материалов (ПКМ), используемых в авиационной и ракетно-космической технике [1–9]. В России существенный вклад в научные исследования композиционных материалов авиакосмического назначения с использованием ультразвуковых и тепловых методов контроля внесли Смотров С. А., Смотров А. В., Дубинский С. В. (Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Московская обл.) [10–12], интенсивные работы по разработке и апробации новых методик теплового неразрушающего контроля изделий авиакосмического назначения из ПКМ ведут Будадин О. Н., Козельская С. О., Абрамова Е. В. (Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения, г. Хотьково, Московская обл.) [13–16], исследования в области лазерной акустики проводятся под руководством Карабутова А. А. (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ)) [17–19], исследования в области моделирования акустических полей ведутся под руководством Глушкова Е. В. и Глушковой Н. В. (Кубанский государственный университет, г. Краснодар, Институт математики, механики и информатики) [20–24].

Сканирующая лазерная доплеровская виброметрия 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 термографии (вибротермографии).

Родоначальниками ультразвуковой вибротермографии как научного направления являются Pye C. и Adams R. из Бристольского университета (Великобритания), проводившие первые исследования на предмет определения тепловыделения в зоне дефектов при ультразвуковой (УЗ) стимуляции материалов [25, 26]. В России научные исследования по оценке влияния дефектов в твердых телах на их нелинейные акустические свойства проводились с 60-х годов прошлого века под руководством Красильникова В.А. на кафедре акустики физического факультета МГУ [27–30]. Результаты теоретических и экспериментальных исследований легли в основу теории нелинейной акустики, изучающей взаимодействия акустических волн с веществом на макро- и микроскопических уровнях. Фундаментальные и прикладные научные исследования в области волновых процессов, возникающих при проведении ультразвукового НК ПКМ, в настоящее время проводятся под руководством Глушкова Е. В. и Глушковой Н. В. В научных работах [20–22] предложены аналитические методы расчета волновых полей в многослойных композиционных материалах, включая численное моделирование резонансных явлений в материалах с препятствиями, распространения бегущих волн и их дифракции в области дефектов [23, 24].

Активное развитие дефектоскопических применений нелинейной акустики произошло с появлением сканирующей лазерной доплеровской виброметрии. Отечественные научные достижения в области акустики, полученные с использованием оборудования лазерной виброметрии, изложены в диссертационных работах [27, 31, 32], начиная с 2006 года. Так, в работе [27] изучены физические механизмы структурной нелинейности твердых 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 Рэлея и Лэмба: определять наличие дефектов в материалах путем оценки нелинейных свойств распространяющихся акустических волн.

За рубежом работы по использованию лазерной виброметрии в НК материалов проводятся с 90-х годов прошлого века [33, 34], и в последние годы результаты этих исследований находят практическое применение. В частности, исследования 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) [35, 36]. Исследователи идентифицируют возникающие акустические нелинейности с использованием сканирующей лазерной виброметрии 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 [36–38] с использованием лазерных виброметров, оснащенных ИК-детекторами для повышения точности исследований (термовиброметрия). Полученные этой группой результаты расширили границы применимости лазерной виброметрии в области сканирования твердых тел, отличающихся низкой отражающей способностью.

Следует отметить, что наличие локальных дефектов в материалах приводит к возникновению аномальных нелинейностей измеренных акустических параметров [27], а в некоторых случаях сопровождается генерацией тепла при резонансной стимуляции [39]. 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 [40–45]. 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 [5, 46–48].

Помимо нелинейной акустики, перспективной тенденцией исследований является применение бесконтактных излучателей для неразрушающих испытаний тонких и хрупких композитов. Исследования в области лазерной виброметрии при бесконтактной ультразвуковой стимуляции проводятся ограниченным числом научных групп [1–9, 39, 49], которые рассмотрели достоинства и недостатки воздушно-связанных акустических систем для НК. В частности, в работах [7–9] было отмечено, что необходимым условием обнаружения дефектов является соответствие резонансной частоты дефектов частоте распространяющихся акустических волн, что становится невозможным при использовании узкополосных резонансных излучателей. Из этого следует, что использование бесконтактных пьезоэлектрических излучателей для проведения контроля качества многослойных дефектов в композитах в настоящее время существенно ограничено, но может быть проведено эхо-импульсным методом [8]. Также важно отметить, что пьезокерамические преобразователи имеют существенные ограничения по амплитуде прикладываемого напряжения и, соответственно, излучаемой мощности. Они хрупки и отличаются сравнительно узким диапазоном рабочих частот. Поскольку резонансные частоты пьезоэлемента определяются его размерами, при повышении диапазона рабочих частот уменьшается размер самого излучателя, что сопровождается понижением допустимой мощности излучения. В связи с этим рабочий диапазон частот и мощность излучателя напрямую зависят от его конфигурации.

Магнитострикционные излучатели, в свою очередь, способны обеспечивать высокий уровень выходной мощности, что позволяет достаточно быстро визуализировать подповерхностные дефекты за счет активации интенсивных вибраций и внутреннего трения стенок расслоений в материалах при контактной стимуляции [50–52]. Для излучателей указанного типа также характерна узкая

полоса рабочих частот, однако высокий уровень мощности устройства позволяет предположить, что преобразователи указанного типа могут быть эффективно использованы для бесконтактной передачи ультразвука в контролируемые изделия при реализации соответствующих инженерных решений, обеспечивающих неразрушающий характер испытаний [53]. При этом необходимо обеспечить охлаждение обмотки мощного магнитострикционного излучателя для непрерывной работы в воздушной среде без нагрузки [54]. Применение магнитострикционных излучателей для бесконтактной передачи ультразвука в задачах лазерной виброметрии впервые исследуется в настоящей диссертационной работе.

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 (диапазон рабочих частот, интенсивность, минимальная плотность мощности излучения, зона ультразвукового воздействия и т. п.), предъявляемыми к источникам возбуждения акустических колебаний в НК [46, 48, 49]. Помимо этого, вышеперечисленные особенности широко распространенных систем возбуждения ультразвуковых колебаний существенно усложняют анализ дефектов на практике. В то же время есть предпосылки, указывающие на возможность использования импульсного электрического разряда для генерации акустических колебаний звукового и ультразвукового диапазона. В частности, в работе [55] показано, что импульсный газовый разряд создает в окружающей среде быстрый скачок давления. При протекании тока разряда за счет стремительного роста температуры и расширения области плазмы в окружающей среде происходит формирование волны сжатия, в некоторых условиях формируемая волна подобна ударной (так называемый электро-термо-акустический эффект). Далее волна распространяется в объеме газоразрядного промежутка и взаимодействует с электродами и газоразрядной камерой, вызывая их отклонения от положения устойчивого равновесия. В процессе релаксации системы происходит возбуждение упругих колебаний в широком спектре частот. Часть энергии колебаний излучается

в окружающую среду, формируя акустические волны. Следует отметить, что, несмотря на теоретическую возможность реализации широкополосной системы для генерации акустических колебаний на основе импульсного газового разряда, указанное направление изучено недостаточно и требует проведения соответствующих научных исследований.

Известны особенности протекания импульсного электрического разряда в газе, изложенные в ряде авторских свидетельств и патенте на газоразрядные устройства для возбуждения упругих колебаний [56–60], 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. Полученные знания расширяют области применения акустических методов НК для контроля слоистых композиционных материалов. 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.

Резюмируя вышеизложенное, следует заключить, что изучение резонансных явлений в области дефектов при их акустической стимуляции является актуальной и важной проблемой научных исследований. Создание методики лазерной виброметрии при резонансной стимуляции дефектов позволит оптимизировать процедуру проведения контроля качества изделий и материалов с дефектами путем определения их физических свойств и возникающих резонансных явлений, производить анализ физических свойств материалов (анализ демпфирующих характеристик, модальный анализ) в зависимости от их конфигурации (порядка и ориентации слоев волокон). Данная процедура позволит оптимизировать процесс производства композитов, оценить способность их сопротивления различного типа повреждениям и пролонгировать срок службы готового изделия. Разработка воздушно-связанных акустических преобразователей для задач НК в свою очередь позволит перейти на удаленный режим возбуждения упругих волн в материалах,

исключить возможность повреждения исследуемых объектов в точке ввода ультразвука и повысить экспрессность контроля качества.

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 гомогенных 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.

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, проводился с использованием теории упругости Тимошенко С. П., известных выражений термодинамики и акустики. Результаты теоретических расчетов были сопоставлены с экспериментальными данными сканирующей лазерной доплеровской виброметрии и инфракрасной 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 лазерного виброметра. Экспериментальные результаты были использованы для верификации разработанной математической модели и позволили с удовлетворительной точностью рассчитать вклад каждой из трех компонент вибраций в результирующую виброграмму и результаты НК в целом.

Положения, выносимые на защиту:

1. Акустическая резонансная стимуляция структурных неоднородностей материалов за счет активации интенсивных вибраций приводит к локальному тепловыделению в зоне дефектов, причем 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 твердое 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 и энергию 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 сканирующей лазерной виброметрии 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 магнитострикционного 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 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, чем объем канала разряда.

5. Предложенный метод электроакустической бесконтактной стимуляции композиционных материалов с использованием разработанного газоразрядного излучателя позволяет осуществить широкополосную акустическую стимуляцию композитов, при которой возникает мультичастотный 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 (теплого) 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).

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 сканирующей лазерной доплеровской виброметрии, 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), конференция «Орбита молодежи» и перспективы развития Российской космонавтики» (Томск, Россия, 2017); International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures (Томск, Россия, 2017), 13th International Conference on Quantitative Infrared Thermography (Гданьск, Польша, 2016), 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), 12th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (Бордо, Франция, 2015), 10th International conference on applied and theoretical mechanics (Салерно, Италия, 2014), International Conference on Artificial Intelligence: Theory and Applications (Турин, Италия, 2013).

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 в рамках программы «Erasmus+» по обмену студентами и преподавателями для проведения научных исследований и чтения лекций в Политехническом университете г. Бари (Италия) (2019 г).

Публикации. По результатам исследования опубликовано 43 научные работы [50–53, 61–99], включая 28 статей в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, 30 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 38 публикаций в журналах РИНЦ и сборниках трудов конференций; получены 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.

Глава 1. Обзор методов неразрушающих испытаний изделий из современных конструкционных материалов, включая полимерные композиты, с использованием сканирующей лазерной доплеровской виброметрии

1.1. Неразрушающий контроль полимерных композиционных материалов

Полимерные композиционные материалы, в особенности стекло- и углепластики, широко применяются в различных областях промышленности на протяжении более 40 лет. Популярность углепластиковых композитов в автомобильной [100, 101], авиа- [101, 102] и ракетно-космической [101–103] отраслях промышленности обуславливается их высокой прочностью, сопоставимой со сталью [35, 104–106], сравнительно невысокой плотностью и широким диапазоном рабочих температур [107].

Технологии производства углепластиковых ПКМ [108, 109] непрерывно совершенствуются, однако, несмотря на широкий спектр предложений по упрочнению композитов путем их гибридизации, существует ряд областей производства, где необходимо использовать композиты малой толщины [100]. В этом случае толщина и прочность являются ключевыми факторами при разработке тонких конструкций.

С расширением областей применения ПКМ и усложнением технологических процессов их изготовления возрастают требования к качеству готовых изделий. По своим прочностным характеристикам композиты способны выдерживать ударные воздействия с энергией более 25 Дж [110], но их устойчивость к ударным нагрузкам резко снижается при уменьшении толщины изделия. Например, в композитах толщиной около 7 мм удар с энергией порядка 5 Дж вызывает небольшое повреждение, практически не наносящее ущерба изделию [111]. В то же время ударное воздействие аналогичной энергии в ПКМ толщиной около 1 мм может привести к его полному разрушению. Важно отметить, что дефекты, возникающие в композитах, как правило, представляют собой конгломерат трещин, расслоений и разрывов упрочняющих волокон. В связи с этим

неразрушающие испытания ПКМ имеют важное значение как при проектировании конструкций, так и для обеспечения их надежной эксплуатации.

Существует ряд методов обнаружения производственных и эксплуатационных дефектов в ПКМ. Наиболее широко используемыми методами неразрушающего контроля (НК) [112], являются ультразвуковая (УЗ) томография [113–115], тепловой контроль [116–118], радиационный контроль [119–121], радиоволновый контроль [122–124] и прочие. Ниже в таблице 1.1 приведены результаты сравнения шести методов НК применительно к контролю крупных конструкций из ПКМ [125].

Таблица 1.1 – Сравнение методов неразрушающего контроля, используемых для контроля крупных конструкций из полимерных композиционных материалов [125]

Метод НК	Мобильность	Скорость сканирования	Пространственное разрешение	Особые требования
Тепловой контроль	Высокая	Высокая	Высокое	Неотражающая поверхность
Шерография	Высокая	Высокая	Высокое	Отражающая поверхность ²
Визуальный контроль, простукивание	Очень высокая	Медленная	Низкое ¹	–
Ультразвуковой контроль	Средняя	Медленная	Высокое	Иммерсионная жидкость ³
Рентгенография	Средняя	Медленная	Высокое	Обеспечение безопасности
Сканирующая лазерная доплеровская виброметрия	Средняя	Средняя	Высокое	Отражающая поверхность ²

¹ Отсутствуют графические изображения по результатам проведения контроля указанным методом.

² Отражающая способность может быть избирательной в зависимости от длины волны.

³ Существуют бесконтактные излучатели, а также лазерные устройства для генерации ультразвука, применение которых не предусматривает использования иммерсионной жидкости.

Из приведенных в таблице 1.1 данных видно, что каждый из рассматриваемых методов НК крупногабаритных конструкций из ПКМ имеет свои достоинства, недостатки и ограничения. В частности, наиболее широко

распространенный метод УЗ-контроля имеет сравнительно низкую производительность испытаний и предусматривает использование иммерсионной жидкости, что существенно влияет на результаты испытаний. Важно заметить, что ПКМ в большинстве случаев являются гидрофильными и могут впитывать воду, особенно ячеистые сотовые конструкции. В связи с этим, после их контроля УЗ методом изделия необходимо подвергать дорогостоящей процедуре просушки в автоклаве или печи, что также является затруднительным в случае испытаний крупногабаритных конструкций. Остаточное содержание воды в сотовых панелях после проведения УЗ-контроля зачастую регистрируется с использованием ИК-термографии и может вызвать прогрессирующий рост области дефекта при понижении температуры летательного аппарата на больших высотах в ходе его эксплуатации. В связи с этим, качество ячеистых композиционных материалов традиционно определяют с использованием теплового контроля или бесконтактных ультразвуковых систем. Тепловой контроль, в свою очередь, признан наиболее экспрессным и информативным методом НК композитов. Он использует количественные характеристики процесса динамической теплопередачи в материалах с дефектами для проведения контроля качества [117]. Указанным методом эффективно обнаруживают подповерхностные дефекты в ПКМ, такие как расслоения, трещины, ударные повреждения, непроклеи и прочие. Однако важно отметить, что основным ограничением метода является толщина контролируемых изделий. Для ПКМ толщина ограничивается в среднем до 20 мм и в ряде случаев может достигать 40 мм [126].

Как и в случае теплового контроля, применение метода шерографии для обнаружения дефектов в ПКМ ограничивается толщиной 20 мм [127]. Однако граничные условия оказывают значительное влияние на картину интерференционных шерографических полос [127], так как указанный метод относится к интерферометрическим методам НК и основан на анализе интерференционных явлений, возникающих при монохроматическом лазерном облучении поверхности объекта, деформированного термическими, механическими, вибрационными нагрузками, либо вакуумом. К преимуществам

метода шерографии относят проведение измерений в режиме реального времени, возможность контроля криволинейных поверхностей, а также мобильность оборудования [128, 129].

Резюмируя вышеизложенное, следует заключить, что из-за большого разнообразия ПКМ в настоящее время ни один метод НК не является оптимальным для проведения испытаний всех типов указанных материалов. В связи с этим, универсальным решением является использование нескольких методов НК для повышения информативности и достоверности результатов контроля [130–132].

Одним из новых направлений в области НК ПКМ является сканирующая лазерная доплеровская виброметрия [133–137]. Указанный метод фактически основан на регистрации вибрационных характеристик материалов при их акустической стимуляции [138–142]. Настоящее диссертационное исследование посвящено разработке метода неразрушающих испытаний полимерных композитов с использованием сканирующей лазерной виброметрии при резонансной стимуляции дефектов, а также разработке способов бесконтактной резонансной и широкополосной стимуляции материалов. Далее в главе 1 приводится более подробный обзор принципа работы, областей применения, возможностей и ограничений метода лазерной виброметрии для испытания изделий из современных конструкционных ПКМ.

1.2. Применение сканирующей лазерной доплеровской виброметрии для неразрушающих испытаний материалов и изделий

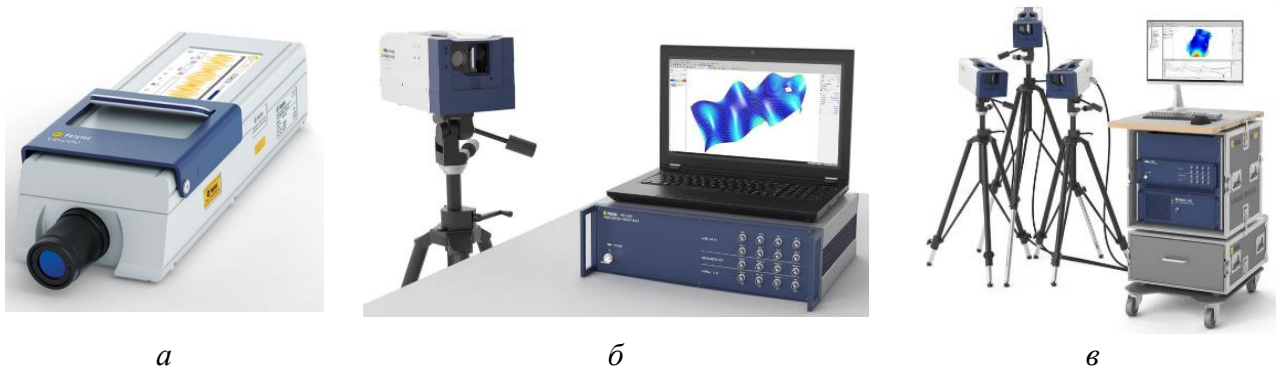
1.2.1. Принцип действия, назначение и области применения

Лазерная доплеровская виброметрия (ЛДВ), или лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА), представляет собой технологию дистанционного, высокочувствительного и бесконтактного измерения вибраций колеблющихся объектов. Методика лазерной виброметрии основана на когерентных свойствах лазерных пучков, а также высокой чувствительности когерентного детектирования

в интерферометре Майкельсона. С использованием интерферометра в рассеянном свете определяют доплеровский сдвиг частоты, который пропорционален виброскорости прозрачных или полупрозрачных потоков жидкости, а также виброскорости колебаний непрозрачных отражающих поверхностей (твердых тел). Интерферометр определяет мгновенную скорость колебаний объекта с учетом того, что его выходной сигнал модулируется по частоте. Таким образом, лазерная доплеровская виброметрия позволяет получить информацию об амплитудно-частотных характеристиках объекта и их пространственном распределении.

Впервые лазерная доплеровская виброметрия появилась в 1960-х годах [143] и в настоящее время нашла широкое применение в различных областях промышленности, медицине, биологии, материаловедении, электронике, нанотехнологиях ввиду прецизионности и надежности измерения вибраций колеблющихся объектов. В промышленных разработках лазерные системы измерения вибрации используются для исследования изделий в широком диапазоне размеров: от корпусов автомобилей, компонентов самолетов, двигателей и зданий до микромашин и компонентов жестких дисков. Существует множество других исследовательских приложений лазерной виброметрии в машиностроении, акустике и других отраслях науки и техники ввиду того, что она позволяет бесконтактно измерять скорость колебания объектов от нескольких мкм/с до 40 м/с (высокоскоростной виброметр) в диапазоне частот от 0,001 Гц до 6 ГГц (высокочастотный виброметр). К преимуществам метода также следует отнести возможность измерения скорости колебаний вращающихся компонентов, объектов под напряжением, нечувствительность к температуре, возможность измерения в вакууме, через стекло и т. п.

Лазерные виброметры подразделяют на точечные (рисунок 1.1, *а*) и сканирующие (сканирующие лазерные доплеровские виброметры (СЛДВ)) (рисунок 1.1, *б, в*), причем последние позволяют измерять вибрации в режиме пошагового сканирования с последующим построением сетки колебаний объекта (виброграммы) как на выборочной частоте, так и в заданном диапазоне частот с применением преобразования Фурье и процедуры усреднения данных [144].

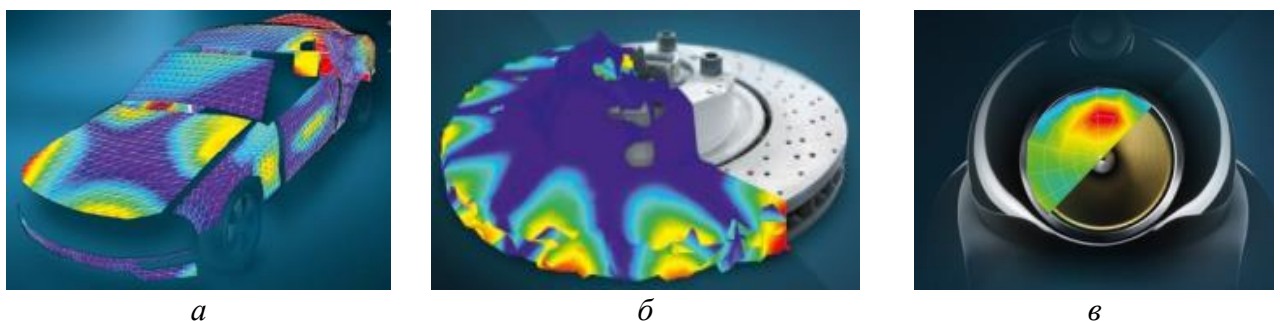


а – точечный виброметр, *б* – однокомпонентный сканирующий виброметр,
в – трехкомпонентный сканирующий виброметр

Рисунок 1.1 – Фотографии лазерных виброметров компании Polytec

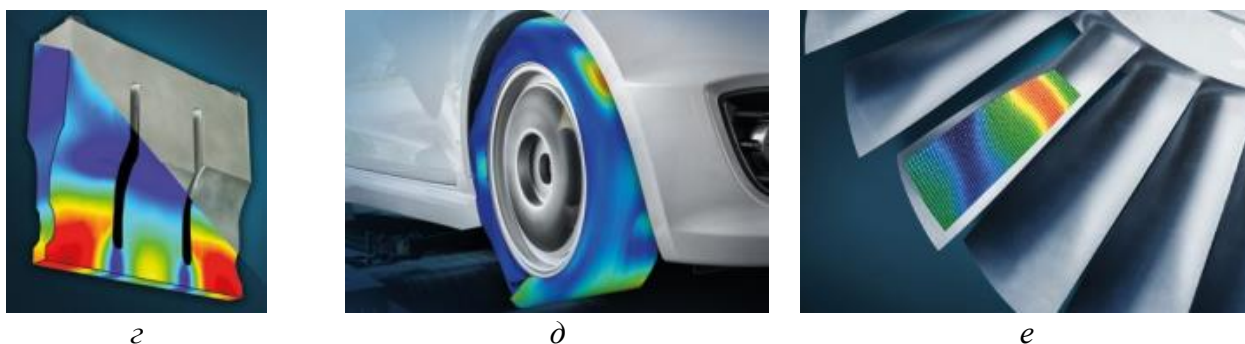
Модернизированной версией СЛДВ являются трехкомпонентные лазерные виброметры (3D СЛДВ). Указанные устройства позволяют выделить компоненты колебаний по x , y и z координатам путем использования лучей от трех лазерных головок, падающих на поверхность измерения под различными углами. В частности, ортогональная проекция используется для расчета скорости вибрации в направлениях x , y и z , где z определяется как внеплоскостная составляющая вибраций, а x и y являются двумя плоскостными составляющими.

Широкий диапазон характеристик, измеряемых лазерными виброметрами, определяет их применение в различных областях промышленности, медицины, техники, геолокации, неразрушающем контроле и пр. На рисунке 1.2 приведены некоторые примеры областей применения сканирующей лазерной виброметрии в технике, для испытаний материалов и изделий из ПКМ и металлов [144].



а – экспериментальный модальный анализ, *б* – определение формы колебаний на рабочих частотах изделий, *в* – акустические измерения

Рисунок 1.2, *а–в* – Области применения сканирующей лазерной виброметрии для неразрушающих испытаний материалов и изделий



z – неразрушающий контроль и ультразвук, *д* – исследование вращающихся деталей,
e – исследование деформаций растяжения–сжатия

Рисунок 1.2, *z–e* – Области применения сканирующей лазерной виброметрии для неразрушающих испытаний материалов и изделий

Благодаря высокой скорости и прецизионности измерения колебаний ЛДВ применяется для исследования изделий из ПКМ в авиационной, транспортной, ракетно-космической промышленности при проведении экспериментального модального анализа, технической диагностике, в неразрушающем контроле, при проведении прочностных испытаний материалов и исследованиях их усталостных свойств. Основные измеряемые параметры, используемые для описания динамических характеристик вибрации как в пространственной, так и во временной областях:

- а) пространственные свойства распределения жесткости и демпфирования материала;
- б) модальные характеристики (собственные частоты, формы колебаний и коэффициенты демпфирования);
- в) временной отклик, создаваемый внешними возмущающими силами.

Наиболее важными характеристиками с точки зрения определения целостности конструкции являются уровни вибрационного отклика (прогибы, напряжения), поскольку они наиболее тесно связаны с рабочими характеристиками изделия. Пространственные свойства в свою очередь могут быть использованы для оптимизации конструкции и достижения приемлемого уровня ее вибрационного отклика. Промежуточные модальные параметры также имеют важное значение с точки зрения дефектометрии и изменения пространственных характеристик

объекта, так как позволяют изменять диапазон собственных частот изделий в соответствии с поставленными инженерными задачами, а также могут быть использованы для чистой дефектоскопии. Помимо изложенных выше областей применения, лазерная виброметрия широко используется для проведения вибромикроскопии и профилометрии изделий из ПКМ, а также контроля их качества.

1.2.2. Модальный анализ

Необходимость определения собственных частот и форм колебаний материалов и изделий является одной из базовых характеристик инженерных сооружений, в первую очередь, из-за негативного воздействия вибраций на их целостность. Основной задачей модального анализа является определение и оптимизация динамических характеристик конструкций с целью повышения их устойчивости к вибрациям. В классическом представлении экспериментальный модальный анализ включает несколько этапов: создание экспериментальной установки и позиционирование объекта исследования; сбор данных (оценка амплитудно-частотных характеристик объекта); идентификация системы (определение вибрационных характеристик объекта по измеренным входным параметрам и его реакции на возмущающее воздействие); обработка данных и анализ полученных результатов; оптимизация математической модели объекта. Проведение указанных процедур позволяет исследовать динамические свойства конструкций, определить наилучшую модель из нескольких оценок и оптимизировать конфигурацию исследуемого объекта в соответствии с поставленными задачами.

Применение лазерной виброметрии в области модальных испытаний позволило снизить влияние присоединенной массы при измерении вибрационных характеристик, а также экспериментально определить реальные формы колебаний объектов в широком диапазоне частот. Для оценки модальных параметров было разработано несколько методов, позволяющих определять собственные частоты,

формы колебаний и коэффициенты демпфирования конструкций. Для этого используют сигналы специальной формы: синусоидального [145], ударного [146, 147], случайного и мультисинусоидального [148, 149] типов. При этом возбуждающие устройства могут быть закреплены на исследуемом объекте, установлены на специализированное основание (гидравлические и электродинамические возбудители), ударно воздействовать на объект или использоваться бесконтактно (акустическое или магнитное возбуждение), не влияя на динамику объекта исследования. Главной задачей модальных испытаний является анализ отклика испытуемого объекта на возмущение в заданном частотном диапазоне с определенным уровнем силы. С практической точки зрения, лазерная виброметрия по средствам модального анализа позволяет измерить отклик исследуемого объекта на внешнее воздействие, преобразовать эти данные и извлечь отдельные моды, и, определяя их вклад в общий отклик системы, оценить распределение ее жесткости. После того, как модальные параметры определены и проанализированы, производят оценку динамического поведения исследуемой системы. Полученные результаты позволяют оптимизировать динамическое поведение системы, а также оценить соединение исследуемого изделия с другими конструкциями [150].

1.2.3. Профилирование поверхностей и вибромикроскопия

Сканирующие лазерные виброметры также нашли применение в оптических бесконтактных измерительных системах профилометрии для описания исследуемой поверхности в 3D представлении. Профилометры позволяют определять параметры геометрии исследуемой поверхности, такие как плоскостность, высота ступеней, параметры параллельности и шероховатости, что имеет важное значение при анализе тонких слоев, наблюдении за деформацией, а также измерении геометрии объектов. Основанные на принципе интерферометрии спектрально-широкополосного белого света (также известной как когерентная интерферометрия, интерферометрия с вертикальным сканированием

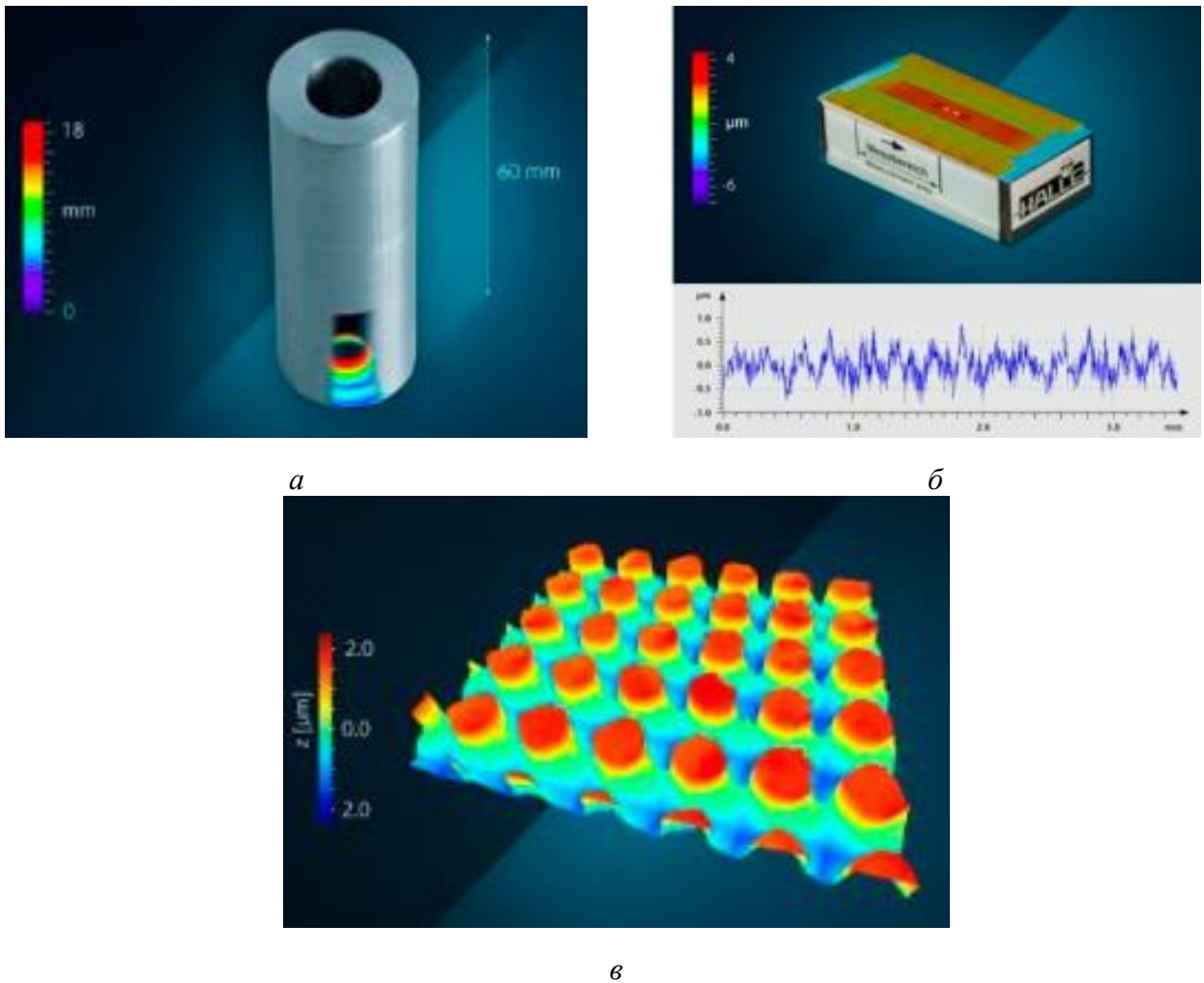
или когерентный радар), бесконтактные 3D профилометры сочетают в себе высокую чувствительность интерферометров и возможность проводить измерения высоты до нескольких миллиметров с разрешением до 1 нм, при поперечных размерах исследуемого объекта от нескольких микрометров до более 100 мм [151–154]. Таким образом, метод бесконтактной оптической профилометрии находит широкое применение в различных промышленных приложениях, связанных с контролем качества и геометрии материалов [154]. На рисунке 1.3 приведена линейка измерительных систем бесконтактной оптической 3D профилометрии, предлагаемых компанией Polytec [144].



Рисунок 1.3 – Измерительные системы бесконтактной оптической 3D профилометрии [144]

Приведенные на рисунке 1.3 системы различаются назначением: отдельные модели позволяют измерять поверхность размером до 70 мм в вертикальном направлении (рисунок 1.4, *а*), другие – исследовать широкие по площади поверхности (до 43×32 мм²) объекты (рисунок 1.4, *б*), а также проводить измерения с высокой прецизионностью (разрешение порядка единиц нанометров) (рисунок 1.4, *в*).

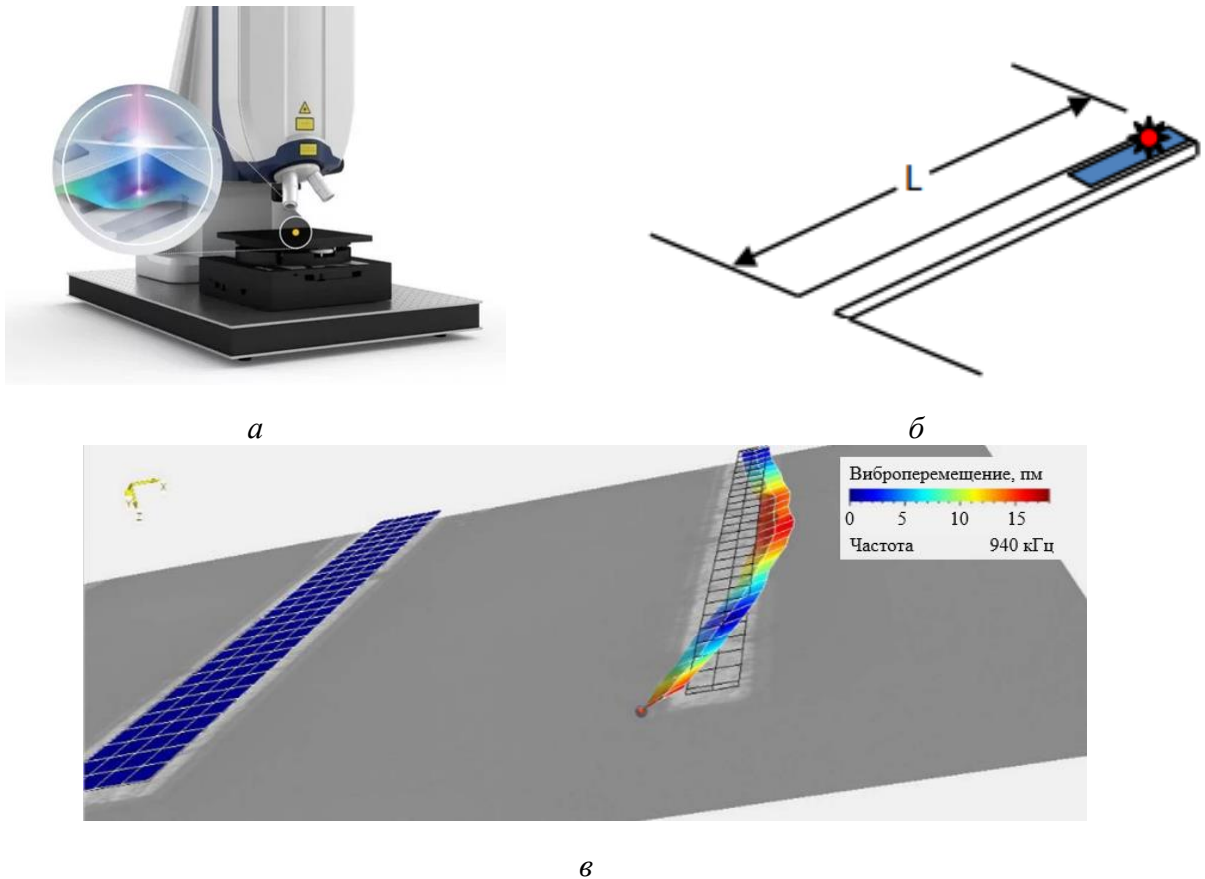
Результатами 3D профилометрии являются изображения поверхности контролируемых материалов с цветовой шкалой, отображающей геометрические размеры объектов исследования. Анализ полученных результатов позволяет оценивать качество изготовления материалов и изделий с требуемым допуском, а также определить производственные дефекты при их наличии.



a – вибросканирование в вертикальном направлении, *б* – вибросканирование объекта с большой площадью поверхности, *в* – вибросканирование с высоким разрешением

Рисунок 1.4 – Примеры профилированных виброграмм, полученных при сканировании различных объектов

Сочетание лазерной виброметрии с микросистемными анализаторами (Micro System Analyzers – MSA) в свою очередь позволяет определить динамические характеристики исследуемых объектов с возможностью визуализации вибрационного отклика по трем компонентам колебаний (x, y, z) декартовой системы координат. В качестве примера бесконтактной оптической 3D профилометрии можно отдельно упомянуть модель MSA-650 IRIS, которая позволяет проводить виброизмерения без непосредственного доступа к объекту контроля через силиконовый слой, что важно при исследовании инерционных датчиков, микроэлектромеханических устройств (МЭМС, Micro-ElectroMechanical Systems – MEMS), микрофонов, датчиков давления и т. д. (рисунок 1.5.)



a – бесконтактный оптический 3D профилометр MSA-650 IRIS, *б* – геометрия кантилевера, *в* – виброграмма, отображающая высшую резонансную моду колебаний кантилевера на частоте 940 кГц

Рисунок 1.5 – Применение бесконтактной оптической 3D профилометрии для анализа микроэлектромеханических устройств с резонансными кантилеверами

На рисунке 1.5 приведен пример использования бесконтактной оптической 3D профилометрии для анализа МЭМС-устройств с резонансными кантилеверами [155], размеры которых составляют $L = 0,5$ мм и 90 мкм в ширину, что соответствует разрешению виброграммы 8×21 мкм. Измеренное значение амплитуды виброперемещения по координате z составило 15 мкм, по координате x – 0,54 мкм, по координате y – 0,93 мкм соответственно. Измерение колебаний проводили в трех взаимно перпендикулярных направлениях (xuz), причем на первом измерительном канале виброметра сбор данных осуществляли только в направлении z (вне плоскости объекта), а на двух других измерительных каналах – с привязкой к основному каналу в плоскости (x, z) и плоскости (y, z) соответственно. При измерении скорости движения объекта по второму и третьему каналам к оси z устанавливался фиксированный угол φ , что позволило обеспечить одинаковую

чувствительность в обоих направлениях. Это приводит к уменьшению диаметра лазерного луча до менее чем 3,5 мкм. Приведенные результаты фактически демонстрируют границы применимости трехкомпонентной лазерной виброметрии, так как путем высокоточного регулирования максимально близкого взаимного расположения трех лазерных лучей с использованием видеомикроскопии было достигнуто пространственное разрешение от микронного до пикомикронного уровня.

1.2.4. Лазерное 3D вибросканирование с использованием ИК-термографии, роботизированных и многолучевых систем

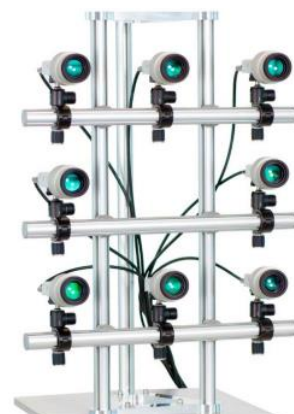
Помимо микроскопического оборудования, в недавнее время возможности лазерной виброметрии были расширены путем внедрения ИК-детекторов с целью минимизации влияния отражающей способности поверхности контролируемого материала на результаты виброизмерений. Указанная технология имеет особо важное значение при испытаниях темных, биологических и движущихся объектов.

На примере трехкомпонентного инфракрасного сканирующего лазерного доплеровского виброметра (Polytec PSV-500-3D XTRA) показаны преимущества использования ИК-детекторов для повышения точности лазерного вибросканирования. В частности, на длине волны инфракрасного излучения имеет место оптимальная отражательная способность для большинства поверхностей, что позволяет повысить эффективность неразрушающих испытаний темных материалов, таких как углепластиковые и углерод-углеродные материалы [156–158]. Важно также отметить, что для некоторых производственных приложений недавно были предложены роботизированная (рисунок 1.6, *а*) и многолучевая (рисунок 1.6, *б*) системы, позволяющие автоматизировать и ускорить процедуру неразрушающих испытаний. Применение указанных устройств в промышленности, по мнению авторов статьи [156], позволит снизить производственные затраты. Как показали результаты научных исследований [142], использование шестилучевой системы лазерной виброметрии позволяет одновременно

регистрировать распространение упругой волны, оценивать направление ее движения и фазовую скорость, что расширяет возможности сканирующей лазерной виброметрии. Среди недостатков таких систем следует отметить громоздкость и крупные габариты оборудования.



а



б

а – испытательный стенд на основе комбинирования трехкомпонентного лазерного виброметра PSV-500 и промышленного робота KUKA, б – многолучевой виброметр MPV-800

Рисунок 1.6 – Роботизированная и многолучевая лазерная виброметрия

1.2.5. Линейная и нелинейная лазерная виброметрия

При проведении неразрушающих испытаний ПКМ и поиска локальных дефектов особое внимание уделяется исследованиям линейных и нелинейных волновых процессов, возникающих при распространении упругих волн в твердых телах, а также их взаимодействию с дефектами [159–162]. Ввиду наличия нелинейных явлений, связанных с генерацией звука, микроскопических нелинейных эффектов и нелинейностей среды, взаимодействие распространяющихся в материале волн приводит к появлению ряда физических явлений [28, 163, 164].

Классификация виброметрии на линейную и нелинейную определяется типом передаточной функции системы (в случае УЗ стимуляции – синусоидальной упругой волны). Под системой подразумевается материал или изделие, воспринимающее сигнал возбуждения (входной сигнал) и генерирующее на входной сигнал отклик (выходной сигнал). Систему называют линейной, если

выполняются два необходимых условия: 1) выходной сигнал системы пропорционален ее входному сигналу; 2) выходной сигнал не содержит частот, отсутствовавших во входном сигнале. Если хотя бы одно условие нарушено, система является нелинейной. Линейная и нелинейная лазерная виброметрия являются специфическими инструментами, обеспечивающими оптимальную чувствительность и эффективность при анализе структурных повреждений [164].

Нелинейная лазерная виброметрия основана на применении нелинейной акустики. В случае классической нелинейности при распространении монохроматической волны конечной амплитуды вдоль нелинейного материала происходит волновое искажение ввиду различных механизмов диссипации (из-за вязкости, теплопроводности, релаксации). Возникающие нелинейности приводят к образованию высших гармоник (ультрагармоник) основной частоты волны, искажая исходную монохроматическую волну в пространстве и времени. Нелинейности исследуемого объекта описываются соответствующими параметрами, которые, в свою очередь, позволяют охарактеризовать материал и наличие дефектов в нем [165, 166].

Немецкие исследователи рассмотрели нелинейные явления, возникающие при ультразвуковой стимуляции гомогенных полимеров [35], металлов [167] и слоистых ПКМ [168–170]. В некоторых работах отмечено, что в случае, когда частота возбуждения близка к собственной частоте дефекта, наблюдается явление резонанса дефекта [167, 168]. Тогда вибрации в дефектной зоне значительно усиливаются, активируя поврежденные области и выделяя их на общем фоне в процессе лазерного вибро сканирования объекта на данной частоте. Если частота возбуждения кратно меньше частоты основного резонанса дефекта, в амплитудно-частотном спектре появляются нелинейные резонансные субгармоники [7, 35].

В случае наличия в зоне дефекта нескольких характерных резонансных частот производят преобразование пар частот путем сложения. Все нелинейные частоты при этом выборочно указывают на нелинейные особенности материала и тем самым позволяют определить дефектные зоны и их структуры [169]. Также следует отметить, что неотъемлемой частью метода является применение

процедуры расчета конечных элементов в сочетании с модальным анализом для более подробной оценки качества материалов и конструкций [170, 171].

1.2.6. Лазерная виброметрия при бесконтактной ультразвуковой стимуляции

Бесконтактная стимуляция материалов на основе бесконтактных пьезопреобразователей (воздушно-связанных, air-coupled) уже более 30 лет является одним из приоритетных направлений научных исследований в области ультразвуковых методов НК и дефектоскопии ПКМ [172]. Одним из главных ограничений метода бесконтактной стимуляции является резкое несоответствие акустического импеданса между твердыми телами и воздухом, а также значительное затухание высокочастотных акустических сигналов в воздушной среде. Для различных приложений НК, в основном, используют три способа бесконтактной передачи ультразвука: с использованием лазеров [173, 174], электромагнитных акустических преобразователей [175], воздушно-связанных пьезоэлектрических преобразователей [176, 177]. Важно отметить, что электромагнитные акустические преобразователи могут быть применены только к проводящим ферромагнитным материалам и работают в диапазоне частот до нескольких МГц. При лазерном возбуждении используются широкополосные (в диапазоне частот до ГГц) ультразвуковые импульсы, полоса пропускания которых ограничена длительностью лазерного импульса, пространственными характеристиками профиля лазерного луча и оптической глубиной проникновения. Лазерное возбуждение ультразвуковых волн имеет несколько механизмов и в целом представляет собой сложную задачу, зависящую от параметров лазерного излучения, оптических, тепловых и механических свойств среды, а также заданных граничных условий [173]. Глубокий обзор процесса лазерного возбуждения выходит за рамки настоящего исследования, но наиболее важные научные работы, касающиеся термоупругого режима, представлены в [173, 178], тогда как процесс возбуждения в абляционном режиме рассмотрен в [175, 179]. Наиболее широко используемым типом излучателей для бесконтактного НК являются воздушно-

связанные пьезоэлектрические преобразователи. Они отличаются простотой использования и инженерного исполнения, имеют рабочий диапазон частот от 50 кГц до 1 МГц, что достаточно для проведения НК ПКМ.

Проведение ультразвукового НК бесконтактным способом, за счет существенного затухания звука в воздушной среде, требует специальных режимов ввода ультразвука и оптимизации конфигурации излучателей и волноводов для эффективной передачи сигнала. Исходя из этого, разработчики воздушно-связанных излучателей для бесконтактной передачи ультразвука постоянно совершенствуют существующие технологии изготовления материалов, конструкцию излучателей и конфигурацию используемых волноводов [180–184], а также исследуют различные режимы наклонной передачи ультразвука через воздушную среду.

Классический сквозной или нормальный режим передачи ультразвука основан на преобразовании ультразвуковых волн, передаваемых от бесконтактного излучателя, в продольные акустические волны, которые распространяются через объем материала и взаимодействуют с дефектами. Для более эффективного преобразования акустической энергии используют режимы передачи ультразвука под наклоном, позволяющие преобразовывать вводимый сигнал в поверхностные акустические волны (волны Лэмба), достаточно чувствительные к подповерхностным дефектам типа трещин и расслоений. Это позволяет оценить физические свойства материалов, такие как толщина, жесткость, анизотропия [174–177]. Взаимодействие поверхностных акустических волн с тонким жидким или твердым слоем материала также позволяет оценить упругие свойства пленок и покрытий, например, проанализировать высыхание красок [185, 186].

Поверхностные волны Рэлея в свою очередь распространяются в тонком (толщиной около одной длины волны) поверхностном слое твердых тел, что позволяет оценить упругие свойства и наличие дефектов в материалах. Поскольку волны Рэлея не подвержены дисперсии в однородных полубесконечных твердых телах, любое изменение фазовой скорости в зависимости от частоты является признаком либо неоднородности (поверхностное упрочнение, пористость и т. д.),

либо нарушения условия соотношения длины волны и толщины изделия (например, в случае подповерхностных пустот и расслоений).

Выводы по главе 1

На основе изложенных в литературном обзоре данных можно сделать заключение о том, что в настоящее время актуальной является разработка проблемно-ориентированного метода неразрушающих испытаний современных конструкционных испытаний, позволяющего направленно воздействовать на структурные неоднородности с учетом их физических свойств. Одним из перспективных направлений в данной области является использование лазерной виброметрии совместно с акустической стимуляцией материалов, изучение физических феноменов, возникающих в дефектах при их резонансной стимуляции. Важно отметить, что особое внимание следует уделить вопросу разработки воздушно-связанных излучателей для бесконтактной стимуляции и спектроскопического анализа дефектов в тонких, хрупких и гидрофильных материалах, контроль качества которых отличается особой сложностью. В данном случае использование сканирующих лазерных устройств позволит как определять физические свойства исследуемых материалов, так и проводить их неразрушающие испытания бесконтактным способом.

Глава 2. Разработка метода сканирующей лазерной виброметрии при резонансной стимуляции дефектов в полимерных композиционных материалах

Классический метод ультразвуковой (УЗ) инфракрасной (ИК) термографии с использованием мощной УЗ стимуляции хорошо зарекомендовал себя при обнаружении поверхностных и подповерхностных трещин, расслоений, непрочных включений, ударных повреждений и других дефектов в металлах, полимерах и композитах [187]. Преимуществами метода являются его избирательный характер и высокая производительность испытаний, в то время как основной недостаток заключается в возможности повреждения контролируемого материала в зоне ввода мощного ультразвука, в особенности если речь идет о магнитострикционных устройствах. Тем не менее, в УЗ ИК термографии часто применяют мощные пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), заимствованные из аппаратуры для УЗ сварки. Пьезоактивные компоненты ПЭП преобразуют электрические колебания в механические и затем передают сигнал пассивным резонансным элементам системы для дальнейшего усиления амплитуды до необходимого уровня и согласования акустической системы генератор–пьезопреобразователь с нагрузкой. Резонансные ПЭП имеют узкую полосу рабочих частот с небольшими отклонениями от основного значения, поэтому применение ПЭП для исследования материалов в широком диапазоне частот невозможно [188]. Конструкция резонансного ПЭП позволяет достигать высокого уровня акустической мощности на излучателе при работе на резонансной частоте и ее гармониках, благодаря чему обеспечивается необходимый уровень температурного отклика в области дефектов, достаточный для их идентификации. Таким образом, информативность и экспрессный характер указанного метода неразрушающего контроля (НК) обеспечивается сравнительно высокой мощностью вводимого ультразвука.

Применение резонансных преобразователей в УЗ ИК термографии ограничено их специфической спектральной характеристикой, в связи с чем

вводимые в контролируемый материал акустическая энергия и эффективность теплогенерации в дефектных зонах зависят от соответствия частоты подаваемого на излучатель акустического сигнала частоте резонанса излучателя. В то же время исследования феномена локального резонанса дефектов (local defect resonance – LDR) показали, что мощность теплогенерации в дефектах зависит не только от мощности вводимого акустического сигнала, но и от соответствия частоты стимулирующих акустических волн и частоты локального резонанса дефектов в материалах [53, 189]. Отсюда следует, что для эффективного обнаружения дефектов в исследуемых материалах необходимо предварительно определить частоту их резонанса.

Настоящий раздел диссертационного исследования посвящен разработке комплексного метода контроля качества путем оценки тепло-, механико-физических свойств композиционных материалов за счет интерпретации данных, полученных в процессе сканирующей лазерной виброметрии при резонансной стимуляции дефектов и инфракрасной термографии. Процедура проведения контроля качества методом резонансной УЗ вибротермографии осуществляется путем совместного использования широкополосной акустической стимуляции материалов, вибросканирования исследуемой поверхности с помощью лазерного вибromетра, спектроскопического анализа амплитудно-частотных спектров колебаний с целью определения резонансных частот дефектов, а также регистрации температурного отклика на поверхности объектов исследования с использованием ИК термографии.

Понятие резонанса дефекта основано на том, что дефектные включения приводят к локальному изменению жесткости материала, проявляющемуся на характерной частоте. В данной главе приводятся три подхода к определению частоты резонанса дефекта:

- аппаратная база сканирующей лазерной виброметрии для резонансной стимуляции дефектов при проведении контроля качества;
- теоретический расчет;
- программное моделирование.

2.1. Сканирующая лазерная доплеровская виброметрия при резонансной стимуляции дефектов

Метод лазерной виброметрии при резонансной стимуляции основан на исследовании резонансных частот дефектных областей твердых тел посредством регистрации вибраций контролируемой поверхности материала в широком диапазоне частот [53, 82, 189]. УЗ стимуляцию объектов исследования целесообразно осуществлять акустическими сигналами различных форм, модулированными в диапазоне частот от 50 Гц до 200 кГц, что обусловлено необходимостью обеспечить совпадение частоты резонанса дефекта с частотой стимулирующих акустических волн, а также исключить возникновение стоячих волн, препятствующих обнаружению дефектов. Для экспериментального определения резонансных частот дефектов измеряют индивидуальный вклад частотного отклика каждой точки сканирования образца в широком спектре частот. Затем в полученном амплитудно-частотном спектре колебаний объекта исследования проверяют происхождение каждого максимума амплитуды сигнала с целью определить частоты резонанса дефекта при его наличии. Для этого УЗ стимуляцию проводят с использованием широкополосных пьезоэлектрических преобразователей совместно с лазерным вибросканированием поверхности исследуемого материала.

Благодаря совпадению частоты стимулирующих акустических волн с частотой резонанса дефекта в области неоднородностей наблюдается локальное увеличение амплитуды колебаний вследствие направленной механической стимуляции дефектной зоны. Это также сопровождается выделением тепла в зоне дефекта за счет механизмов внутреннего трения, что может быть зарегистрировано с использованием тепловизионного оборудования. Использование явления локального резонанса дефекта в свою очередь позволяет повысить энергоэффективность указанного метода за счет снижения уровня акустической мощности (до нескольких мВт), необходимой для активации дефектов в сравнении с «традиционной» УЗ термографией на основе мощных контактных ПЭП

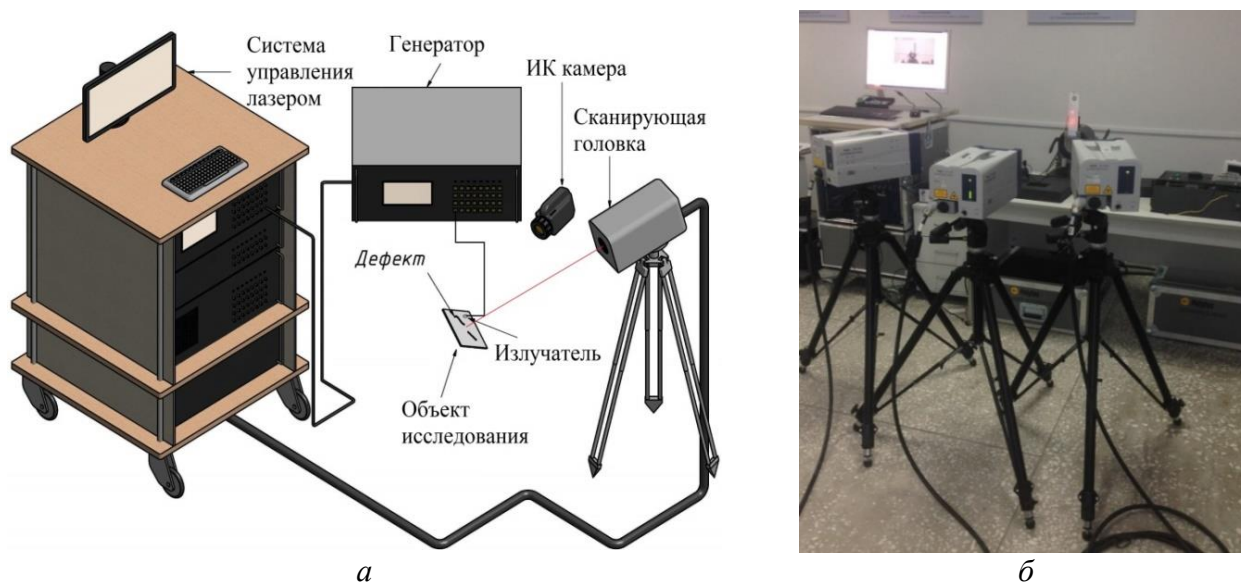
и магнитострикционных преобразователей. Помимо этого, резонансная ультразвуковая вибротермография обеспечивает возможность спектроскопического исследования вибрационных характеристик материалов и дефектных включений в них.

Экспериментально и теоретически эффект локального резонанса дефекта был предложен и исследован сотрудниками Лаборатории неразрушающего контроля Штутгартского университета (Германия) при испытаниях тонких стандартных образцов в виде пластин полиметилметакрилата (ПММА), ослабленных круглыми отверстиями различных размеров. По результатам исследования сделано заключение о возможности применения предложенного подхода к определению качества материалов [6, 36].

В Лаборатории теплового контроля Томского политехнического университета (ТПУ) проведен ряд теоретических и экспериментальных исследований по определению резонанса дефектов в композиционных и полимерных материалах. В частности, был выполнен теоретический расчет основных частот дефектов в виде несквозных отверстий простой геометрической формы в тонких пластинах ПММА, проведено экспериментальное исследование дефектов указанного типа на практике, исследованы стеклопластиковые, углепластиковые и сотовые композиционные материалы с дефектами различного происхождения. Полученные результаты подтвердили ранее предложенную немецкими исследователями концепцию метода локального резонанса дефекта и внесли определенный вклад в теоретический анализ резонансных частот дефектов различной геометрии. Следует заметить, что часть исследований проведены автором совместно с ведущими учеными Солодовым И. Ю., Буссе Г., Рахамером М. в Институте полимерных технологий Штутгартского университета в рамках прохождения научной стажировки в течение 6 месяцев с марта по август 2014 года. Результаты совместных исследований опубликованы в рецензируемых научных изданиях [53, 82].

Способ экспериментального определения частоты резонанса дефектов заключается в регистрации скорости колебаний на поверхности исследуемых

материалов в широком спектре частот при широкополосной акустической стимуляции. Для этой цели используют широкополосные ПЭП, что позволяет исследовать механические свойства материалов и конструкций в широком диапазоне частот. Важно отметить, что подаваемый в нагрузку электрический сигнал может быть гармоническим, в форме меандра, модулированным по частоте и амплитуде, а также непрерывным (синусоидальным) или импульсным. Соответственно различают стационарный и импульсный режимы акустической стимуляции. Поставленная задача реализована путем лазерного вибросканирования (сканирующей лазерной виброметрии PSV-500-3D-HV фирмы «Polytec», Германия) поверхности контролируемого изделия при его широкополосной акустической стимуляции. Структурная схема и изображение лабораторной установки трехкомпонентной сканирующей лазерной виброметрии при резонансной УЗ стимуляции, а также тепловизионного оборудования для проведения вибротермографии, приведены на рисунке 2.1.

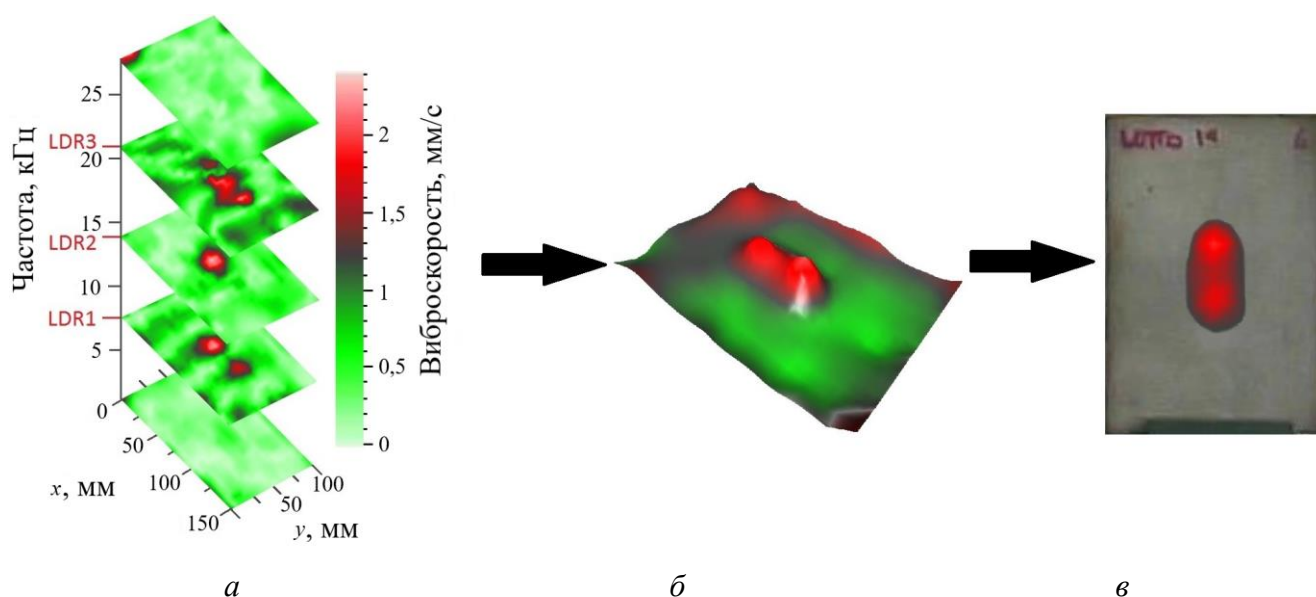


а – структурная схема установки, *б* – изображение установки

Рисунок 2.1 – Установка трехкомпонентной сканирующей лазерной виброметрии при резонансной ультразвуковой стимуляции

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 [71]: 1 – анализ амплитудно-частотного спектра колебаний на наличие резонансных пиков, 2 – анализ виброграмм на резонансных частотах, 3 – дефектометрия (рисунок 2.2).



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

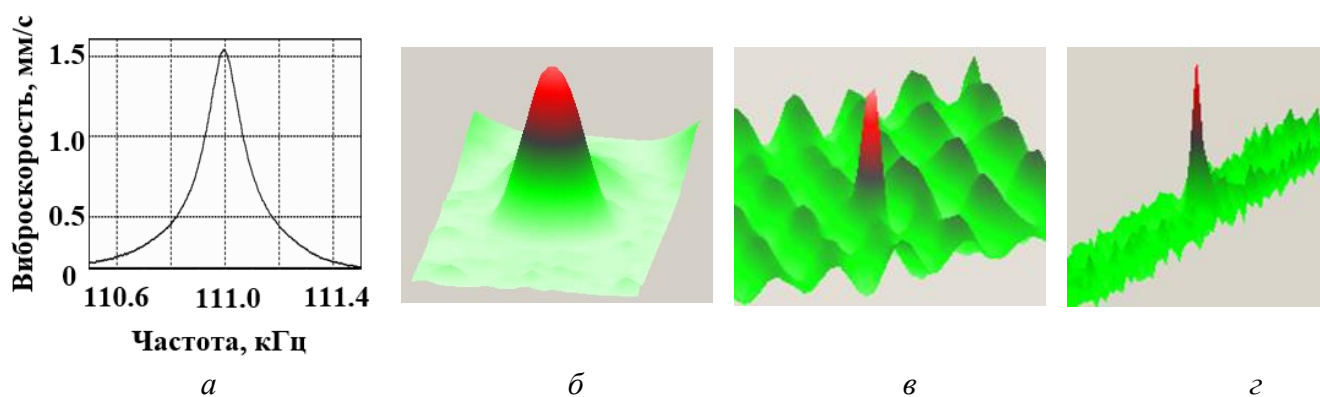
Рисунок 2.2 – Процедура спектроскопического анализа материалов и изделий с использованием сканирующей лазерной виброметрии

Результатом лазерного сканирования поверхности исследуемого объекта в режиме быстрого преобразования Фурье являются амплитудно-частотный спектр колебаний и виброграммы, отображающие распределение амплитуды и формы колебаний материала. Детальный анализ частотных характеристик позволяет оценить физические свойства исследуемых объектов и сделать заключение о наличии и характере повреждения их структуры с получением трехмерного изображения деформации поверхности материала и области дефекта. Использование тепловизионного оборудования позволяет регистрировать

распределение температуры на поверхности контролируемого изделия в режиме реального времени и получить дополнительную информацию о дефекте и физических свойствах материала.

С целью повышения достоверности дефектометрии, проводимой по результатам лазерного вибросканирования, разработано программное обеспечение Defect Finder (DeFinder), позволяющее анализировать получаемые виброграммы (в формате *.bmp) на основе заданного оператором отношения сигнал/шум. Подробное описание алгоритма работы и функционала программы приведено в Приложении А. Программа защищена свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020612786 от 03.03.2020 (приложение Б).

На рисунке 2.3 приведен пример анализа локального резонанса дефекта в различных материалах.



а – амплитудно-частотный спектр колебаний несквозного круглого отверстия в пластине полиметилметакрилата, *б* – виброграмма несквозного круглого отверстия в пластине полиметилметакрилата, *в* – виброграмма расслоения в углепластиковом композите на частоте 91,16 кГц, *г* – виброграмма ударного повреждения в пластине углепластика на частоте 110 кГц

Рисунок 2.3 – Анализ локального резонанса дефекта в различных материалах

В частности, на рисунке 2.3, *а* приведен частотно-избирательный отклик, отражающий резонансные колебания в пластине полиметилметакрилата с несквозным отверстием круглой формы. Соответствующая виброграмма колебаний, зарегистрированная в области несквозного отверстия, показана на рисунке 2.3, *б*. Локальное увеличение амплитуды колебаний на частоте 111 кГц (рисунок 2.3, *а*) наблюдается в центре отверстия и определяется как локальный резонанс дефекта

(рисунок 2.3, *а, б*). Аналогичная методика была успешно применена для определения резонансных частот дефектов в различных материалах и опубликована в работе [72]. Два примера определения резонанса дефектов, приведенные на рисунке 2.3, *в, г*, отображают локальное увеличение амплитуды колебаний в области расслоения пластины углепластикового композиционного материала (частота резонанса 91,16 кГц), а также в области ударного повреждения (частота резонанса 110 кГц).

2.2. Теоретические основы явления локального резонанса дефекта

2.2.1. Теоретический расчет

Наличие дефектов в структуре материалов, как было отмечено выше, приводит к локальному уменьшению жесткости и изменению их физических свойств. При этом происходит изменение резонансных характеристик всей системы и возникновение дополнительных участков, имеющих свои характерные резонансные свойства.

Теоретические исследования явления резонанса дефекта проводили на основе анализа резонансных частот дефектов изотропных материалов, представляющих собой несквозные отверстия круглой и прямоугольной формы (рисунки 2.4, 2.5). Предполагалось, что прямоугольные отверстия в данном случае будут представлять собой прототип дефекта в виде трещины при большом значении соотношения сторон прямоугольника.



Рисунок 2.4 – Общий вид пластины из полиметилметакрилата, ослабленной круглым и квадратным несквозными отверстиями (схематично)

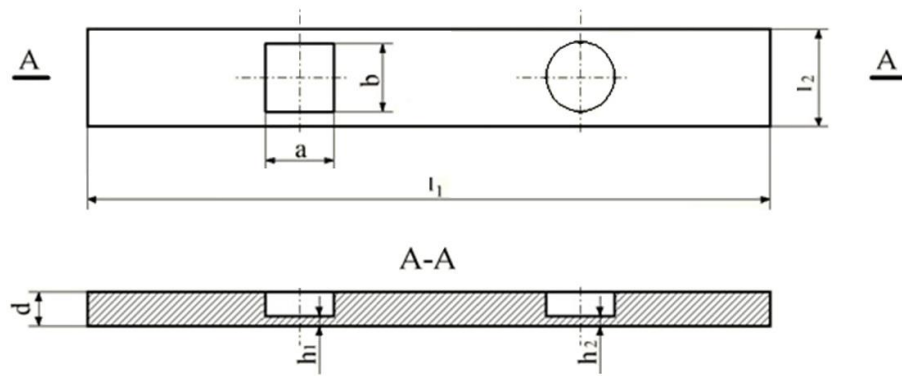


Рисунок 2.5 – Геометрия задачи

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

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

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{eff}}{M_{eff}}}. \quad (2.1)$$

В этом случае для вывода выражения K_{eff} и M_{eff} необходимо оценить потенциальную и кинетическую энергии вибрации дефекта. Приведенные ниже результаты расчетов описаны в кандидатской диссертации автора [190].

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

$$K_{eff} = \frac{192\pi D}{R^2}; M_{eff} = 1,8m, \quad (2.2)$$

где $D = \frac{E \times h^3}{12(1-\nu^2)}$ – это изгибная жесткость,

m – масса пластины в области дефекта,

E – модуль Юнга (модуль упругости),

ν – коэффициент Пуассона,

h – толщина пластины в области отверстия,

R – радиус отверстия.

Подставив (2.2) в выражение (2.1), получим выражение для определения линейной частоты резонанса пластины в области круглого отверстия [190]:

$$f_{0 \text{ круг}} = \frac{1,6h}{R^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}, \quad (2.3)$$

где ρ – плотность материала.

В случае прямоугольного отверстия выражение для определения основной линейной частоты колебаний пластины в области отверстия имеет вид [190]:

$$f_{0 \text{ прямоугольн}} = \frac{1}{3a^2b^2} \sqrt{\frac{Eh^2(3a^4+3b^4+2a^2b^2)}{3\rho(1-\nu^2)}}, \quad (2.4)$$

где a, b – длины сторон прямоугольного отверстия.

Для квадратного отверстия (при соотношении сторон $a = b$) формула для определения основной частоты резонанса принимает вид [190]:

$$f_{0 \text{ квадратн}} = \frac{2}{3a^2} \sqrt{\frac{2Eh^2}{3\rho(1-\nu^2)}}. \quad (2.5)$$

Представленные подходы являются упрощенными, однако позволяют уточнить физическую природу явления резонанса дефекта. Выражение (2.4), полученное выше, применимо к оценке основных резонансных частот дефектов, таких как несквозные отверстия простой геометрической формы, а также ламинарные дефекты листового проката металлов и расслоения в композитах [191, 192]. Проблема практического использования аналитического подхода связана с граничными условиями закрепления краев дефекта, которые приняты зажатými при выводе уравнения (2.4), а также сложностью определения основной частоты резонанса многокомпонентных дефектов. Результаты теоретического расчета основной частоты резонанса дефектов могут не совпадать с экспериментальными величинами вследствие принятия следующих упрощений: неоднородности шероховатости поверхности дна отверстия и его толщины в этой области, а также скругления углов отверстий в процессе их фрезеровки, возникших при изготовлении тестовых образцов. Также следует отметить ограниченность вышеприведенного подхода для расчета основной частоты резонанса глубоко залегающих дефектов.

2.2.2. Конечно-элементное моделирование

Создание математической модели материалов и изделий позволяет изучить поведение реальных объектов при различных условиях внешнего воздействия и возникающих процессов с возможностью прогнозирования динамики изменения свойств объекта. В связи с этим, построение конечно-элементной модели дефектов в виде сквозных отверстий простой геометрической формы, имитирующей свойства реальной системы, целесообразно для подтверждения теоретических основ явления локального резонанса дефекта, а также минимизации объема натурных испытаний типовых дефектов.

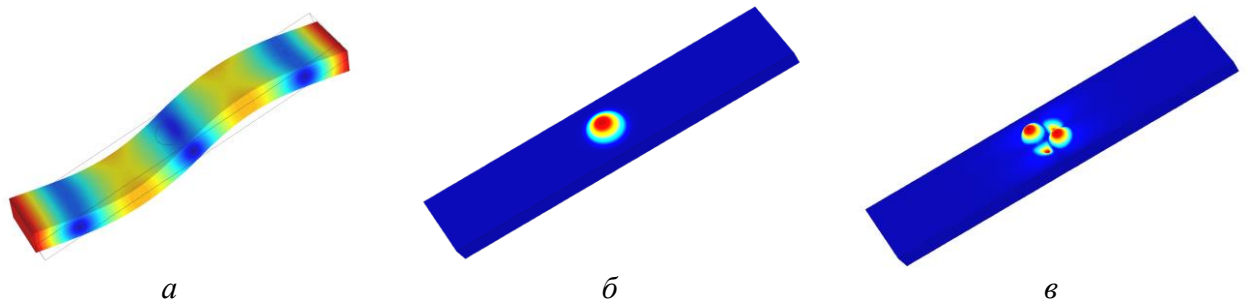
В настоящей работе моделирование дефектов простой геометрической формы было выполнено с помощью программного обеспечения Comsol Multiphysics («Structural dynamics», «Eigen frequency analysis»). Модель выполнена объемными элементами типа Solid с учетом геометрии и физических свойств исследуемых материалов.

В ходе исследования построены две модели пластин ПММА, ослабленных сквозными отверстиями круглой и квадратной формы. На первом этапе исследования внешнее воздействие на пластину не учитывалось, включая входное механическое воздействие от ПЭП с целью определения собственных частот и форм колебаний пластин.

Рассмотрим результаты моделирования пластины с сквозным отверстием круглой формы. Размеры пластины – $200 \times 60 \times 3$ мм³, размеры круглого сквозного отверстия: радиус 10 мм, толщина пластины в области отверстия $h = 1$ мм.

В результате компьютерного моделирования определены резонансные частоты пластины и построены соответствующие распределения механических колебаний. Результаты моделирования были использованы для верификации математической модели путем сопоставления с экспериментальными данными (f_{exp}), полученными в результате лазерного вибросканирования, а также теоретического расчета ($f_{0 \text{ theory}}$). При использовании метода анализа собственных частот были рассчитаны все возможные значения резонансных колебаний в пластине ПММА (длина пластины $l_1 = 200$ мм, ширина $l_2 = 60$ мм, толщина

$d = 3$ мм) с круглым сквозным отверстием. Количество резонансных частот, рассчитываемых в диапазоне от 0 до 200 кГц, составило не более 15. На рисунке 2.6, *а* приведено изображение второй изгибной моды собственных колебаний пластины, определенное на частоте 1,5 кГц. На более высоких частотах были обнаружены резонансные колебания в области сквозного отверстия круглой формы. В частности, основная частота резонанса в области отверстия составила 7750 Гц (рисунок 2.6, *б*), в то время как резонансные колебания более высокого порядка наблюдались на частоте 16,2 кГц (рисунок 2.6, *в*).



а – изгибные колебания пластины на частоте собственного резонанса (1,5 кГц), *б* – колебания на частоте основного резонанса (7,75 кГц) пластины в области сквозного отверстия, *в* – резонансные колебания высшего порядка на частоте 16,2 кГц в области сквозного отверстия пластины

Рисунок 2.6 – Результаты моделирования собственных колебаний пластины из полиметилметакрилата и локального участка, ослабленного сквозным круглым отверстием

Выполним теоретический расчет частоты резонанса в области сквозного отверстия круглой формы с использованием выражения (2.3). В соответствии с данными, приведенными в источнике [193], модуль Юнга ПММА равен $2,6 \times 10^9$ Па, среднее значение коэффициента Пуассона составляет $\nu = 0,375$, плотность $\rho = 1100 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Используя выражение (2.5), определим расчетную величину резонансной частоты пластины в области сквозного отверстия круглой формы:

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

В ходе проведения лазерного вибросканирования пластины ПММА с использованием установки, показанной на рисунке 2.1, экспериментальным

путем определена частота резонанса пластины в области отверстия $f_{0\text{exp.}} = 7688$ Гц (рисунок 2.7).

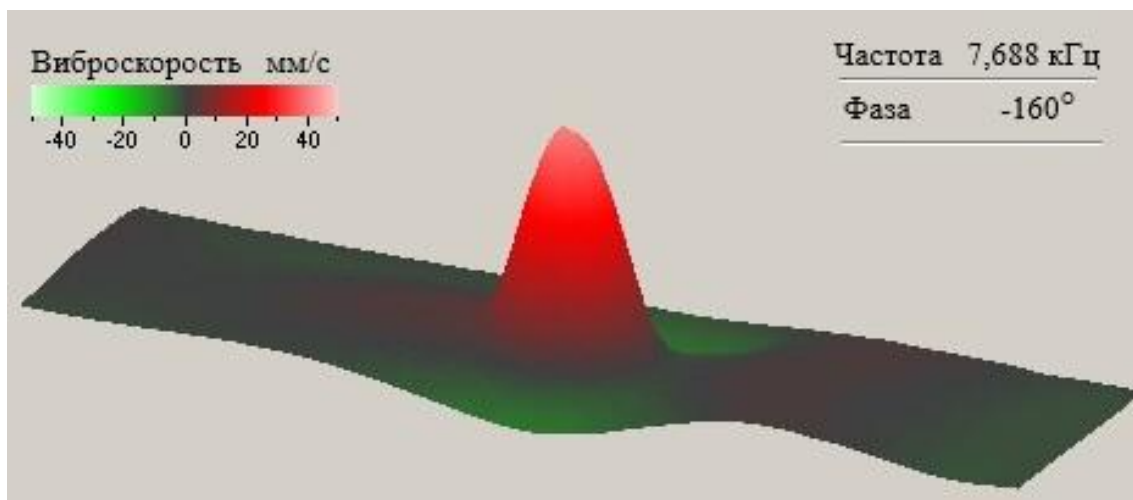
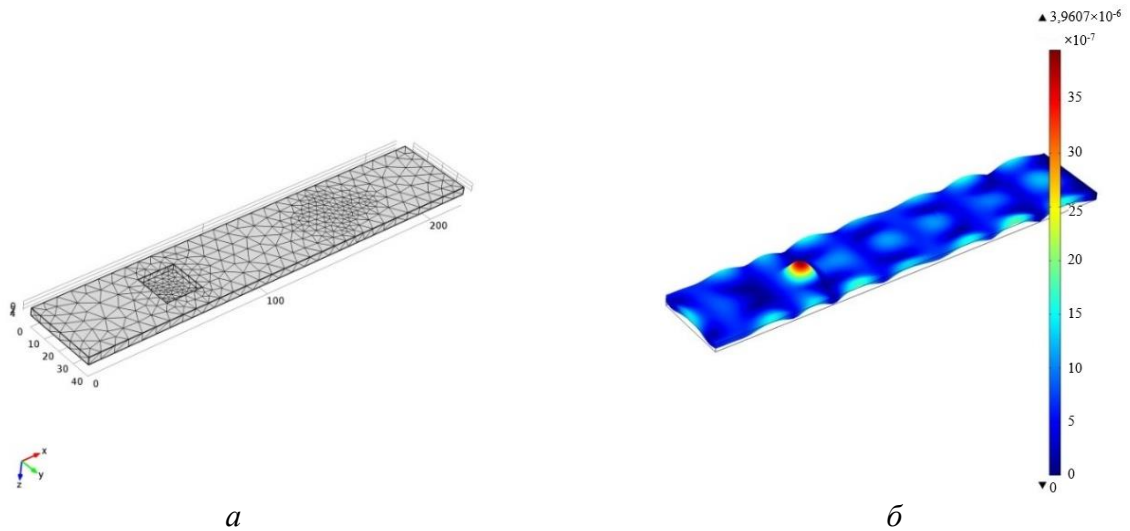


Рисунок 2.7 – Виброграмма пластины из полиметилметакрилата, отражающая резонансные колебания в области сквозного круглого отверстия на частоте 7688 Гц

Основная частота резонанса сквозного отверстия, определенная экспериментально, отличается не более чем на 1 % (относительная погрешность) от соответствующих значений, полученных теоретически и в ходе конечно-элементного моделирования. Хорошая корреляция между теоретическими расчетами, экспериментальными данными и результатами программного моделирования свидетельствует о высокой точности произведенных расчетов.

Далее рассмотрим результаты моделирования пластины с сквозным отверстием квадратной формы. Размеры пластины составили $214 \times 60 \times 4$ мм³, стороны квадратного отверстия $a = b = 20$ мм, толщина пластины в области отверстия $h = 1,2$ мм (рисунок 2.8, а).

В результате компьютерного моделирования собственных частот колебаний пластины ПММА, ослабленной сквозным отверстием квадратной формы, была определена основная частота резонанса пластины в области отверстия ($f_{0\text{Р.ПММА1 Comsol}} = 8,255$ кГц) и построено соответствующее изображение деформации пластины ПММА (рисунок 2.8, б).



a – общий вид пластины полиметилметакрилата, ослабленной несквозным квадратным отверстием, *б* – результаты расчета основной резонансной частоты (8,255 кГц) в области несквозного отверстия

Рисунок 2.8 – Конечно-элементное моделирование резонансных колебаний пластины полиметилметакрилата в области несквозного отверстия, выполненное в программном обеспечении Comsol MultiPhysics

Воспользовавшись выражением (2.5) для расчета частоты резонанса пластины в области квадратного отверстия, с учетом геометрии отверстия и физических характеристик материала, получим: $f_{0 R.ПММА1 теор} = 8,508$ кГц.

Резонансная частота колебаний пластины ПММА в области несквозного отверстия квадратной формы, определенная экспериментально в результате лазерного вибросканирования, составила $f_{0 R.ПММА1 практич} = 8,563$ кГц (рисунок 2.9).

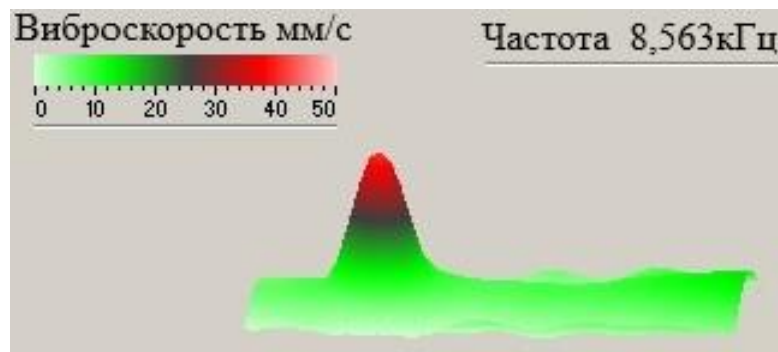


Рисунок 2.9 – Виброграмма пластины полиметилметакрилата, отражающая резонансные колебания пластины в области несквозного отверстия квадратной формы на частоте 8563 Гц

Результаты экспериментальных исследований резонансной частоты колебаний пластины в области квадратного отверстия совпадают с теоретическими расчетами и результатами моделирования с относительной погрешностью менее 1 %.

2.3. Теплогенерация в процессе резонансной стимуляции дефектов

2.3.1. Тепловыделение в области дефекта на частоте основного резонанса

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 [187]:

$$\sigma = E(\varepsilon + r_\sigma \dot{\varepsilon}); \quad \tau = G(\gamma + r_\tau \dot{\gamma}), \quad (2.6)$$

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:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t; \sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \varphi). \quad (2.7)$$

Соотношения (2.6) графически изображаются петлей гистерезиса, которая ориентирована относительно прямой линии, описывающей закон Гука. Таким образом, силы трения «рассеивают» работу, пропорциональную площади эллипса ($S_{\text{эл}}$), которая находится интегрированием:

$$S_{\text{эл}} = 2 \int_{-\varepsilon_0}^{\varepsilon_0} \sigma d\varepsilon. \quad (2.8)$$

Площадь такого эллипса находится как [188]:

$$S_{\text{эл}} = \pi \varepsilon_0^2 E \eta. \quad (2.9)$$

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

$$P_{\text{тепл}} = \frac{\Delta W}{\Delta t}, \quad (2.10)$$

где ΔW – потери энергии за один цикл,

Δt – время одного цикла колебаний.

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

Таким образом, мощность, затраченная на образование тепла в единице объема, определяется как:

$$P_{\text{тепл}} = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \Delta W \times f = \frac{\pi \varepsilon_0^2 E \eta \omega}{2\pi} = \frac{\varepsilon_0^2 E \eta \omega}{2}, \quad (2.11)$$

где ε_0 – амплитуда деформаций пластины,

E – модуль Юнга,

η – коэффициент Пуассона.

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

$$P_{\text{тепл}} = \frac{\varepsilon_0^2 E \eta \omega}{2} \times V. \quad (2.12)$$

Исходя из выражения (2.12), генерируемая тепловая мощность пропорциональна частоте (ω) и квадрату амплитуды деформаций (ε_0) пластины, возникающих в результате колебаний. Поэтому использование явления локального

резонанса дефекта, основанного 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:

$$Q = c_n m \Delta T, \quad (2.13)$$

где c_n – теплоемкость материала,

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

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

$$P_{\text{тепл}} = \frac{Q}{t} = \frac{c_n \times m \times \Delta T}{t} = \frac{c_n \times \rho \times V \times \Delta T}{t}. \quad (2.14)$$

Приравняв выражение (2.12) к выражению (2.14), получаем:

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

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

$$\Delta T = \frac{\epsilon_0^2 \times E \eta \times \omega \times t}{2 c_n \times \rho}. \quad (2.15)$$

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

Колебания пластины нелинейно зависят от величины прогиба пластинки (Z) в зоне несквозного отверстия [192]:

$$\epsilon_0 = \frac{d}{2} \times \frac{d^2 Z}{dx^2}, \quad (2.16)$$

где d – толщина пластинки в зоне дефекта.

Распределение прогиба пластинки в области квадратного отверстия при динамическом возбуждении, для основного резонанса, при собственных колебаниях пластины [186]:

$$Z = Z_m \times \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a}\right) \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right), \quad (2.17)$$

где Z_m – максимальное смещение центральной частицы пластинки из положения равновесия во время ее колебательного движения, вызванного возбуждением частиц среды (амплитуда колебаний в центре пластинки);

a, b – длины сторон прямоугольной пластинки.

Рассмотрим распределение колебаний пластины относительно оси x :

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

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

Максимальное значение деформации пластины ϵ_0 в центре дефекта:

$$\epsilon_0 = \frac{d}{2} \times \frac{d^2 Z}{dx^2} = \frac{d}{2} \times Z_0 \times \frac{4\pi^2}{a^2} \cos \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right). \quad (2.18)$$

Скорость ультразвуковой волны в зоне дефекта:

$$V_{LDR} = \omega \times Z_m, \quad (2.19)$$

где Z_m – максимальное смещение частиц среды относительно положения равновесия.

Тогда выражение для определения максимального смещения будет иметь вид:

$$Z_m = \frac{V_{LDR}}{\omega} = \frac{V_{LDR}}{2\pi f}, \quad (2.20)$$

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

Подставив Z_m в выражение для расчета деформации пластины ϵ_0 (2.18), получим:

$$\epsilon_0 = \frac{d}{2} \times \frac{V_{LDR}}{2\pi f} \times \frac{4\pi^2}{a^2} \cos \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right). \quad (2.21)$$

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

$$K_{LDR} = \frac{V_{LDR}}{V_{input}}. \quad (2.22)$$

Тогда амплитуда виброскорости частиц среды в области дефекта определяется как:

$$V_{LDR} = K_{LDR} \times V_{input}. \quad (2.23)$$

Подставив выражение (2.23) в формулу для расчета деформации пластины (2.18), получаем:

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

Возведем последнюю функцию в квадрат:

$$\varepsilon_0^2 = \frac{d^2 K_{LDR}^2 \times V_{input}^2 \times \pi^2}{f^2 \times a^4} \times \cos^2 \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right)^2. \quad (2.24)$$

Выражение для определения акустической мощности, переносимой звуковой волной через поперечную площадку (S), расположенную перпендикулярно направлению распространения звука, имеет вид:

$$P_{ак} = \frac{\rho \times V_{input}^2 \times c \times S}{2}, \quad (2.25)$$

где ρ – плотность материала,

V_{input} – амплитуда виброскорости колебания частиц среды в бездефектной зоне,

c – скорость распространения акустической волны,

S – площадь поперечного сечения, расположенного перпендикулярно направлению распространения волны.

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

$$V_{input}^2 = P_{ак} \frac{2}{\rho \times c \times S}. \quad (2.26)$$

Подставив полученное выражение в формулу (2.24), получим:

$$\varepsilon_0^2 = \frac{2d^2 K_{LDR}^2 \times P_{ак} \times \pi^2}{f^2 \times a^4 \times \rho \times c \times S} \times \cos^2 \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right)^2. \quad (2.27)$$

Подставив выражение (2.27) в формулу для нахождения изменения температурного сигнала (2.15), получим:

$$\Delta T = \frac{2E \times \eta \times t \times d^2 \times K_{LDR}^2 \times P_{ак} \times \pi^3}{f \times c_n \times a^4 \times \rho^2 \times c \times S} \times \cos^2 \frac{2\pi x}{a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi y}{b}\right)^2. \quad (2.28)$$

Для определения температурного отклика дефекта воспользуемся выражением (2.15), полученным выше:

$$\Delta T_{R.ЛММА1} = \frac{2 \times 3 \times 10^9 \text{ Па} \times (0.02 \div 0.04) \times 1.44 \times 10^{-6} \text{ м}^2 \times \frac{40.93 \times 10^{-3} \text{ мм} \setminus \text{с}}{11.37 \times 10^{-3} \text{ мм} \setminus \text{с}} \times 17.9 \times 10^{-3} \text{ Вт} \times 30.96}{1500 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \times \text{К}} \times 121 \times 10^4 \text{ кг}^2 \setminus \text{м}^6 \times 8.56 \times 10^3 \text{ Гц} \times 16 \times 10^{-8} \text{ м}^4 \times 222.6 \text{ м} \setminus \text{с} \times 1.24 \times 10^{-4} \text{ м}^2} \times \cos^2 \frac{2\pi a}{2a} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi b}{2b}\right)^2;$$

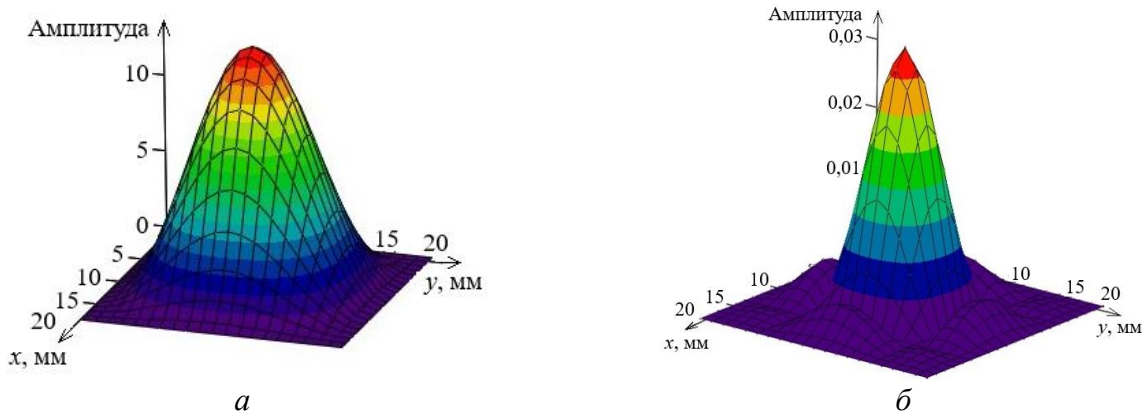
$$\Delta T_{R.ЛММА1 \text{ теор}} = (0,025 \div 0,05)^\circ \text{К}.$$

Произведем проверку единиц измерения:

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

Полученное выражение для определения температурного отклика дефекта использовано в программном обеспечении «Thermoson», разработанном в Томском политехническом университете. Программа защищена свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020619856 от 25.08.2020 (приложение Б).

В программе MathCad был произведен расчет колебаний тонкой прямоугольной пластинки в области квадратного отверстия ($15 \times 15 \text{ мм}^2$) с использованием выражений (2.16) и (2.17). Относительно координатных осей x и y , определяющих размеры сторон отверстия в миллиметрах, эти колебания принимают вид, показанный на рисунке 2.10.



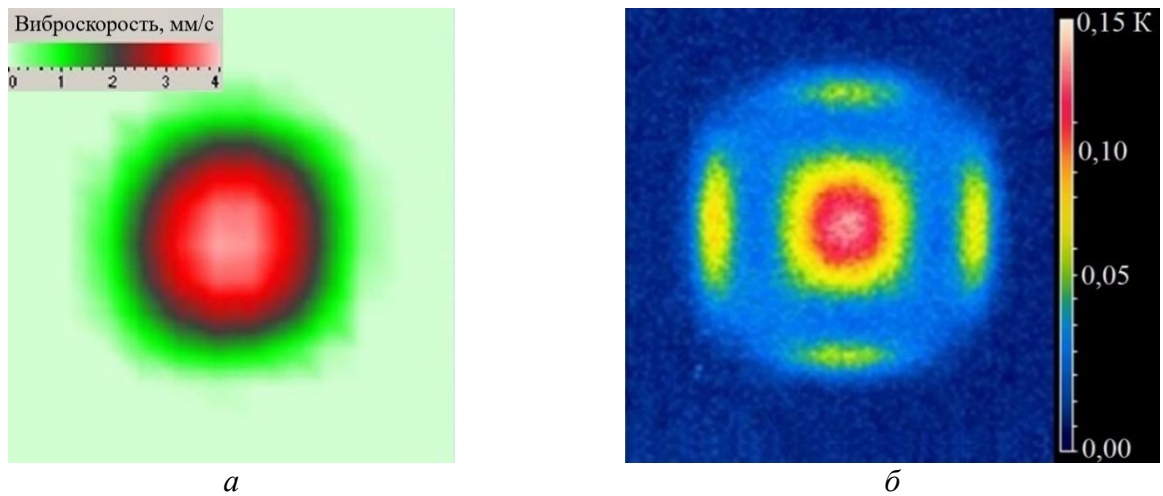
a – распределение прогиба пластины, b – распределение температурного отклика пластины

Рисунок 2.10 – Результаты расчета резонансных колебаний и температурного отклика в области сквозного квадратного отверстия при динамическом возбуждении, полученные в программе MathCad

Полученное выражение для определения температурного отклика дефекта (2.15) было применено для анализа температурного сигнала пластины ПММА в области сквозного квадратного отверстия. Размеры пластины (Р.ПММА1) $214 \times 60 \times 4 \text{ мм}^3$, стороны квадратного отверстия $a = b = 20 \text{ мм}$, толщина пластины в области отверстия $h = 1,2 \text{ мм}$.

Физические параметры ПММА заимствованы из источника [193]: коэффициент Пуассона $\eta = 0,02 - 0,04$, модуль Юнга $E = 3 \times 10^9$ Па, плотность $\rho = 1100 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, теплоемкость $c_n = 1500 \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$.

Как было отмечено выше, резонансная частота колебаний пластины ПММА в области несквозного отверстия квадратной формы, определенная экспериментально в результате лазерного вибросканирования, составила $f_{0 \text{ Р.ПММА1}} \text{ практич} = 8,563$ кГц (рисунок 2.11, *а*).



а – виброграмма несквозного отверстия, *б* – термограмма несквозного отверстия

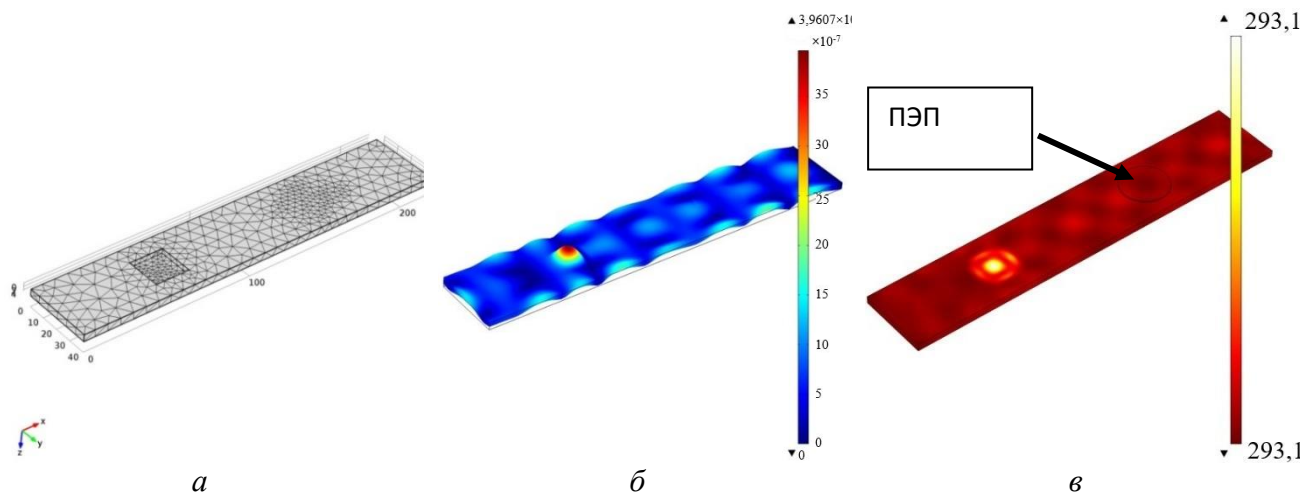
Рисунок 2.11 – Сравнение вибрационного и температурного окликов несквозного квадратного отверстия в пластине полиметилметакрилата при акустической стимуляции на частоте резонанса дефекта 8563 Гц

В результате проведения УЗ вибротермографии пластина ПММА была подвергнута УЗ стимуляции на частоте основного резонанса квадратного отверстия в течение 10 секунд. При уровне входного напряжения на пьезоизлучателе $U = 80$ В амплитуда температурного сигнала, зарегистрированного в области квадратного отверстия, составила $\Delta T_{\text{эксп}} = 0,06$ °С (рисунок 2.11, *б*).

В результате компьютерного моделирования в программе Comsol MultiPhysics определены резонансные частоты пластины Р.ПММА1 и построены соответствующие изображения, отражающие распределение механических колебаний (рисунок 2.12, *а*). Частота основного резонанса пластины в области

квадратного отверстия, определенная программным путем, составила 8,225 кГц (рисунок 2.12, б). Важно отметить, что на данном этапе исследования входное механическое воздействие от ПЭП учитывали в виде диска, закрепленного на поверхности пластины, как показано на рисунке 2.12, в. Заданная амплитуда виброперемещения диска составила 25 мкм.

В результате моделирования процесса акустической стимуляции пластины на частоте резонанса квадратного отверстия было получено изображение, отражающее распределение температурного поля на поверхности пластины ПММА, и рассчитана амплитуда изменения температуры в области квадратного отверстия.



a – изображение пластины, *б* – виброграмма пластины, *в* – термограмма пластины

Рисунок 2.12 – Результаты конечно-элементного моделирования вибрационного и температурного отклика пластины полиметилметакрилата в области несквозного квадратного отверстия на частоте резонанса отверстия 8,225 кГц, рассчитанные в программном обеспечении Comsol MultiPhysics

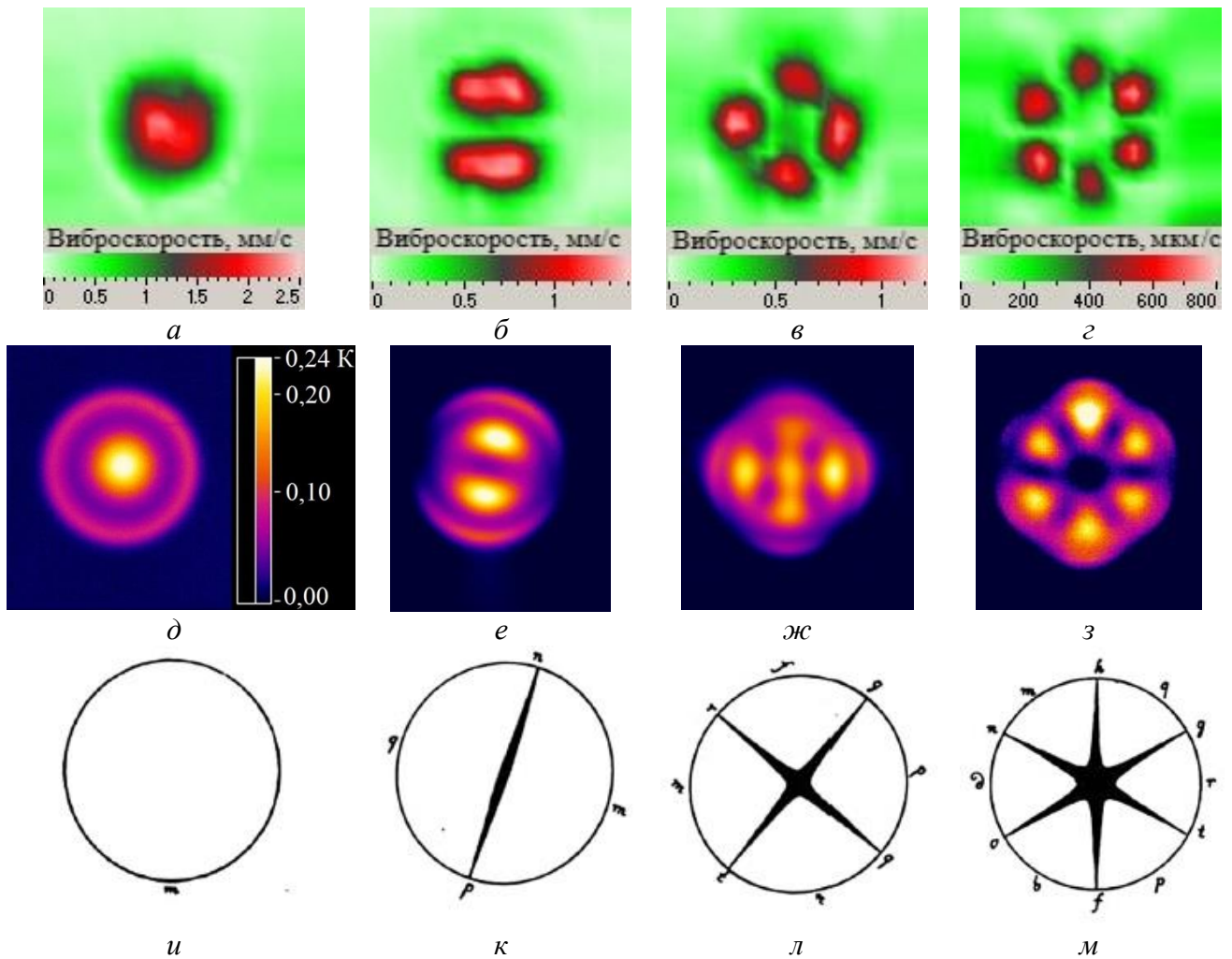
Относительное изменение температурного отклика пластины ПММА в области несквозного отверстия квадратной формы, определенное экспериментально в результате ИК термографии, составило $\Delta T_{\text{эксп}} = 0,06 \text{ } ^\circ\text{C}$, что приблизительно совпадает с диапазоном допустимых амплитуд температурного сигнала, рассчитанных теоретически $\Delta T_{R.ПММА1 \text{ теор}} = (0,025 \div 0,05) \text{ } ^\circ\text{K}$, а также полученных с помощью моделирования процесса акустической стимуляции

пластины в программе Comsol MultiPhysics ($\Delta T_{R, ПММА1 Comsol} = 0,04 \text{ }^\circ\text{C}$). Результаты проведенных исследований свидетельствуют о хорошей корреляции экспериментальных данных с расчетными значениями и результатами моделирования.

2.3.2. Тепловыделение в области дефекта в зависимости от порядка резонансных гармоник

Резонансные колебания дефекта вызывают значительные изгибные деформации, что приводит к локальному увеличению амплитуды температурного сигнала в этой области. Однако следует отметить, что тепловой сигнал дефекта, регистрируемый при акустической стимуляции с частотой, соответствующей частоте основного резонанса дефекта, многократно превосходит измеренное значение теплового сигнала при акустической стимуляции с частотой высших резонансных гармоник дефекта. Это не позволяет определить изменение температуры в области дефекта в последнем случае. Причиной данного явления является снижение интенсивности колебаний с увеличением порядка резонансных гармоник дефекта. Тем не менее, использование высокочувствительной аппаратуры для регистрации теплового сигнала и соответствующего программного обеспечения для обработки данных позволило получить фазовые изображения изменения температурного поля в области дефекта. Данный факт подтверждается экспериментальным исследованием вибраций на поверхности материала в области дефекта.

Ниже приведены результаты исследования вибраций и температурного отклика, регистрируемых на поверхности пластины ПММА, ослабленной несквозным круглым отверстием (диаметр 20 мм, толщина 1 мм). Акустическая стимуляция пластины осуществлялась на частоте основного резонанса несквозного отверстия, а также ее высших гармониках в течение 10 секунд. С использованием лазерной виброметрии были получены соответствующие виброграммы (рисунок 2.13, а–г), а также термограммы (рисунок 2.13, д–з), зарегистрированные с использованием тепловизионного оборудования.



a–г – виброграммы, *д* – термограммы, *е–з* – фазовые изображения несквозного круглого отверстия в пластине полиметилметакрилата;
a, д – частота основного резонанса отверстия 5,75 кГц, *б, е* – частота резонанса высшего порядка 12,53 кГц, *в, ж* – частота резонанса высшего порядка 19,19 кГц, *г, з* – частота резонанса высшего порядка 27,88 кГц,
и–м – сравнительные картины вибраций Хладни

Рисунок 2.13 – Сравнение картин вибраций Хладни с вибрационным откликом, температурным откликом, фазовыми изображениями в области несквозного квадратного отверстия в пластине полиметилметакрилата при ее акустической стимуляции на частоте основного резонанса отверстия и ее высших резонансных гармониках

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 2.13, *б*), 19,19 кГц (рисунок 2.13, *в*) и 27,88 кГц (рисунок 2.13, *г*).

Благодаря использованию высокочувствительной ИК камеры IRCAM Equus 327 К (Германия), имеющей чувствительность 15 мК, и специализированного программного обеспечения для обработки данных, в результате эксперимента были получены фазовые изображения температурных градиентов в области круглого несквозного отверстия радиусом 10 мм при толщине пластины в области отверстия, равной 1 мм (рисунок 2.13, *e–з*).

Виброграммы и ИК термограммы пластины в области круглого отверстия, полученные экспериментально, были сравнены с соответствующими классическими изображениями Хладни для круглых пластин (рисунок 2.13, *и–м*). Стоит напомнить, что картины резонансных вибраций тонких пластин впервые были получены немецким музыкантом Хладни Э. Ф. Ф. [194], который исследовал их с помощью сухого песка. В результате «прозвучивания» акустическим сигналом поверхности упругой пластины, покрытой тонким слоем песка, на поверхности исследуемого образца наблюдались области скопления песка вблизи узловых линий, не подверженных вибрациям. Данные фигуры были систематизированы по количеству узловых колец (m) и пересекаемых линий (n) и получили название «фигур Хладни». Приведенные результаты сравнения колебаний несквозных отверстий круглой формы в пластине ПММА с классическими изображениями Хладни опубликованы нами в высокорейтинговом журнале [82].

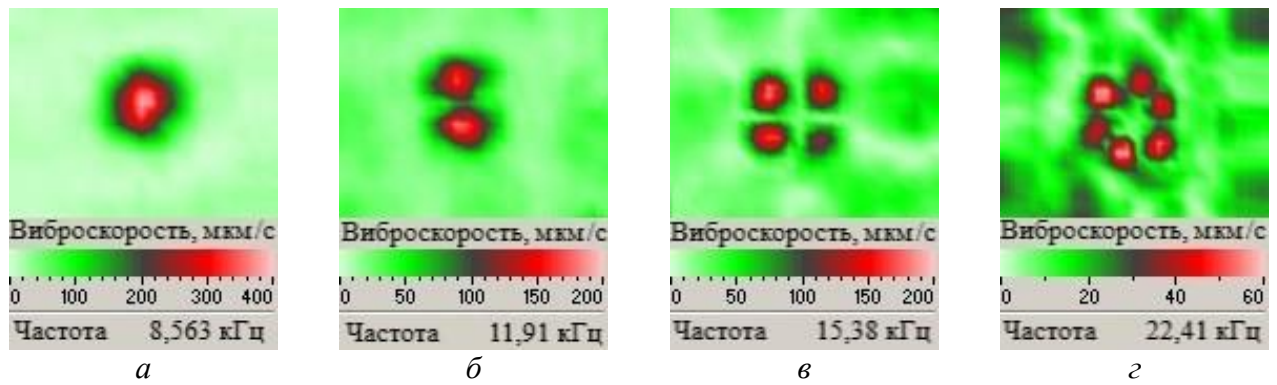
По результатам сравнительного исследования установлено, что фигуры Хладни цилиндрических резонаторов сопоставимы с картинами вибраций и тепловыми изображениями, полученными для пластины ПММА в области несквозного отверстия. Однако термограммы имеют некоторые отличия от виброграмм, состоящие в увеличении 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 виброграммы и термограммы, 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 2.13, *б–з*). Так, вибрации на частоте основного резонанса дефекта в течение 10 секунд приводят к увеличению температурного сигнала на 0,241 К (рисунок 2.13, *д*) по сравнению с бездефектной зоной, а при увеличении порядка резонансных гармоник изменение сигнала существенно снижается. Дальнейшее измерение тепловыделения в области сквозного отверстия при увеличении порядка резонансных гармоник является нецелесообразным, так как изменение температурного сигнала приближается к уровню шума (температурный сигнал в бездефектной области).

В отличие от виброграмм, ИК термограммы, зарегистрированные при акустической стимуляции пластины на частоте резонанса дефекта, позволяют визуализировать контуры сквозного отверстия и, следовательно, применимы для определения его реальных размеров. Однако для получения полной информации о расположении и форме дефектов, ИК термограммы и виброграммы, полученные для различных резонансных частот дефекта, должны быть «суммированы».

Следуя данной концепции, исследовали пластину из углепластикового композита (CFRP) толщиной 5 мм с заложённой тонкой металлической четырехугольной призмой малой толщины (размеры основания $27 \times 27 \text{ мм}^2$) (рисунок 2.14, *а*). Виброграммы данного образца в области заложённого дефекта, зарегистрированные при акустической стимуляции на частоте основного резонанса дефекта (8,56 кГц) (рисунок 2.14, *а*) и его высших порядков (11,91 кГц; 15,38 кГц; 22,41 кГц), приведены на рисунке 2.14, *б–г*.

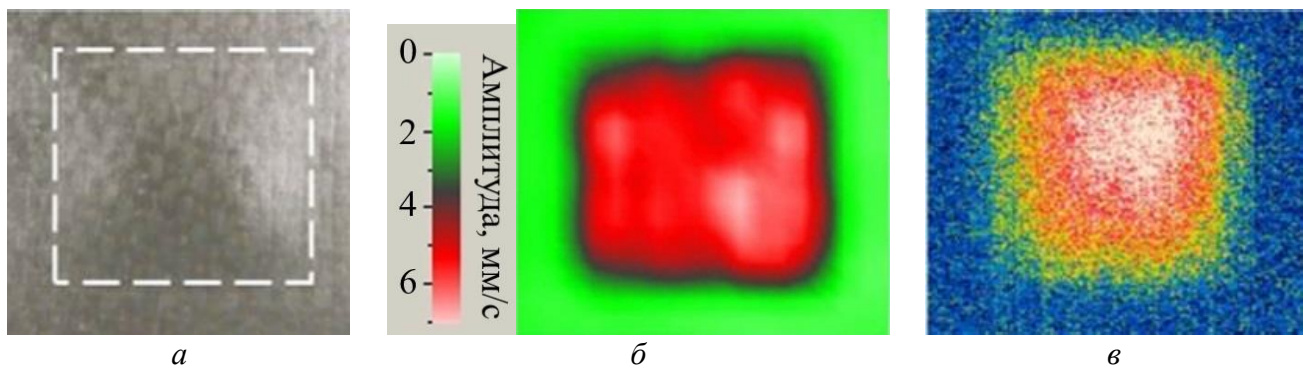
Исследование резонансных вибраций на поверхности углепластикового композита в области заложённого дефекта в виде металлической правильной четырехугольной призмы малой толщины (рисунок 2.14) показало, что максимальная амплитуда виброскорости, равная 400 мкм/с, была определена в области дефекта на частоте основного резонанса. При акустической стимуляции пластины с частотой высших резонансных гармоник дефекта наблюдалось снижение измеренной амплитуды виброскорости до 200 мкм/с на частоте 11,91 кГц, до 150 мкм/с на частоте 15,38 кГц, до 60 мкм/с на частоте 22,41 кГц.



Резонансные частоты дефекта: *a* – 8,5 кГц, *b* – 11,9 кГц, *v* – 15,4 кГц, *z* – 22,4 кГц

Рисунок 2.14 – Виброграммы углепластикового композита в области закладного дефекта (металлической четырехугольной призмы) на частоте основного резонанса дефекта и ее высших гармониках

В результате акустической стимуляции углепластикового композита в диапазоне частот от 50 Гц до 200 кГц (входное напряжение ПЭП 30 В) были получены результирующая виброграмма и фазовое изображение температурного градиента в области заложенного дефекта (рисунок 2.15, *b*, *v*).



a – изображение пластины, *b* – результирующая виброграмма пластины, *v* – фазовое изображение пластины

Рисунок 2.15 – Результаты лазерно-виброметрического и термографического контроля пластины углепластикового композита в области закладного дефекта при акустической стимуляции в диапазоне частот от 50 Гц до 200 кГц

Вибросканирование поверхности исследуемой пластины в режиме быстрого преобразования Фурье позволяет преобразовать регистрируемый сигнал из временной области в фазочастотную, детально исследовать выборочные участки амплитудно-частотного спектра, а также произвести усреднение данных во всем

исследуемом диапазоне частот. На рисунке 2.15, б приведена результирующая виброграмма, отображающая среднее значение амплитуды колебаний в области закладного дефекта в диапазоне частот от 50 Гц до 200 кГц. Область дефекта, визуализированная в процессе акустической стимуляции широкополосным сигналом, практически повторяет реальные размеры закладного дефекта. Таким образом, модулированный по частоте сигнал вовлекает в процесс вибрации всю зону неоднородности за счет активации вибраций дефекта как на основной частоте резонанса, так и на ее высших гармониках. Данные результаты подтверждают необходимость использования широкополосного акустического сигнала для воспроизведения полной формы, размеров и расположения дефектов. Однако следует отметить проблему поддержания высокого уровня подаваемого сигнала на ПЭП (более 70 В) в режиме меняющейся частоты, что обусловлено ограничениями технической аппаратуры и сложностью инженерной реализации данной задачи, а также ограничениями режима работы ПЭП. Низкий уровень вводимого акустического сигнала сопровождается слабой амплитудой колебаний дефектов. В связи с этим, регистрируемые ИК изображения также характеризуются низким отношением сигнал/шум, что приводит к необходимости извлечения фазового изображения из набора термограмм путем применения преобразования Фурье.

2.4. Исследование резонансных явлений в области дефектов с использованием трехкомпонентной сканирующей лазерной виброметрии

2.4.1. Исследование дефектов простой геометрической формы в гомогенных материалах в трехмерном представлении

В настоящем исследовании проводится сравнительный анализ трех составляющих компонент вибрации в области дефектов путем моделирования локальных резонансных колебаний несквозных отверстий простой геометрической формы и выполнения трехмерного лазерного вибросканирования. Указанный подход позволит оценить напряжения, возникающие в образцах в результате резонансного

УЗ воздействия, и провести их сравнение с пределом текучести материала. Получение указанных сведений позволит судить о границах применимости разрабатываемого подхода и неразрушающем характере испытаний. Приведенные ниже результаты исследований с использованием трехкомпонентной сканирующей лазерной виброметрии опубликованы в высокорейтинговом журнале [63].

Объектом настоящего исследования является сквозное отверстие прямоугольной формы ($32,5 \times 31 \times 0,9$ мм³) в эталонном образце ПММА ($200 \times 200 \times 4$ мм³), как показано на рисунке 2.16. Как было отмечено ранее, качество фрезеровки дефектов, шероховатость материала и неточности воспроизведения заданной геометрии (в частности, в углах) дефектов могут влиять на результаты экспериментов.

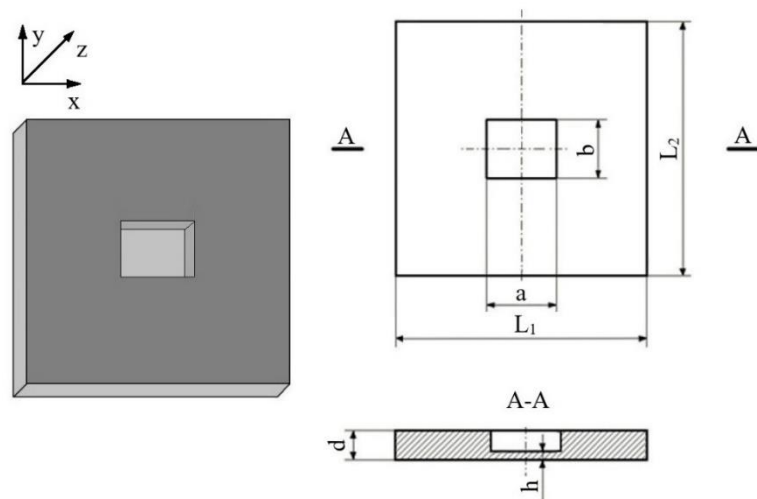
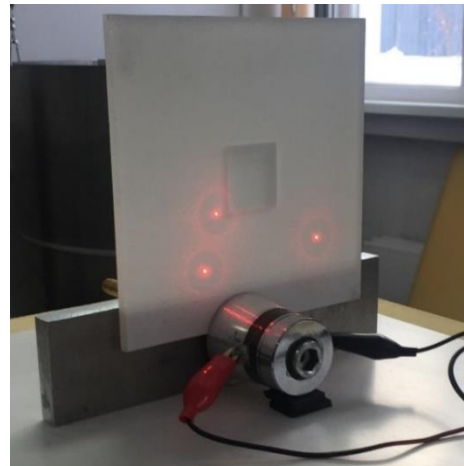


Рисунок 2.16 – Общий вид (слева) и геометрия (справа) пластины полиметилметакрилата, ослабленной сквозным отверстием прямоугольной формы

Механические колебания в образце анализировали методом лазерно-виброметрического неразрушающего контроля при акустической стимуляции материала в широком диапазоне частот и регистрации вибраций в трехмерном представлении. Описание используемой лабораторной установки приведено в разделе 2.3 (рисунок 2.1). Фотография экспериментальной установки трехкомпонентной сканирующей лазерной доплеровской виброметрии (рисунок 2.17, а) и схема закрепления пьезоэлектрического преобразователя на объекте контроля (рисунок 2.17, б) приведены ниже.



а



б

а – фотография лабораторной установки, б – фотография пластины полиметилметакрилата с закрепленным на ней пьезоэлектрическим преобразователем

Рисунок 2.17 – Фотографии экспериментальной установки трехкомпонентной сканирующей лазерной доплеровской виброметрии для неразрушающих испытаний дефектов простой геометрической формы в гомогенных материалах

Акустическую стимуляцию материалов проводили синусоидальным сигналом, модулированным в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц, и сопровождали трехмерным лазерным вибросканированием образца в режиме быстрого преобразования Фурье. Количество спектральных линий составило 3200 в указанном диапазоне частот, что соответствовало шагу сканирования 31,25 Гц.

2.4.2. Конечно-элементное моделирование дефектов простой геометрической формы в гомогенных материалах в трехмерном представлении

Разработка конечно-элементной модели дефектов простой геометрической формы необходима для минимизации объема экспериментов и корректировки физических свойств объекта, таких как отношение массы к размеру и жесткость, и/или характеристик демпфирования, которые могут оказать влияние на резонансные частоты объекта. Анализ резонансных частот и форм колебаний, возникающих в упругой среде, полезен для оценки стойкости испытуемых деталей к внешним механическим воздействиям, а в ряде случаев и для изменения диапазона рабочих частот деталей.

В рамках настоящего исследования с использованием пакета Structural Mechanics программного обеспечения Comsol Multiphysics выполнено конечно-элементное моделирование, основанное на анализе собственных частот пластины ПММА. Модель включала объемные элементы типа Solid и отражала физические свойства исследуемого материала. В общем случае для расчета собственных частот пластин необходимо определить жесткость пластины на изгиб (D) [195]:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (2.29)$$

где h – толщина несквозного отверстия,

E и ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала соответственно.

Собственные частоты, а также собственные моды зависят от геометрии образца и условий опоры на краях. В случае прямоугольного несквозного отверстия, зажатого по периметру (стороны a , b), собственные частоты можно определить как [195]:

$$\omega_{m,n} = \pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\mu}}, \quad (2.30)$$

где μ – масса на единицу площади,

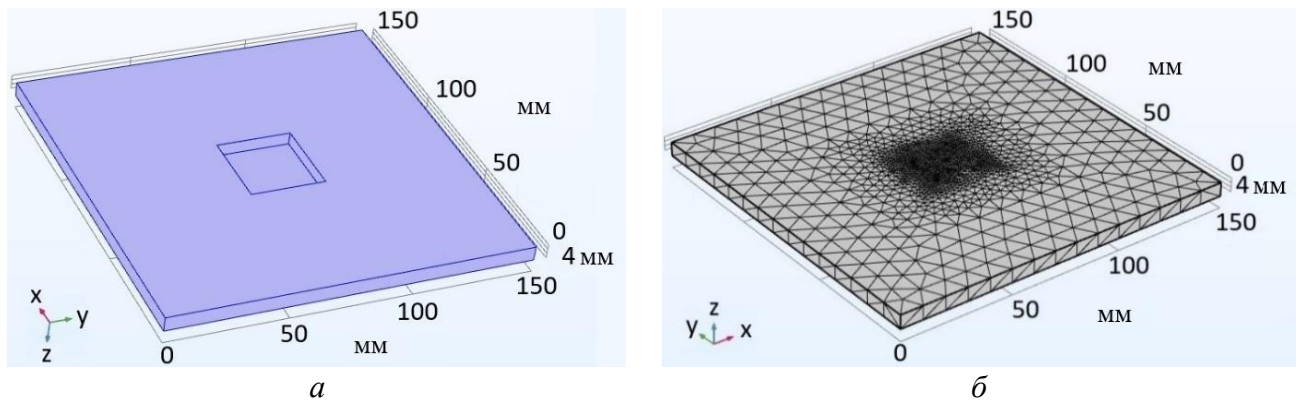
m и n – индексы (1, 2, 3 и т. д.), обозначающие порядок резонансных мод.

В разделе 2.3 приведен вывод аналитического уравнения для определения основной частоты резонанса в области несквозного отверстия прямоугольной формы в изотропной пластине ПММА с результатом в следующем виде [196]:

$$\omega_0 = \frac{2\pi^2}{3a^2b^2} \sqrt{\frac{Eh^2(3a^4+3b^4+2a^2b^2)}{3\rho(1-\nu^2)}}, \quad (2.31)$$

где ρ – плотность материала.

Собственные частоты пластины в области прямоугольного отверстия рассчитывали с использованием уравнений (2.29)–(2.31) для следующих параметров пластины: $a = 32,5$ мм, $b = 31$ мм, $h = 0,9$ мм. Физические свойства ПММА материала: $E = 3 \times 10^9$ Па, $\nu = 0,4$ и $\rho = 1160$ кг/м³. На рисунке 2.18 приведена разработанная конечно-элементная модель (рисунок 2.18, а) и соответствующая численная сетка (рисунок 2.18, б).



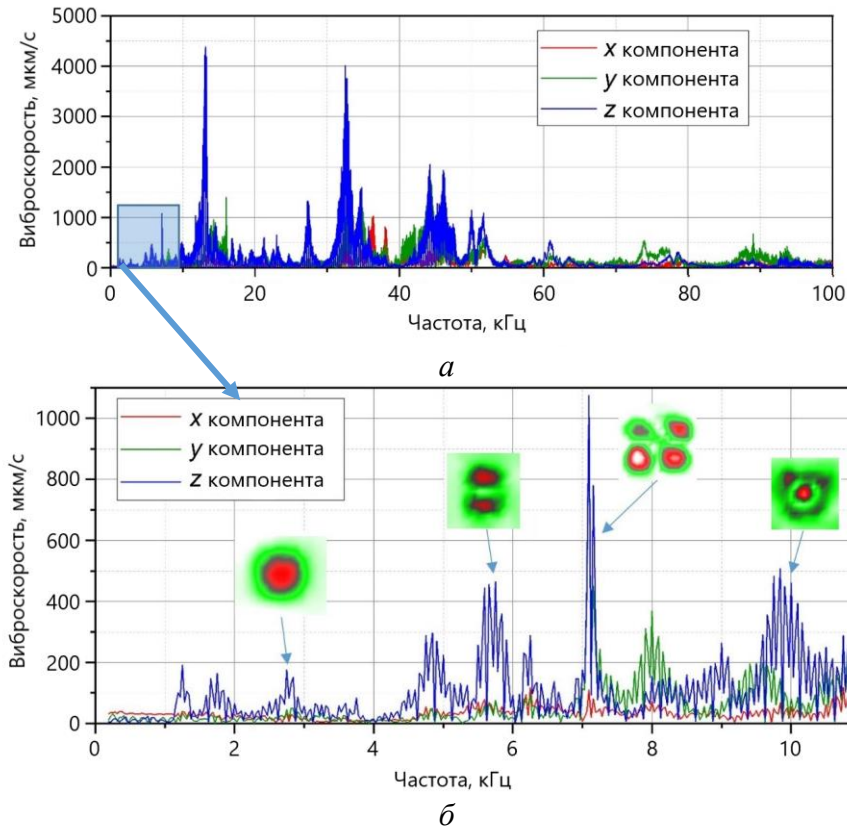
a – геометрия исследуемой пластины полиметилметакрилата с несквозным прямоугольным отверстием, b – численная сетка исследуемой пластины

Рисунок 2.18 – Конечно-элементная модель пластины полиметилметакрилата с несквозным прямоугольным отверстием, разработанная в программе Comsol Multiphysics

В результате конечно-элементного моделирования были определены резонансные частоты несквозного отверстия f_{model} , а также получены соответствующие изображения, отображающие распределение механических колебаний пластины по координатам x , y , z . Заданное в модели граничное условие включало консольную опору, что отражает реальные условия проведения эксперимента. Также в ходе анализа собственных частот пластины предполагалось, что модель подвергается динамическим испытаниям в идеальных условиях, т. е. без учета влияния внешних факторов. Экспериментальные величины резонансной частоты $f_{экс.}$ определенные с помощью лазерной виброметрии, использовали для верификации разработанной математической модели.

2.4.3. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных исследований

Результатами проведения лазерной виброметрии в режиме быстрого преобразования Фурье (БПФ) явились амплитудно-частотные спектры колебаний пластины ПММА (рисунок 2.19) и изображения колебаний поверхности материала в диапазоне частот от 50 Гц до 11 кГц, полученные с шагом сканирования 31,25 Гц.



а – спектр колебаний пластины полиметилметакрилата в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц,
б – спектр колебаний пластины полиметилметакрилата в диапазоне частот от 50 Гц до 10 кГц

Рисунок 2.19 – Усредненный амплитудно-частотный спектр колебаний пластины полиметилметакрилата, измеренный с использованием трехкомпонентной сканирующей лазерной доплеровской виброметрии

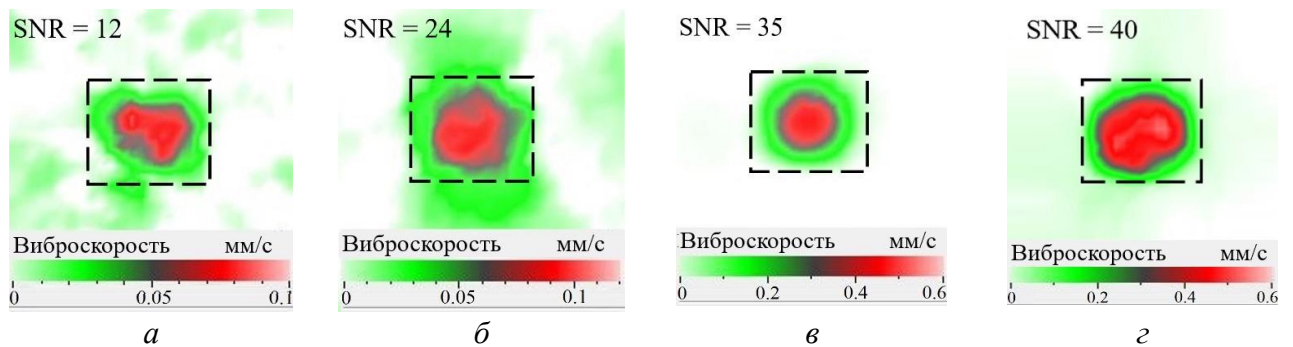
На каждой рассмотренной резонансной частоте определяли отношение сигнал/шум (signal to noise ratio – SNR), что является обычной практикой при сравнении эффективности различных экспериментальных данных [197]:

$$SNR = \frac{|v_d - v_{nd}|}{\sigma_{nd}}, \quad (2.32)$$

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

Из рисунка 2.19 видно, что частотные спектры колебаний пластины по координатам x , y , z имеют одинаковую форму, но различаются по амплитуде. Для каждой координаты были рассчитаны средние значения амплитуды колебаний в выбранных частотных диапазонах, а затем проведено их сравнение, чтобы показать вклад каждой координаты в результирующую картину вибрации. Таким образом, средняя скорость вибрации во всем спектре частот имеет максимальное

значение 300 мм/с по координате z по сравнению со 130 мм/с и 230 мм/с по координатам x и y соответственно. Это свидетельствует о максимальном вкладе изгибной деформации в случае резонансной стимуляции дефектов в виде несквозных отверстий. Также стоит отметить, что все три компоненты колебаний несквозного отверстия идентичны по форме для основной резонансной частоты и зарегистрированы в диапазоне частот от 2344 до 2750 Гц (рисунок 2.20). Максимальное значение отношения $SNR = 35$ наблюдали по координате z , а по координатам x и y величина SNR составила 12 и 24 соответственно.

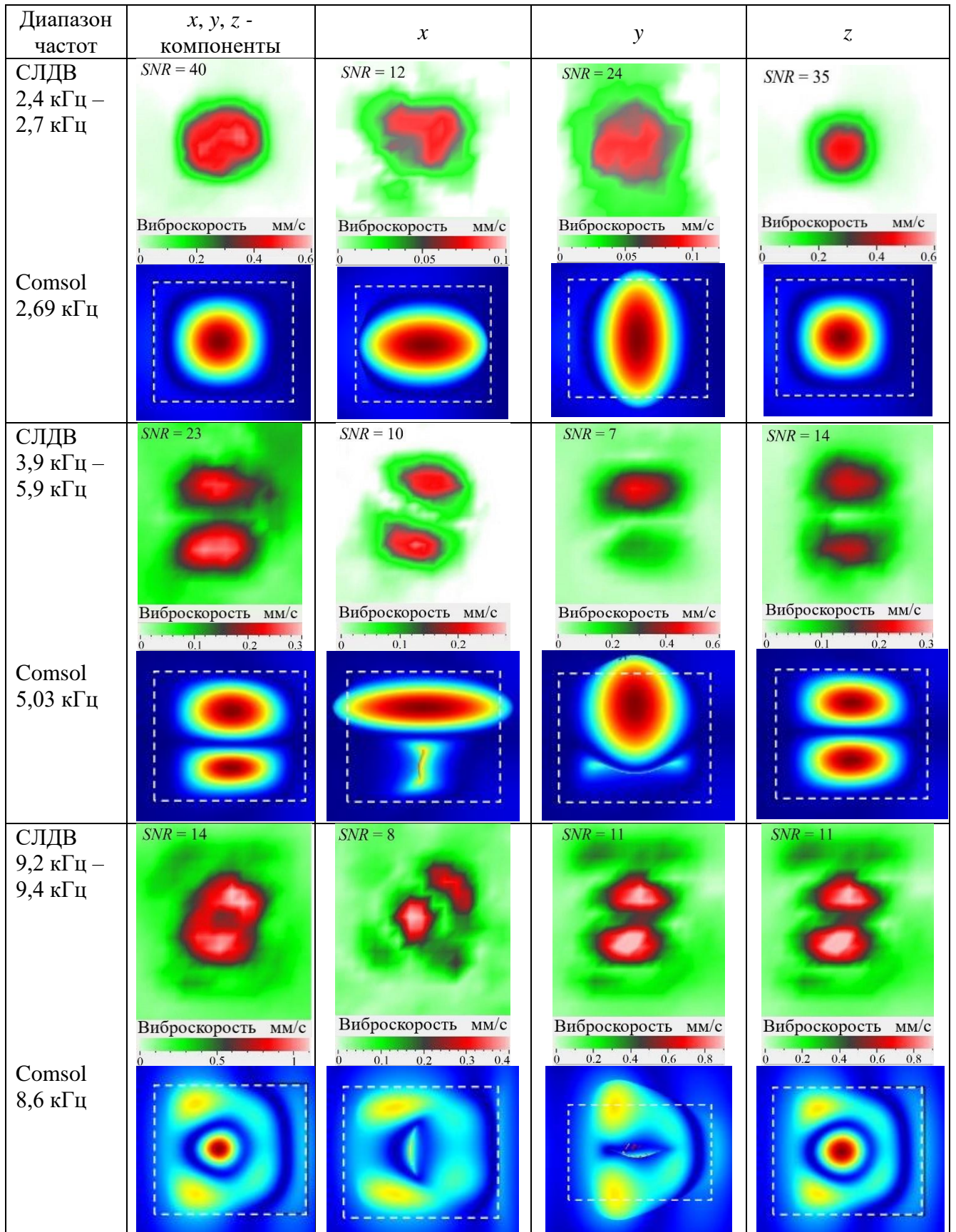


a – виброграмма несквозного отверстия по координате x на частоте 2344 Гц, b – виброграмма несквозного отверстия по координате y на частоте 2563 Гц, v – виброграмма несквозного отверстия по координате z на частоте 2750 Гц, z – виброграмма несквозного отверстия по координатам x, y, z в диапазоне частот 2334–2750 Гц

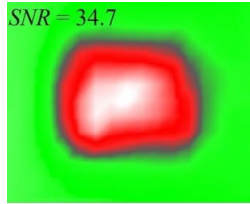
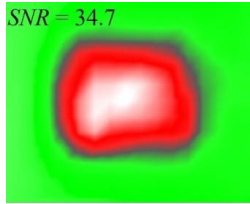
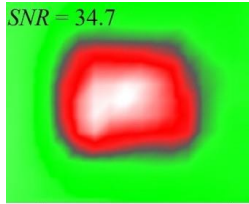
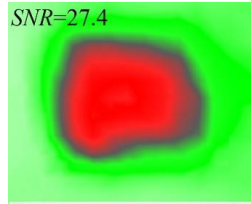
Рисунок 2.20 – Виброграммы несквозного отверстия прямоугольной формы в пластине полиметилметакрилата на частоте основного резонанса отверстия, измеренные с использованием трехкомпонентной сканирующей лазерной доплеровской виброметрии

Несмотря на то, что резонансные частоты различаются по трем координатам (от 2334 до 2750 Гц), все три составляющие вибраций одинаково вовлечены в процесс колебаний. Это также подтверждается одинаковым распределением виброскорости по трем координатам на амплитудно-частотном спектре колебаний пластины ПММА (рисунок 2.20). При анализе спектра в диапазоне частот от 50 Гц до 13 кГц были выделены три резонансные частоты в области прямоугольного отверстия по каждой из трех декартовых координат. Формы резонансных колебаний рассматривали отдельно и сравнивали на каждой конкретной частоте резонанса. Результаты анализа представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Резонансные колебания в области несквозного отверстия прямоугольной формы, определенные экспериментально и в результате компьютерного моделирования по координатам x, y, z в диапазоне частот 50 Гц – 13 кГц



Окончание таблицы 2.1

Диапазон частот	x, y, z - КОМПОНЕНТЫ	x	y	z
30 Гц ÷ 100 кГц	 <p>SNR = 34.7</p> <p>Виброскорость мм/с</p> <p>0 5 10 15 20 25</p>	 <p>SNR = 34.7</p> <p>Виброскорость мм/с</p> <p>0 5 10 15 20 25</p>	 <p>SNR = 34.7</p> <p>Виброскорость мм/с</p> <p>0 5 10 15 20 25</p>	 <p>SNR = 27.4</p> <p>Виброскорость мм/с</p> <p>0 5 10 15 20 25</p>

Результаты лазерной виброметрии показали, что максимальное усиление колебаний волнового фронта с 0,07 до 0,6 мм/с, т. е. в 9 раз, имело место на частоте основного резонанса дефекта (2750 Гц), определенной по координате z (внеплоскостная компонента). Соответственно колебания по координатам x и y (в плоскости отверстия) усилились в 3 и 4 раза соответственно. Это подтверждает, что внеплоскостные компоненты колебаний играют решающую роль в формировании результирующих сигналов дефектов на основных частотах резонанса. Например, при рассмотрении резонанса более высокого порядка было обнаружено, что вклад каждой отдельной компоненты колебаний в виброграмму усредненных колебаний неравномерен. Максимальная скорость колебаний по координате x (до 1,4 мм/с) имела место на частоте 6094 Гц, что превышало соответствующие значения, измеренные по координатам z (1,1 мм/с) и y (0,9 мм/с). Однако все три компоненты колебаний внесли свой вклад в результирующую виброграмму, полученную путем усреднения составляющих на частоте 6094 Гц. Таким образом, усреднение амплитуды колебаний по трем компонентам на частоте резонанса дефекта может быть полезно при проведении неразрушающего контроля. Например, в рассмотренном случае (рисунок 2.19) усреднение амплитуды колебаний по трем компонентам x, y, z на определенных частотах приближало измеренные размеры дефекта к реальным размерам и геометрии. Кроме того, при анализе колебаний на частоте 9250 Гц максимальный вклад вносила x -компонента (в плоскости дефекта) по сравнению с y - и z -компонентами. Таким образом, виброграмма колебаний по x, y, z компонентам, полученная

на частоте 9250 Гц, напоминала виброграмму, полученную по двум координатам x и y , когда вклад внеплоскостной компоненты колебаний был минимальным. Усредненные виброграммы, полученные для каждой пространственной координаты, показали, что измеренные размеры дефекта сопоставимы с истинными значениями. В связи с этим, усредненные виброграммы, полученные по трем координатам в режиме 3D-сканирования, могут предоставить достоверную информацию о параметрах дефекта с лучшим отношением SNR , что в итоге повысит эффективность дефектоскопии.

Результаты численного моделирования показали, 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. Поэтому сравнение теоретических и экспериментальных результатов по определению формы колебаний и резонансных частот несквозного отверстия проведено для z -компоненты.

Как следует из таблицы 2.1, колебания дефекта на каждой частоте проявлялись по всем трем координатам, незначительно различаясь по координатам x и y . Это явление описано в работах [157, 198], где показано, что поляризация различных резонансных мод дефекта по отношению к ориентации дефекта может оказывать значительное влияние на результаты дефектоскопии. В частности, резонансные колебания в плоскости xy происходят из-за режима вибрации, создаваемой акустическими волнами, которые отличаются более высокой скоростью (продольные волны). Следует отметить, что преобладающую роль в нарастании сигнала при проведении ультразвуковой вибротермографии играет фрикционный нагрев.

С учетом вышеперечисленных явлений были определены первые три моды резонансных колебаний дефекта в диапазоне частот от 2750 до 9500 Гц, выявлено хорошее соответствие теоретическим данным по форме и частотам резонансных гармоник. Первая расчетная мода определена на частоте 2690 Гц и соответствовала экспериментальным результатам сканирования на частоте 2750 Гц. Вторая мода резонанса дефекта характеризовалась теоретическими/экспериментальными значениями 5030 Гц и 6094 Гц соответственно. Следует отметить, что

рассчитанные формы резонансных колебаний в усредненных виброграммах отличались от экспериментальных значений компонент x и y . Фактически расчетная усредненная виброграмма дефекта повторяла колебания по координате z , а экспериментальная усредненная виброграмма дефекта объединяла колебания по координатам x и z . Некоторое расхождение результатов моделирования и эксперимента (до 10 % по центральной частоте) наблюдали и на более высоких частотах. Указанное несоответствие, вероятно, возникло из-за различия условий ввода ультразвуковых волн в образец и некоторых особенностей изготовления сквозного отверстия, а именно, наличия скругленных углов, высокой шероховатости материала и т. д. Кроме того, лазерное вибросканирование производили в случае, когда пьезоэлектрический преобразователь крепили к краю образца (рисунок 2.17, б), а моделирование предполагало идеальные условия ввода ультразвука, т. е. без учета факторов окружающей среды. Однако, несмотря на отмеченные выше расхождения между теорией и экспериментом, полученные результаты имеют высокую сходимость, что подтверждает справедливость предложенной математической модели.

2.4.4. Сравнение уровня акустического воздействия при резонансной ультразвуковой стимуляции дефектов с пределом прочности исследуемых материалов

Как было отмечено выше, при стимуляции изделий из композитов акустическим сигналом с частотой резонанса дефекта вибрации в области сквозного отверстия многократно усиливаются. Резонансные вибрации дефекта сопровождаются максимальными деформациями растяжения–сжатия изделия в указанной зоне. В рамках настоящего исследования проводилось измерение максимального уровня напряжений, возникающих в области сквозного отверстия в эталонной пластине ПММА (геометрия пластины приведена на рисунке 2.17) при резонансной акустической стимуляции. Образец подвергали стимуляции акустическим сигналом на резонансной частоте дефекта (12,5 кГц).

Вибрации на поверхности материала регистрировали в декартовой системе координат (рисунок 2.17) с использованием лазерного виброметра по x -компоненте (в плоскости дефекта). Амплитуда прикладываемых напряжений при резонансной УЗ стимуляции в области сквозного прямоугольного отверстия далее была сравнена с пределом прочности ПММА материала.

В результате лазерного вибросканирования было определено абсолютное значение удлинения растяжения–сжатия Δl пластины в области сквозного отверстия по координате x : $\Delta l = (0,7 \div 1)$ мкм, что соответствует деформации растяжения–сжатия.

Согласно закону Гука, деформация, возникающая в упругом теле, пропорциональна приложенной к этому телу силе: $F = k\Delta l$, где F – сила, которая растягивает/сжимает стержень, k – коэффициент упругости, Δl – абсолютное удлинение/сжатие. Коэффициент упругости в свою очередь зависит от модуля упругости материала (E) и от размеров исследуемого объекта: $k = ES/L$, где S – площадь поперечного сечения, L – длина. Тогда, если ввести относительное удлинение/сжатие ε ($\Delta l/L$) и нормальное напряжение σ (F/S), закон Гука для относительных величин имеет вид:

$$\sigma = E \times \Delta l / L \quad (2.33)$$

Далее с учетом выражения (2.33) оценим вибрации и относительное удлинение пластины по координате x :

$$\Delta l / L = (0,7 \div 1) \text{ мкм} / 31 \text{ мм} = (0,023 \div 0,032) \times 10^{-3}.$$

Модуль упругости оргстекла равен (2800 ÷ 3300) МПа [193].

Тогда предельное растяжение при ультразвуковой стимуляции композита составит:

$$\sigma_{\text{эксперим.}} = (2800 \div 3300) \text{ МПа} \times (0,023 \div 0,032) \times 10^{-3} = (64,4 \div 105,6) \text{ кПа}.$$

Предел прочности оргстекла при растяжении [193]:

$$\sigma_{\text{max}} = 65 \text{ МПа}.$$

Отношение предельного значения прочности к амплитуде УЗ воздействия составляет:

$$\sigma_{\text{max}} / \sigma_{\text{эксперим.}} = 65 \text{ МПа} / (64,4 \div 105,6) \text{ кПа} = 615 \div 1000.$$

Из полученных данных следует, что отношение предельной величины прочности к амплитуде УЗ воздействия может варьироваться в диапазоне (615÷1000) для оргстекла в области несквозного отверстия. В связи с этим, метод лазерно-виброметрического неразрушающего контроля при резонансной стимуляции дефектов можно отнести к неразрушающим методам контроля ввиду низкого уровня воздействий упругих волн на твердые тела в процессе акустической стимуляции.

2.5. Неразрушающие испытания материалов и изделий из полимерных композитов с использованием лазерной виброметрии при резонансной ультразвуковой стимуляции дефектов

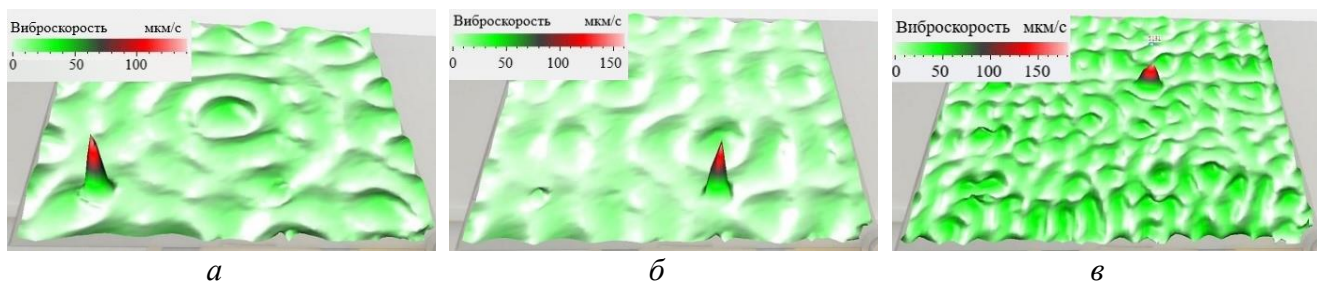
Исследование моделей дефектов простой геометрической формы имеет фундаментальное значение при изучении явления локального резонанса дефекта, однако на практике реальные дефекты в слоистых композиционных материалах имеют сложную слоистую структуру.

В продолжение исследований локального резонанса дефектов далее описан спектроскопический подход к лазерной виброметрии при акустической стимуляции, применяемый к полимерным композиционным материалам, гибридным композиционным материалам, подверженных ударным повреждениям.

2.5.1. Исследование открытых дефектов в стеклопластиковом композите с использованием однокомпонентной сканирующей лазерной виброметрии

В настоящем исследовании была проанализирована зависимость вибрационных характеристик дефектов открытого типа в полимерных композитах от глубины их залегания. Объектом исследования была выбрана пластина стеклопластика размерами 320×320×16 мм с несквозными отверстиями круглой формы (диаметр 20 мм, глубина залегания от 1 до 13 мм) (см. таблицу 2.2).

В ходе проведения лазерной виброметрии для каждого дефекта определялась характерная резонансная частота, при которой амплитуда колебаний многократно возрастала по отношению к вибрациям в бездефектной зоне. Резонансные частоты несквозных отверстий (f_{LDR}) определялись путем анализа виброграмм и амплитудно-частотного спектра колебаний материала, измеренного в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц (количество спектральных линий 3200). Примеры резонансных колебаний несквозных отверстий круглой формы представлены на рисунке 2.21.



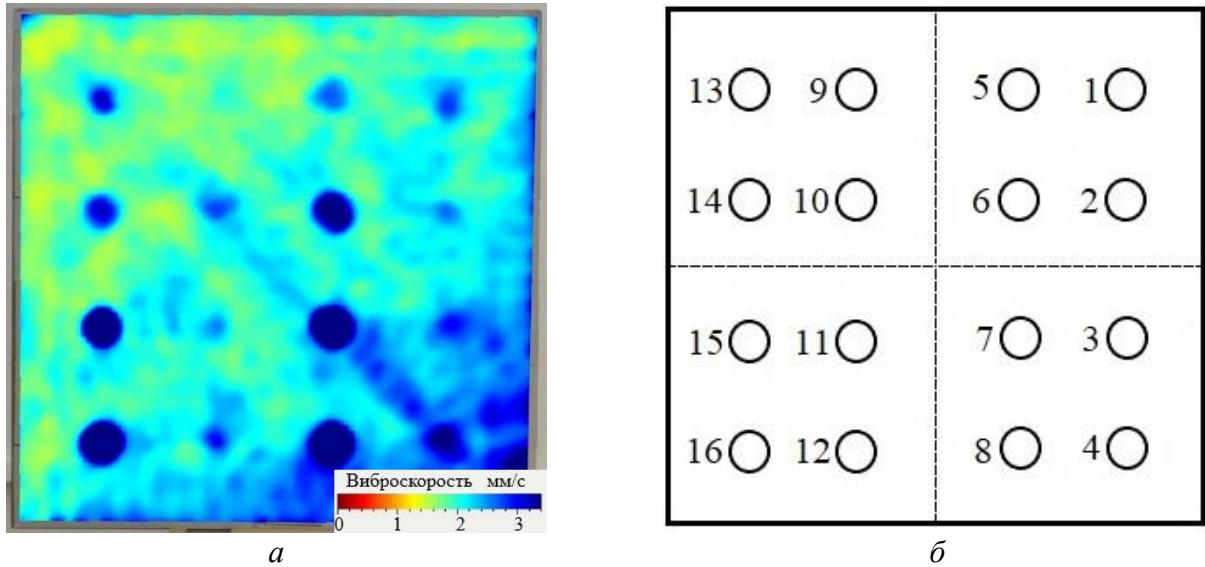
Частота резонанса дефекта: *a* – 12,5 кГц, *б* – 13,1 кГц, *в* – 31 кГц

Рисунок 2.21 – Резонансные колебания в области круглых несквозных отверстий в стеклопластике на различных частотах

Из полученных виброграмм видно, что резонансная стимуляция дефектов проявляется в виде увеличения амплитуды колебаний на различной частоте акустических волн. Например, для дефекта № 16 (глубина залегания 1,1 мм) оптимальная частота обнаружения составляет 12,5 кГц, в то время как дефекты № 8 (глубина 1,2 мм) и № 5 (глубина 7,2 мм) проявлялись на частотах 13,1 кГц и 31 кГц соответственно. Резонансные колебания в области каждого из шестнадцати несквозных отверстий были обнаружены в диапазоне частот от 12,5 кГц до 98,9 кГц, что физически определяется как геометрическими размерами неоднородности и глубиной ее залегания, так и свойствами материала (в соответствии с выражением 2.3). Измеренные значения резонансных частот дефектов (№ - нумерация дефектов) приведены в таблице 2.2.

Широкополосная акустическая стимуляция упругими волнами приводит к активации как основных резонансных частот в области дефектов, так и их высших

гармоник. В связи с этим, далее проведено усреднение виброграмм во всем диапазоне измеряемых частот, что позволило уточнить геометрические размеры и площадь дефектов. На рисунке 2.22 приведена виброграмма (рисунок 2.22 *а*), полученная при усреднении амплитуды виброскорости в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц, и карта расположения дефектов в стеклопластиковом композите (рисунок 2.22 *б*).



а – виброграмма, *б* – схема расположения дефектов

Рисунок 2.22 – Усредненная виброграмма стеклопластикового композита и схема расположения дефектов.

Из виброграммы на рисунке 2.22 (*а*) видно, что дефекты, расположенные на глубине залегания (h) менее 1 мм от поверхности композита, характеризуются амплитудой виброскорости до 8 мм/с, что в два раза превышает амплитуду виброскорости, измеренную в области дефектов, расположенных глубже 5 мм (дефекты № 1-6, 9-14). Снижение амплитуды колебаний в области дефектов сопровождается уменьшением измеренной площади неоднородности материала, вовлеченного в процесс вибраций. В таблице 2.2 представлены соответствующие оценки площади дефектов, а также приведены результаты расчета относительной ошибки $\varepsilon = (S_a - S_t) / S_t$, где S_a и S_t - кажущиеся и истинные площади несквозных отверстий.

Таблица 2.2 – Обнаружение несквозных отверстий круглой формы в стеклопластиковом композите с использованием лазерной виброметрии.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
h , мм	12,2	11,3	10,2	9	7,2	5,4	3,2	1,2	13	11,0	10,3	9,2	6,6	5,1	3,2	1,1
f_{LD} , кГц	92,8	95,4	80,3	40,6	31,0	19,6	19,3	13,1	98,9	97,2	83,4	76,1	36,9	19,6	19,4	12,5
S_a , мм ²	19,6	19,2	19	19,4	16	18	12,2	11,8	10	10,4	7	6,4	8	6	3	6
ε , %	2	4	5	3	20	10	39	41	50	48	65	68	60	70	85	70

По результатам лазерной виброметрии обнаружено 15 дефектов из 16, расположенные на глубине до 13 мм от контролируемой поверхности материала (рис. 4). Достоверность измерения площади дефектов повышается (с ошибкой менее 5%) в случае рассмотрения дефектов, расположенных на глубинах до 4 мм. При увеличении глубины залегания дефектов ошибки измерения площади увеличиваются до 20% (на глубине 5,1 мм) и до 40% (на глубине 7 мм). Площадь дефектов, расположенных на глубине от 7 до 12 мм от исследуемой поверхности, может быть измерена с ошибкой от 50 до 70%. Важно отметить, что дефект № 9, расположенный на глубине 13 мм, характеризовался самым низким значением сигнал/шум по сравнению с другими несквозными отверстиями, и не был обнаружен по результатам виброметрии.

К особенностям проведения лазерной виброметрии следует отнести возможность взаимного гашения вибрационного сигнала дефектов, существенно отличающихся по глубине залегания и амплитуде вибраций. Таким образом, глубоко залегающие дефекты могут быть пропущены в процессе контроля на фоне измерения вибрационного сигнала от подповерхностных неоднородностей. В связи с этим, лазерно-виброметрический контроль дефектов открытого типа в полимерных композитах целесообразно проводить на глубинах до 13 мм от контролируемой поверхности.

2.5.2. Спектроскопический анализ ударного повреждения в углепластике с использованием трехкомпонентной сканирующей лазерной виброметрии

Ранее в разделе 2.4.3 было показано, что виброграммы, полученные для дефектов простой геометрической формы в ходе лазерного сканирования и 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 вибрационного сигнала. Следуя данной концепции, были проведены исследования полимерных композиционных материалов с реальными дефектами в виде ударных повреждений на примере пластины углепластикового композита (carbon fiber reinforced plastic – CFRP) толщиной 1,5 мм с ударным повреждением энергией 16 Дж в центре образца (рисунок 2.23). Результаты С-сканирования были использованы для оценки достоверности результатов лазерной виброметрии.

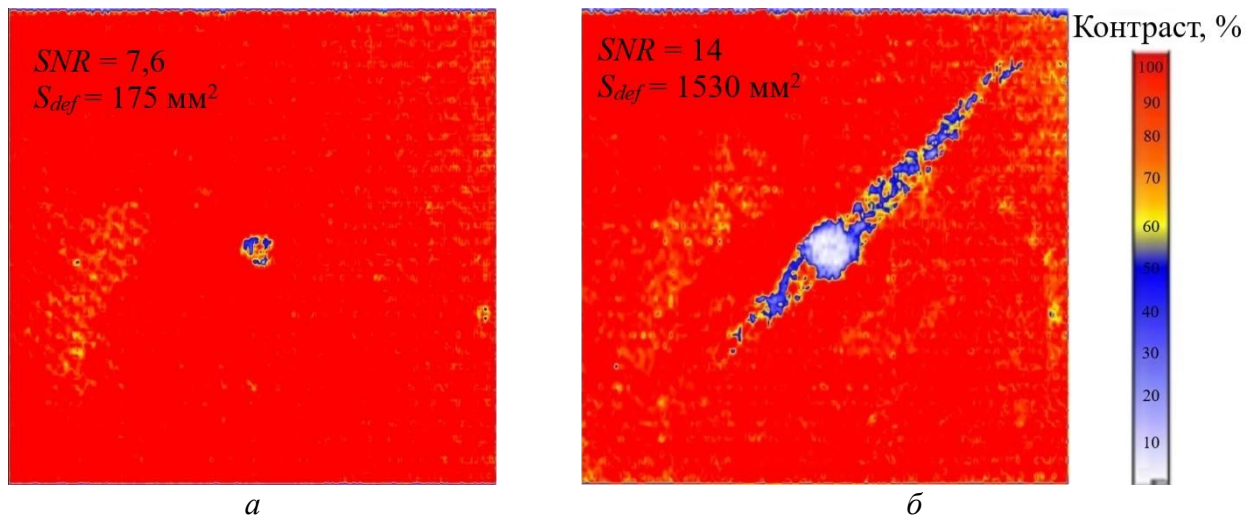


a – лицевая сторона пластины, *б* – обратная сторона пластины

Рисунок 2.23 – Изображение лицевой и обратной сторон пластины углепластикового композита с ударным повреждением энергией 16 Дж

УЗ неразрушающий контроль хорошо зарекомендовал себя для оценки целостности структуры в процессе послойного сканирования изделий

из композитных материалов. В связи с этим, указанный метод выбран в виде эталонного для оценки результатов лазерной виброметрии и предварительного тестирования композита. Ультразвуковое сканирование пластины CFRP осуществляли на линейном УЗ сканере Ideal System 3D с использованием фокусированного преобразователя (частота резонанса 15 МГц, диаметр 16 мм, глубина фокусировки 50,8 мм) с шагом сканирования 1 мм. Результаты УЗ контроля представлены в формате С-сканов и приведены на рисунке 2.24.



Глубина расслоения: $a - 0,1$ мм, $b - 1,4$ мм от контролируемой поверхности

Рисунок 2.24 – Результаты С-сканирования пластины углепластикового композита с использованием линейного ультразвукового сканирования (контраст от 0 до 100 %)

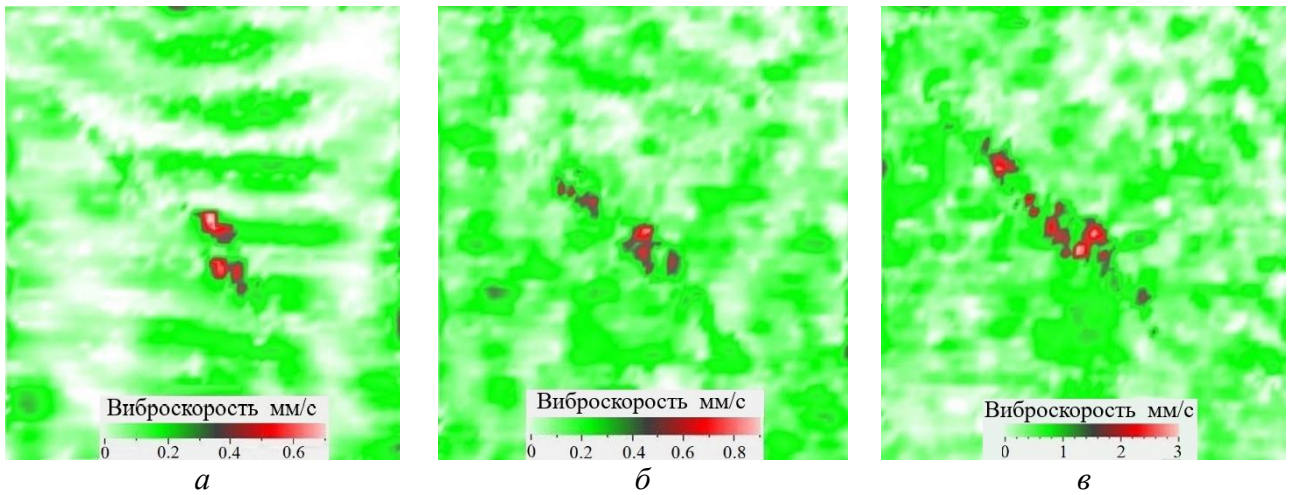
Из результатов послойного С-сканирования пластины следует наличие множественных воздушных полостей в структуре материала, площадь которых увеличивается с ростом глубины от поверхности нанесения удара. В частности, минимальная площадь расслоения, измеренная в ходе УЗ сканирования, составила 175 мм^2 на глубине $0,1$ мм (рисунок 2.24, a), а максимальное значение площади дефекта, равное 1530 мм^2 , было измерено на глубине $1,4$ мм (рисунок 2.24, b). Отношение сигнал/шум для двух изображений составило $7,6$ и 14 соответственно.

Наличие расслоений на различных слоях композита объясняется неравномерным распределением энергии удара в слоистом материале. В связи с этим, область дефекта представляет собой набор расслоений, расположенных на различных глубинах в материале в виде пирамиды. Указанная особенность

композиционных материалов также отразилась на результатах проведения лазерного вибросканирования.

Как было отмечено выше, процедура контроля качества с использованием лазерной виброметрии основана на определении резонансных частот дефектов в материалах для повышения эффективности их обнаружения. В особенности вибросканирование в режиме быстрого преобразования Фурье позволяет преобразовать регистрируемый сигнал из временной области в фазочастотную, детально исследовать вибрации на отдельных частотах спектра и произвести усреднение данных во всем частотном диапазоне.

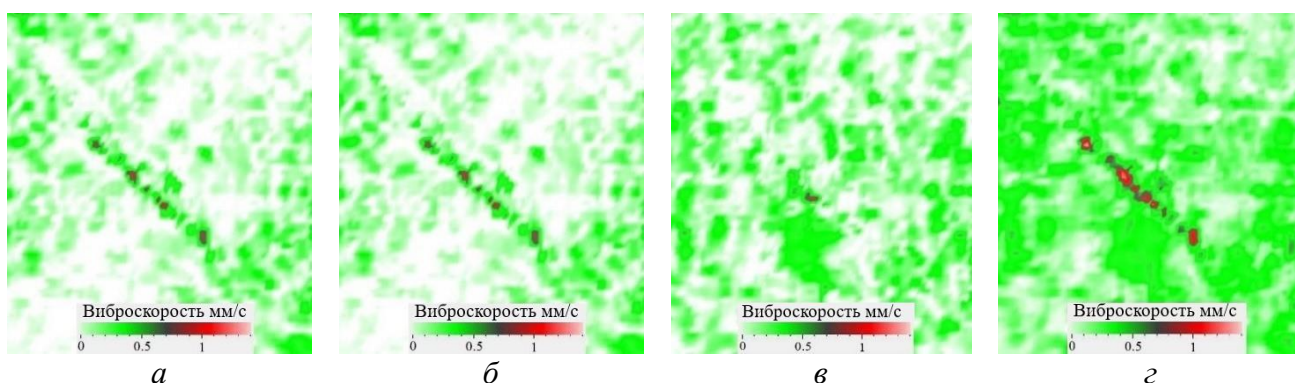
В рамках настоящего исследования лазерное 3D вибросканирование пластины из углепластикового композита позволило провести спектральный анализ многослойного ударного повреждения. Результаты контроля показали более 20 резонансных частот в диапазоне от 185 Гц до 100 кГц, на которых наблюдались интенсивные колебания в области расслоений. Амплитуда среднего значения скорости вибраций во всем спектре частот имеет максимальное значение по координате y и составляет 0,34 мм/с, что несколько больше аналогичного значения, измеренного по координатам x и z (0,23 мкм/с в двух случаях). Это показывает максимальный вклад деформации растяжения–сжатия при резонансной стимуляции ударного повреждения, однако не имеет принципиальной разницы для амплитуды сигналов. Пример усиления колебаний в области расслоений композита, возникающих на различных резонансных частотах дефекта (7,44 кГц; 32,8 кГц; 46,5 кГц) в диапазоне от 185 Гц до 100 кГц приведены на рисунке 2.25. Полученные результаты демонстрируют проявление резонансных колебаний многослойного дефекта в широком спектре частот.



Частота резонанса дефекта: $a - 7,44$ кГц, $b - 32,8$ кГц, $v - 46,5$ кГц

Рисунок 2.25 – Суммарные изображения резонансных вибраций на обратной стороне углепластикового композита на различных частотах резонанса дефекта

Помимо наличия резонансных гармоник высшего порядка в спектральном составе сигнала возбуждения, важный вклад в результирующий отклик дефекта вносят компоненты его колебаний. Как и в случае рассмотрения дефекта упрощенной геометрии, на каждой рассматриваемой частоте резонанса ударного повреждения локальное усиление колебаний пластины в области дефекта наблюдается в трех взаимно перпендикулярных плоскостях x , y и z . Однако в случае рассмотрения многослойного ударного повреждения формы колебаний дефекта различаются и имеют различные амплитуды вибраций. Указанная особенность продемонстрирована на рисунке 2.26 и отображает вклад компонент x и z в результирующую виброграмму на выборочной частоте резонанса дефекта (43,6 кГц).



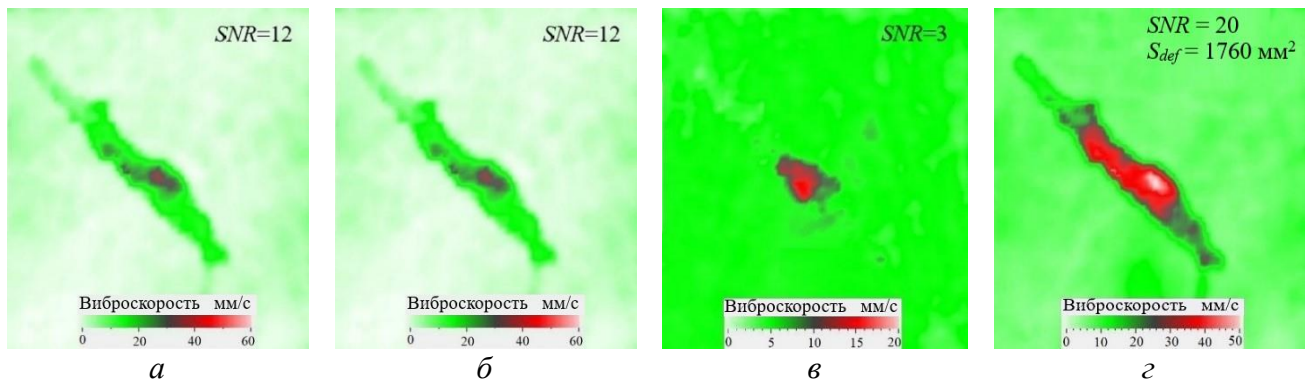
a – виброграмма углепластикового композита по координате *x*, *б* – виброграмма углепластикового композита по координате *y*, *в* – виброграмма углепластикового композита по координате *z*, *г* – виброграмма углепластикового композита по координатам *xz*

Рисунок 2.26 – Резонансные колебания в области ударного повреждения в углепластиковом композите на частоте 43,6 кГц, измеренные с использованием трехкомпонентной сканирующей лазерной доплеровской виброметрии

Приведенные на рисунке 2.26 результаты иллюстрируют пример распределения вклада *x*, *y*, *z* компонент колебаний в результирующий сигнал на конкретной частоте резонанса и позволяют понять фундаментальную основу происхождения резонансных явлений в области дефектов. Из полученных данных видно, что на каждой определенной частоте резонанса дефекта усиление амплитуды вибраций дефекта происходит по трем координатам. Деформации материала происходят как вне плоскости объекта исследования (*z*-компонента), так и в плоскости объекта исследования (*xу*-компонента), и имеют единую природу происхождения. В связи с этим, частота резонанса объединяет в себе колебания дефекта, возникающие одновременно в трех взаимно перпендикулярных плоскостях декартовой системы координат.

На рисунке 2.27 приведены виброграммы усредненных колебаний на поверхности углепластика во всем спектре измеряемых частот для трех компонент вибраций. Площадь дефекта, измеренная в процессе трехкомпонентной сканирующей лазерной виброметрии, составила 1760 мм² (рисунок 2.27, *г*), что соответствует 85 % от результатов УЗ контроля, полученных на задней поверхности композита (рисунок 2.24, *б*, рисунок 2.27, *г*). Таким образом, модулированный по частоте сигнал вовлекает в процесс колебаний всю зону

неоднородности за счет активации вибрации как основной частоты резонанса дефекта, так и ее высших гармоник. Данные результаты подтверждают необходимость использования широкополосного акустического сигнала для воспроизведения полной формы и размеров дефектов. Важно отметить, что максимальный вклад в изображение усредненных колебаний вносят деформации растяжения–сжатия (xu -компоненты) при резонансной стимуляции расслоений в углепластиковом композите.



a – виброграмма углепластикового композита, усредненная по координате x ,
 b – виброграмма углепластикового композита, усредненная по координате y ,
 v – виброграмма углепластикового композита, усредненная по координате z ,
 z – виброграмма углепластикового композита, усредненная по координатам xuz

Рисунок 2.27 – Виброграммы углепластикового композита, измеренные с использованием трехкомпонентной сканирующей лазерной доплеровской виброметрии и усредненные в диапазоне частот от 185 Гц до 100 кГц

Как видно из рисунка 2.27, амплитуда колебаний по координатам x и y достигает 50 мм/с, в то время как амплитуда вибраций по z -координате составляет лишь 15 мм/сек. При этом 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 углепластиковом 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.

2.5.3. Исследование физических свойств гибридных композиционных материалов с дефектами

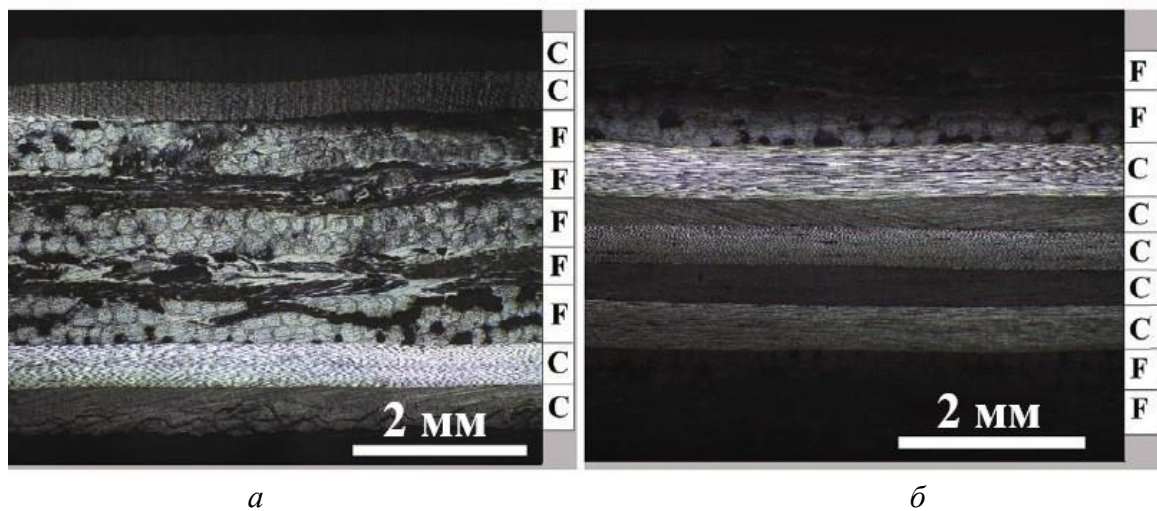
За последние два десятилетия экологические проблемы вызвали возобновление интереса к натуральным волокнам, используемым в качестве армирующих материалов в композитах с полимерной матрицей [199]. Определенное внимание уделяют сочетанию льна и углеродных волокон [200], что, в основном, продиктовано возможностью совмещения в одном материале высоких демпфирующих свойств льняных волокон и известных прочностных характеристик углеродных волокон [201–203]. Фактически потребность в упрочнении исторически была одной из ключевых причин гибридизации волоконной основы композитов [204]. Сарасини Ф. и др. [111] исследовали устойчивость к повреждениям после ударов с низкой энергией двух разных гибридных композитов лен/углерод, отличающихся последовательностью укладки слоев в виде сэндвича. Результаты показали, что за счет гибридизации можно улучшить устойчивость материалов к повреждениям, сохраняя при этом удовлетворительную остаточную прочность на изгиб и жесткость. В частности, конфигурация с углеродным сердечником и льняной оболочкой показала более высокую нормализованную остаточную прочность и сравнительно более низкую нормированную остаточную жесткость по сравнению с ламинатом из углеродного волокна. Было также отмечено, что при оптимизации отклика композита на ударные нагрузки крайне важно уделять внимание исследованиям ударных повреждений, особенно в случае обслуживания композитных конструкций. Поскольку структурная целостность композитных ламинатов представляет собой актуальную проблему в различных инженерных приложениях, для обеспечения желаемого уровня безопасности необходимо разрабатывать инновационные методы их неразрушающего контроля (НК). В связи с этим были предложены различные методы обнаружения повреждений в композитных конструкциях [205–209]. Тем не менее, НК слоистых композитов по-прежнему остается сложной задачей, особенно композитов с натуральными волокнами, которые характеризуются разнообразием механизмов повреждения. Неразрушающий контроль таких материалов дополнительно осложняется

анизотропией материала, приводящей к зависимости скорости волн от направления, различием свойств отдельных составляющих (например, тепло/электропроводность, жесткость и коэффициенты теплового расширения). Все эти факторы затрудняют обнаружение и количественную оценку повреждений.

Настоящее исследование является результатом сотрудничества между ТПУ (Томск, Россия), Сапиенца – Римским университетом (Рим, Италия) и Университетом Л’Акуилы (Л’Акуила, Италия) и посвящено дальнейшей разработке спектроскопического подхода в рамках техники лазерной виброметрии применительно к композитным материалам, которые подверглись ударным повреждениям энергией 10 Дж и 40 Дж. Фактически модулированная резонансная стимуляция применялась для улучшения обнаружения многокомпонентных дефектов, возникающих при механической нагрузке на гибридные композиты. В частности, некоторые особенности низкоамплитудных колебаний в поврежденных материалах, изготовленных из графитовых и льняных волокон (так называемых CFC- и FCF-композитов) в эпоксидной матрице, были проанализированы, чтобы продемонстрировать улучшение их прочностных характеристик. Приведенные ниже результаты исследований опубликованы в высокорейтинговом журнале [72].

В рамках данного исследования с использованием сканирующей лазерной виброметрии при резонансной стимуляции дефектов была определена способность гибридных композиционных материалов сопротивляться воздействию ударных нагрузок в зависимости от конфигурации слоев композита. Объектом исследования были выбраны пластины гибридных композитов, армированные натуральным и синтетическим волокном разной конфигурации и ослабленные ударными повреждениями с различной энергией удара. Композиты, используемые в настоящей работе, были изготовлены в автоклаве с использованием двух однонаправленных систем склеивания материалов на основе эпоксидной матрицы (180 г/м² для льна (F) и 300 г/м² для углерода (C)), поставляемой компанией Lineo и DeltaPreg SpA. Два различных типа гибридных ламинатов были изготовлены в соответствии со следующими конфигурациями: FCF $[(0_2/90_2)^F/(0_2/90_2)^C/0^C]_S$ и CFC $[(0_2/90_2)^C/(0_2/90_2)^F/0^F]_S$, оба характеризуются общей объемной долей волокна, равной 0,60. На рисунке 2.28 приведены микрофотографии образцов, полученные

с помощью оптического микроскопа Altami MET 1С, оснащенного 50-кратным увеличением. Исследуемые пластины размером $100 \times 150 \times 4$ мм³ подвергались ударным воздействиям энергией удара 10 Дж и 40 Дж при комнатной температуре в соответствии с международным стандартом ASTM D7136. Испытания на ударную нагрузку с низкой скоростью проводились с использованием ударной машины (CEAST/Instron 9340), оснащенной полусферическим наконечником (диаметром 16 мм). Масса падающего копера составила 4 кг, в то время как энергию удара задавали при соответствующем изменении высоты высвобождения падающей массы.



а – сечение CFC-композита, *б* – сечение FCF-композита

Рисунок 2.28 – Оптические микрофотографии поперечных сечений гибридных лен-углеродных композиционных материалов

Лабораторная установка сканирующей лазерной виброметрии (рисунок 2.1) при резонансной акустической стимуляции дефектов была применена к анализу ударных повреждений энергией 10 Дж и 40 Дж в гибридных композитах. В результате лазерной виброметрии были получены амплитудно-частотные спектры колебаний в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц и виброграммы исследуемых гибридных композитов (рисунок 2.29). При оценке гибридных композитов резонансные колебания были обнаружены в различных участках ударных повреждений на различных частотах. Возникновение множества резонансных пиков на амплитудно-частотном спектре обусловлено ламинированной структурой композита, где одиночные разрывы представляют собой независимые осцилляторы, характеризующиеся определенными частотами.

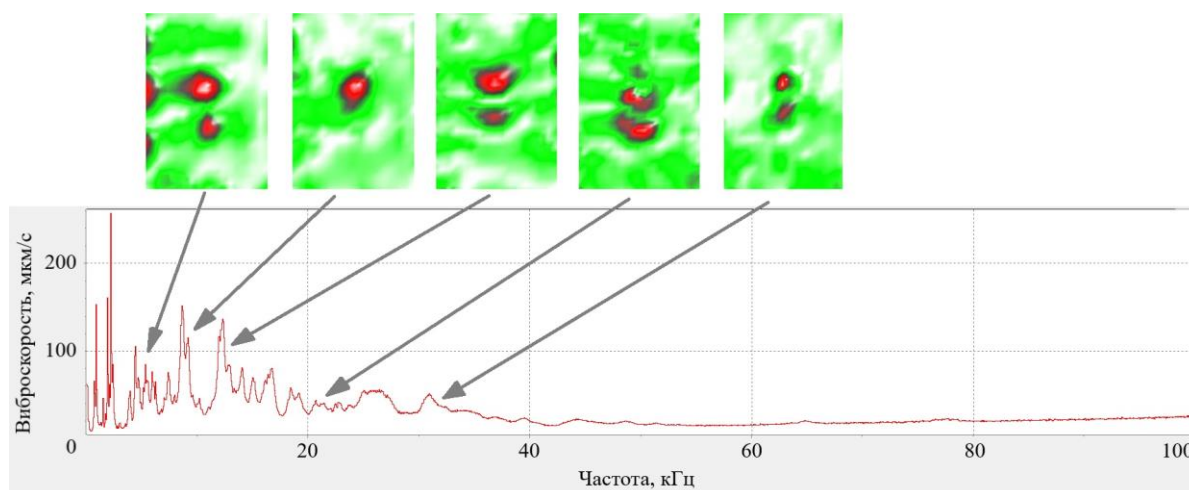
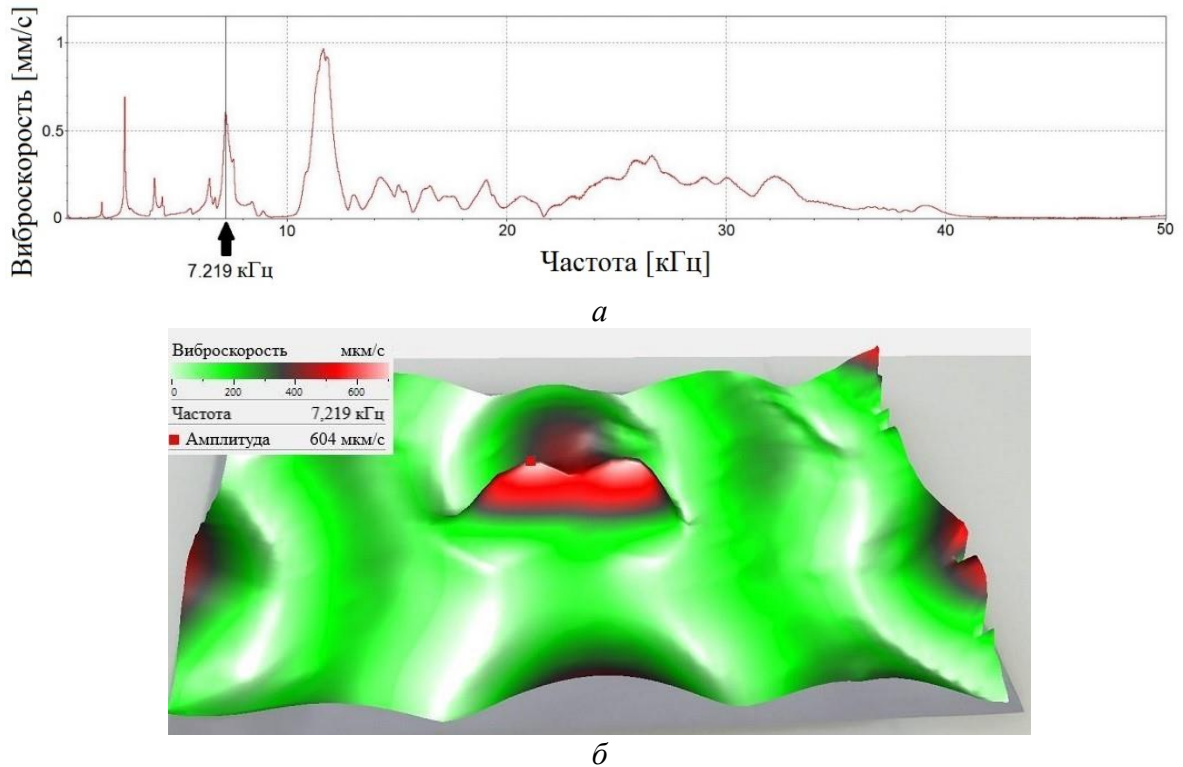


Рисунок 2.29 – Усредненный по амплитуде амплитудно-частотный спектр колебаний, полученный при широкополосной акустической стимуляции CFC-композита

Как упоминалось выше, из-за слоистой композитной структуры ударное повреждение представляет собой конусообразную агломерацию отдельных трещин и расслоений (субдефектов). Каждый субдефект может быть охарактеризован своей площадью и глубиной и рассматриваться как независимый резонатор, который активируется на определенной частоте. Такое предположение было подтверждено анализом амплитудно-частотных спектров колебаний, полученных при сканировании поверхности образца в режиме БПФ. Колебания поверхности CFC-композита (энергия удара 10 Дж) в зоне ударного повреждения наблюдались в широком диапазоне частот, начиная с 5 кГц. В связи с этим, в полученном амплитудно-частотном спектре колебаний проверяли происхождение каждого максимума амплитуды сигнала в заданном диапазоне частот с целью определить частоты резонанса дефекта, как показано на рисунке 2.29.

Важно отметить, что при проведении спектроскопического анализа можно определить конкретную резонансную частоту низшего порядка – f_{LDR} (рисунок 2.30), которая будет соответствовать колебаниям основной части дефекта. В настоящем исследовании было получено, что максимальная область дефекта, вовлеченная в процесс резонансных колебаний, представляет собой два расслоившихся участка (в англоязычной литературе используют термин «крылья

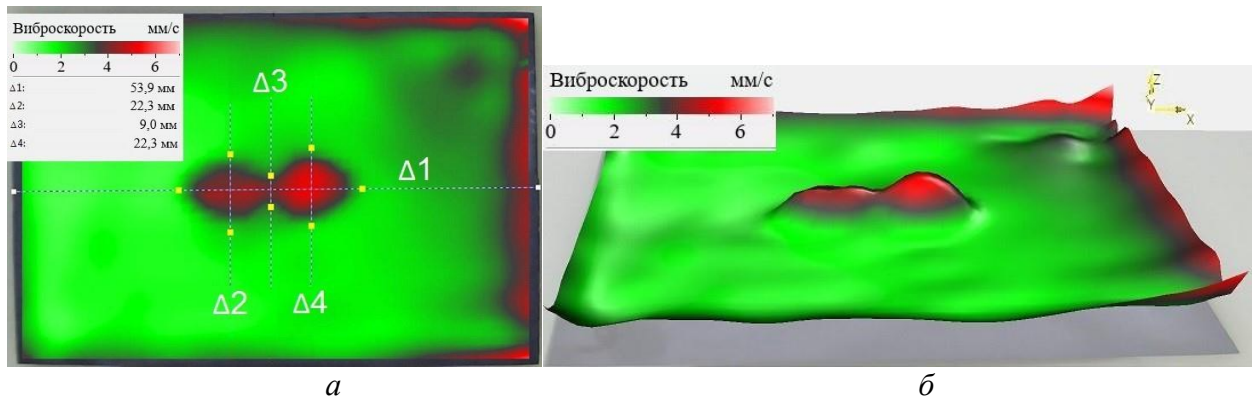
бабочки») и проявляется на частоте 7,219 кГц. Соответствующая виброграмма представлена на рисунке 2.30.



a – амплитудно-частотный спектр колебаний СФС-композита в диапазоне частот от 50 Гц до 50 кГц, *б* – виброграмма резонансных колебаний ударного повреждения на частоте 7,219 кГц

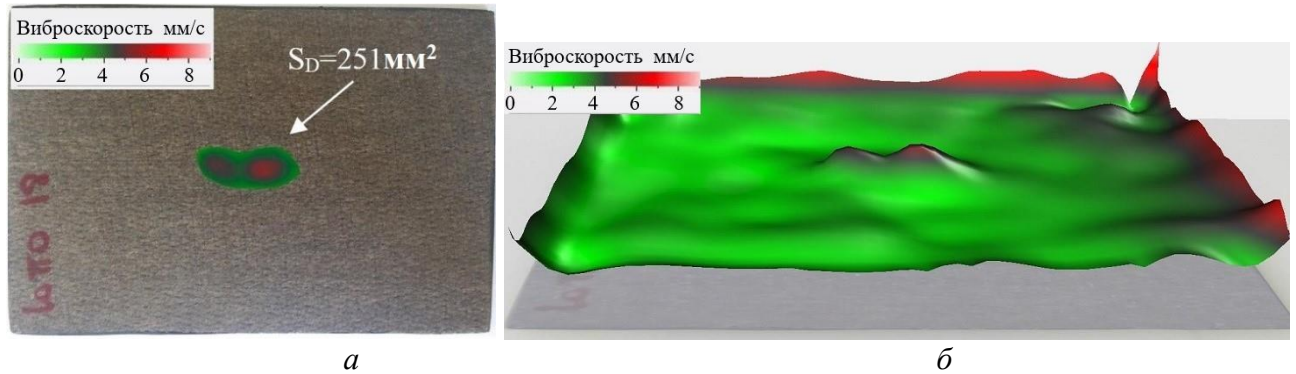
Рисунок 2.30 – Определение резонансных колебаний ударного повреждения энергией 10 Дж в результате анализа амплитудно-частотного спектра колебаний СФС-композита

Как было отмечено в разделе 2.5.1, с целью воспроизведения полной формы и размеров дефектов необходимо использовать усреднение данных, полученных при широкополосной акустической стимуляции композитов. В связи с этим, были получены виброграммы, отображающие распределение средней величины амплитуды колебаний гибридных композитов в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц. На основе полученных данных определены поперечные (латеральные) размеры дефектов ($\Delta 1$, $\Delta 2$) в образце СФС-композита (ударное повреждение 10 Дж) и в образце FCF-композита (ударное повреждение 10 Дж). Результаты приведены на рисунках 2.31, 2.32, а также сведены в таблицу 2.3.



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

Рисунок 2.31 – Определение поперечных размеров ($\Delta 1$ и $\Delta 2$) ударного повреждения (энергия удара 10 Дж) в CFC-композите путем анализа виброграмм, отображающих среднее значение амплитуды виброскорости в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц



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

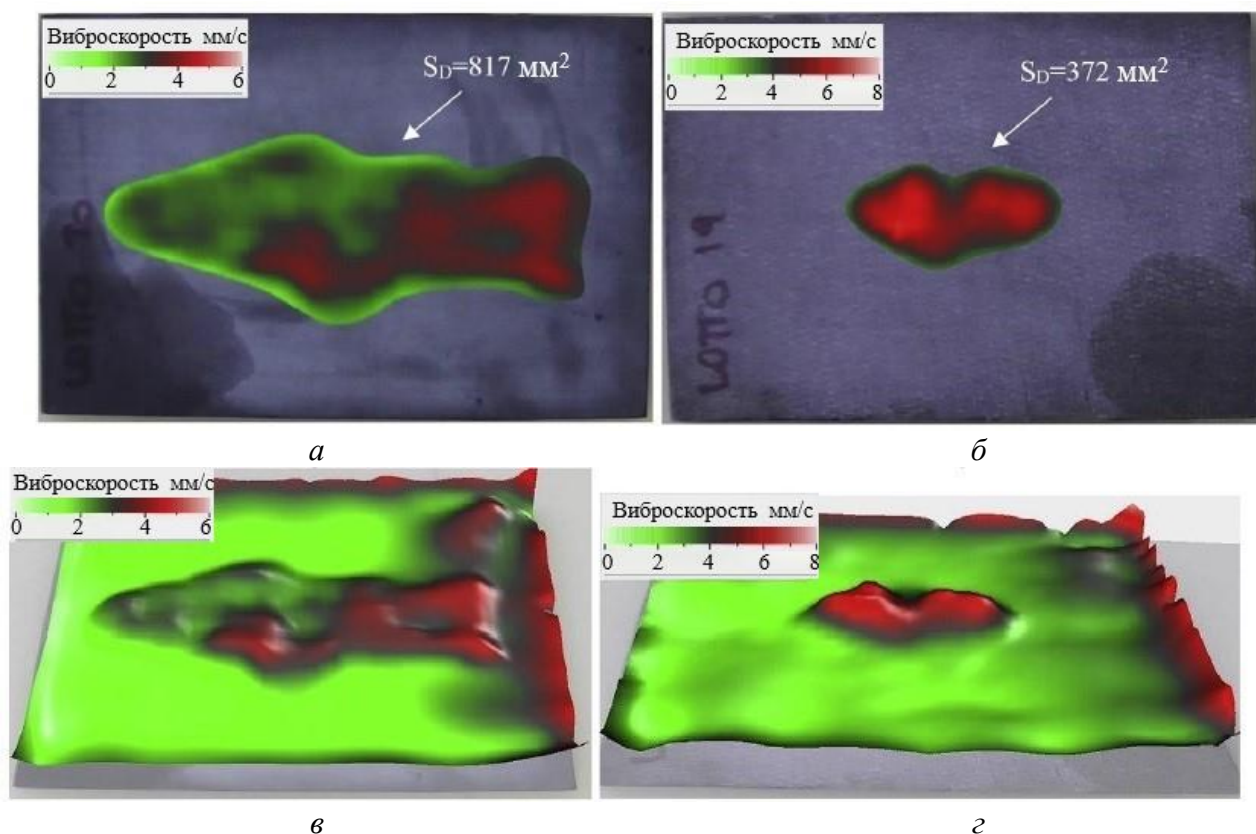
Рисунок 2.32 – Определение площади ударного повреждения (энергия удара 10 Дж) в FCF-композите путем анализа виброграмм, отображающих среднее значение амплитуды виброскорости в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц

Таблица 2.3 – Экспериментальные оценки площади дефектов и демпфирующие характеристики гибридных композитов CFC- и FCF-конфигурации, с ударными повреждениями энергией 10 и 40 Дж

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

В образце с льняным сердечником, CFC-конфигурация (энергия удара 10 Дж), оцененная площадь ударного повреждения была равна 660 мм², что составляет 4,7 % общей площади образца (рисунок 2.31), в то время как в гибридном композите с льняным покрытием, FCF-конфигурация (рисунок 2.32, таблица 2.3), при аналогичной энергии удара измеренная площадь дефекта составила 250 мм², что эквивалентно 1,7 % общей площади образца. Полученный результат доказывает, что удар 10 Дж создает в образце FCF дефект, примерно в 2,8 раза меньшей площади, чем в образце CFC. Помимо оценки площади дефектов, было определено отношение сигнал/шум (*SNR*) применительно к анализу данных на виброграммах с использованием выражения (2.33). В частности, в образцах CFC и FCF (энергия удара 10 Дж) рассчитанные величины *SNR* составили 15,2 и 8,7 соответственно, демонстрируя меньший уровень повреждения в образце, имеющем льняное покрытие. Это подтверждает демпфирование ударного поглощения в CFC-композите, обеспечиваемое поверхностными льняными слоями.

Аналогичные результаты получены на гибридных композитах CFC- и FCF-конфигураций, подвергнутых удару 40 Дж (рисунок 2.33). В результате лазерного вибросканирования показано, что в образце FCF (энергия удара 40 Дж) также наблюдается эффект демпфирования ударов слоями льна. Удары энергией 40 Дж привели к появлению видимой области дефекта в FCF композите (примерно 370 мм²), что в 2,2 раза меньше, чем в образце CFC (примерно 820 мм²) (таблица 2.3). Рассчитанные величины *SNR* для этих двух образцов (с энергией удара 40 Дж) составили 10,9 и 9,5 соответственно (таблица 2.3). По-видимому, воздействие ударного повреждения с высокой энергией вызывает сходные эффекты распространения области дефекта в двух рассматриваемых конфигурациях гибридных композитов, но измеренная область дефекта значительно больше в образцах с льняным сердечником и углеродным покрытием (CFC-конфигурация).



a, б – образцы композитов CFC, *в, г* – образцы композитов FCF

Рисунок 2.33 – Дефектометрия образцов композитов CFC и FCF, подвергнутых ударным повреждениям 40 Дж на виброграммах, отображающих среднюю амплитуду колебаний в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц

В ходе стимуляции гибридных композитов частотно-модулированным акустическим сигналом рассеяние акустических волн в области дефектов привело к амплитудным и фазовым изменениям входного сигнала из-за резонансного взаимодействия упругих волн со структурными неоднородностями. Локальное увеличение амплитуды колебаний в центре образца указало на наличие дефекта. Эффективность резонансной стимуляции оценивали отношением интенсивностей УЗ волн как в поврежденной (I_1), так и в бездефектной (I_2) зонах:

$$L_{12} = 10 \lg \frac{I_1}{I_2} \quad (2.34)$$

Интенсивность волны определялась как:

$$I = \frac{1}{2} v^2 \rho c$$

где v – скорость вибрации материала,

ρ – плотность материала,

c – скорость звука материала.

В этом случае усиление или уменьшение фронта плоской гармонической бегущей волны, проходящей через дефектную область, определяли отношением интенсивностей волн в двух точках, что эквивалентно отношению квадратов амплитуд колебаний частиц среды. Стоит отметить, что в качестве точек измерения были использованы области, определенные автоматически в выбранных поврежденных/неповрежденных зонах с максимальной амплитудой акустической волны.

При анализе распространения волн в гибридных композитах были определены характеристики демпфирования материалов, что позволило оценить, насколько легко звуковые волны проникают в две исследуемые гибридные конструкции. Для этой цели использовалась оценка логарифмического декремента (δ) затухания, определяемого как натуральный логарифм отношения между амплитудами любых двух последовательных положительных пиков затухающей волны:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{x(t)}{x(t+nT)}, \quad (2.35)$$

где $x(t)$ – амплитуда максима фронта волны в моменты времени t и $t+nT$,

T – период волны,

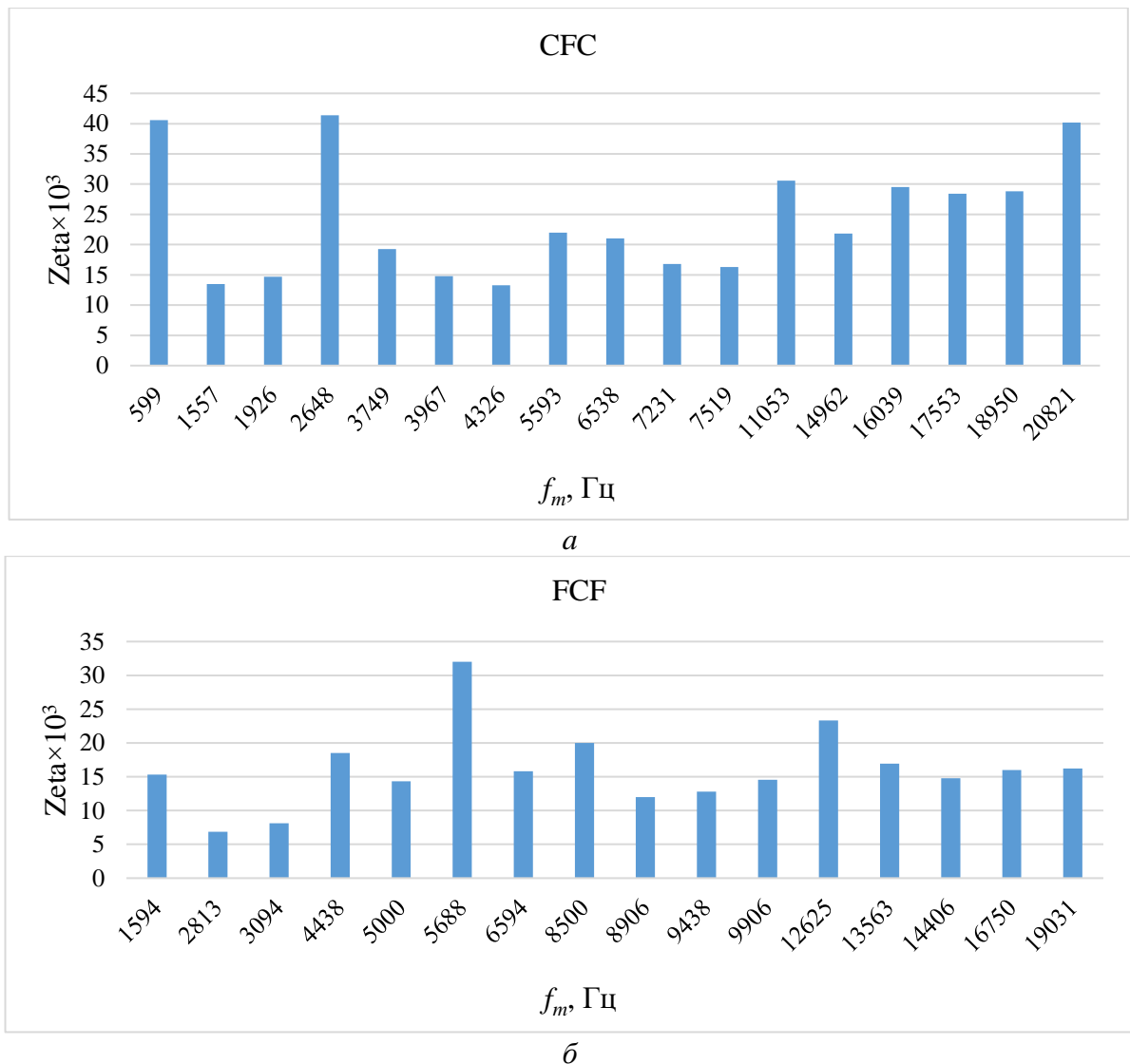
n – любое целое число последовательных пиков.

Коэффициент затухания ζ определяют по отношению к критическому коэффициенту затухания, и его можно выразить через логарифмический декремент затухания следующим образом [210]:

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta}\right)^2}}. \quad (2.36)$$

Для оценки характеристик демпфирования гибридных композитов с использованием лазерной виброметрии был проанализирован динамический отклик CFC и FCF образцов при их акустической стимуляции в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц. На рисунке 2.34 приведены диаграммы, отражающие максимальные значения коэффициента демпфирования ($Zeta \times 10^3$) для всех

модальных составляющих гибридных композитов CFC (рисунок 2.34, *а*) и FCF (рисунок 2.34, *б*) конфигураций, определенные в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц.



а – композиты CFC, *б* – композиты FCF

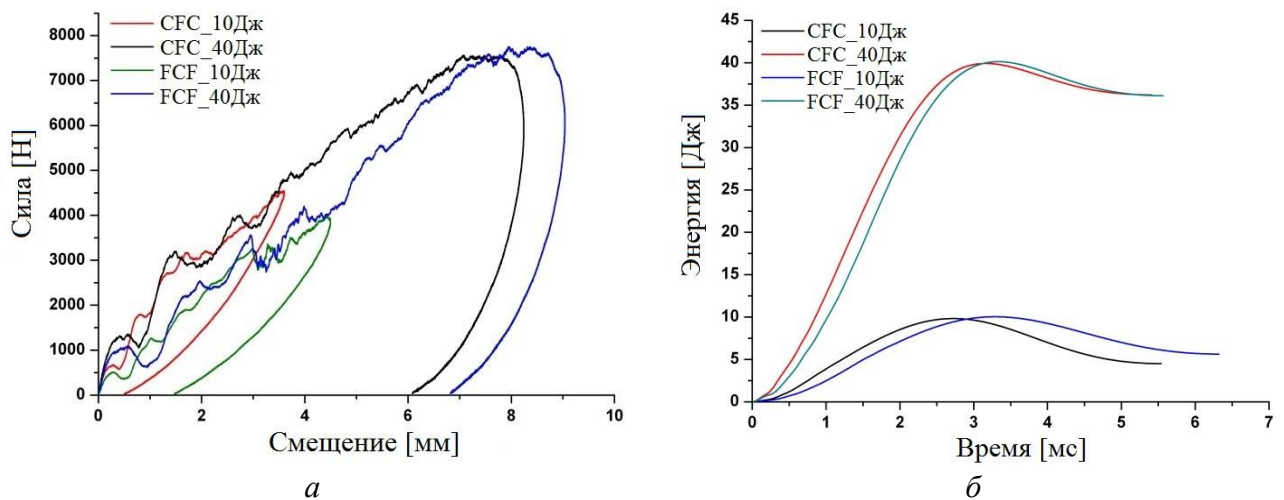
Рисунок 2.34 – Определение характеристик демпфирования композитов CFC и FCF по модальным составляющим

Средние величины коэффициентов демпфирования гибридных композитов, измеренные в диапазоне частот от 0 Гц до 20 кГц, составили 0,544 (CFC-конфигурация) и 0,895 (FCF-конфигурация) в диапазоне частот от 20 Гц до 50 кГц.

Анализ экспериментальных результатов показал, что композиты CFC-конфигурации способны поглощать большее количество энергии по сравнению с композитами FCF-конфигурации. Хорошие демпфирующие характеристики

композитов с льняным покрытием (FCF-конфигурация) позволяют рассеивать большее количество энергии в результате нанесения удара в структуре материала и улучшить сопротивление композитов ударным нагрузкам по сравнению с композитами, имеющими углеродное покрытие. Таким образом, наличие хороших демпфирующих свойств композиционных материалов оказывает существенное влияние на выявляемость структурных неоднородностей при проведении лазерного вибросканирования и является ключевым фактором устойчивости композитов к ударным нагрузкам.

Далее в ходе проведения испытаний материалов на растяжение (сжатие) для двух рассмотренных конфигураций композитов были получены замкнутые кривые сила–смещение (рисунок 2.35, *а*) и энергия–время (рисунок 2.35, *б*).



а – зависимость сила–смещение, *б* – зависимость энергия–время

Рисунок 2.35 – Зависимости сила–смещение и энергия–время для двух конфигураций гибридных композитов с ударными повреждениями энергией 10 Дж и 40 Дж

Установлено, что пиковая нагрузка существенно зависит от энергии ударного повреждения в исследуемых образцах при увеличении уровня энергии. Из-за более высокой жесткости композитов CFC более высокая пиковая сила реакции наблюдалась при более низкой энергии удара; ситуация менялась с увеличением энергии удара, тем самым предполагая более значительный ущерб от нанесения ударного повреждения в композитах CFC-конфигурации. Что касается поглощения

энергии, лучшая устойчивость к ударным нагрузкам наблюдалась в композитах FCF-конфигурации, особенно при наличии удара энергией 10 Дж. Это объясняется рассеиванием большого количества энергии удара в слоях льняных волокон композита, что не приводит к серьезным повреждениям благодаря скомпенсированному поведению льна и углерода. Таким образом, в композитах FCF-конфигурации присутствие льняного покрытия имеет тенденцию к большему сдерживанию энергии от ударных нагрузок. Однако ударные повреждения приводят к поглощению энергии не только за счет внутренних повреждений, но и за счет упругопластической деформации. При рассмотрении повреждений энергией 40 Дж, в случае одинаковой энергии поглощения для двух рассматриваемых конфигураций гибридных материалов (FCF и CFC), большое значение энергии нанесенного удара не привело к существенному повреждению композитов с льняным покрытием, однако, способствовало более высокой деформации в области дефекта. Этот факт также был подтвержден исследованиями ударных повреждений энергией 10 Дж для указанных двух типов укладки льняных/углеродных волокон. Таким образом, льняные покрытия композитов более эффективно препятствовали распространению трещин в углеродной матрице при ударных воздействиях.

На основе выполненных исследований продемонстрировано, что лазерная виброметрия является эффективным средством обнаружения ударных повреждений в композитах благодаря резонансной УЗ стимуляции дефектов. Данный метод позволяет оптимизировать конфигурацию гибридных композитов с целью обеспечения лучших демпфирующих характеристик и устойчивости материалов к ударным нагрузкам.

Из полученных данных также следует, что лазерная виброметрия при резонансной стимуляции дефектов может быть использована для количественной оценки степени повреждения и оптимизации укладки слоев композиционных материалов, включая гибридные конфигурации натуральных и синтетических волокон, характеризующихся различными механическими свойствами.

2.5.4. Исследования объектов космического назначения с использованием лазерной виброметрии на примере испытаний наноспутника (CubSat) и Российского «3D-принтера»

Отдельным примером эффективного использования лазерной виброметрии для проведения неразрушающих испытаний реальных образцов ракетно-космического назначения является контроль качества корпуса наноспутника «Томск-ТПУ-120», изготовленного с применением аддитивных технологий. Следует отметить, что важным преимуществом 3D-печати является возможность изготовления компонентов и структур сложной формы, в том числе для авиационной техники [211–213]. Однако в дополнение к высокой технологичности, процесс аддитивного производства должен обеспечивать формирование бездефектных структурно-интегральных компонентов, особенно предназначенных для применения в авиакосмической отрасли. В связи с этим, разработка надежного и эффективного метода НК изделий, изготовленных с использованием 3D печати, является актуальной и важной задачей научных исследований. Необходимо подчеркнуть, что применение традиционных методов НК для контроля качества таких изделий может быть ограничено специфичностью процесса аддитивного производства, поскольку структурные неоднородности, а также механическая анизотропия многокомпонентных материалов сложной формы делают обычную интерпретацию результатов неразрушающего контроля нетривиальной задачей [214, 215].

Неразрушающий контроль наноспутника «Томск-ТПУ-120» проводили совместно с определением его динамических характеристик с помощью метода лазерно-виброметрического неразрушающего контроля. Динамические характеристики корпуса наноспутника «Томск-ТПУ-120» экспериментально исследовали в процессе акустической стимуляции изделия и лазерного сканирования вибраций на его поверхности в режиме быстрого преобразования Фурье. Для ввода акустического сигнала в объект исследования использовали широкополосный ПЭП, размещенный под корпусом без дополнительного

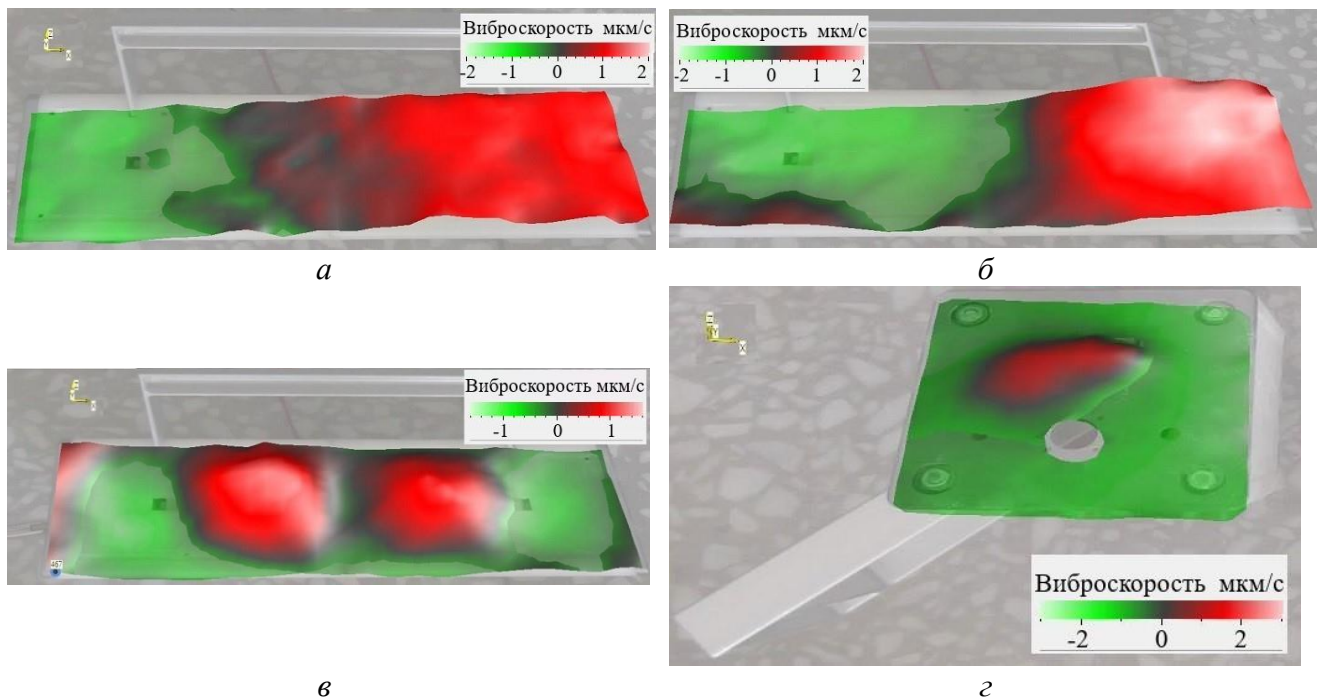
закрепления. Выборку данных для оценки модальных параметров совмещали с измерениями амплитудно-частотного спектра колебаний корпуса наноспутника с количеством спектральных линий 6400 (шаг сканирования 15,625 Гц) в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц. Измерение амплитуды скорости вибраций на поверхности материала проводили с шагом сетки сканирования, равным 3 мм. Измерение скорости вибраций на поверхности корпуса наноспутника проводили до достижения устойчивого состояния системы в соответствии с заданной частотой следования возбуждающих импульсов (50 Гц).

Полученные данные позволили оценить гармонические составляющие колебаний на поверхности материала, а именно – определить собственные частоты и формы колебаний исследуемого наноспутника. Резонансные частоты корпуса устройства были определены в диапазоне от 10 Гц до 2,5 кГц при механических уровнях перегрузки, характерных для отсеков космических аппаратов и соответствующих различным этапам полета. Анализ амплитудно-частотного спектра вибраций на поверхности наноспутника позволил определить резонансные частоты корпуса (f_0) в каждом диапазоне частот ($f_1 - f_2$), где уровень вибрации был высоким. Экспериментальные значения резонансных частот колебаний и коэффициентов демпфирования (ζ) корпуса наноспутника приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты экспериментального модального анализа корпуса наноспутника «Томск-ТПУ-120», полученные с использованием лазерной виброметрии

Мода	f_0 , Гц	Частотный диапазон		ζ	Описание
		f_1 , Гц	f_2 , Гц		
1	172	156	203	0.111	1 мода изгиба корпуса
2	313	281	344	0.07	1 мода кручения корпуса
3	594	547	647	0.118	2 мода изгиба корпуса
4	906	750	969	0.093	2 мода кручения корпуса и 3 мода изгиба корпуса
5	1063	1000	1188	0.072	1 мода изгиба крышки
6	2281	2047	2500	0.034	Высшая мода изгиба корпуса

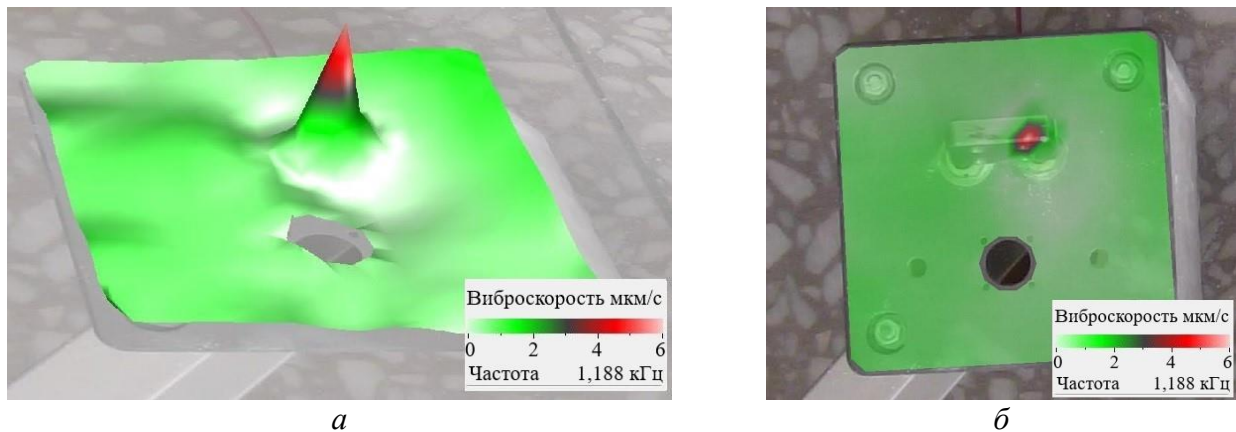
В результате модального анализа в диапазоне частот от 10 Гц до 2,5 кГц определены шесть мод колебаний корпуса наноспутника (таблица 2.4). В частности, первая изгибная мода колебаний корпуса определена на частоте 172 Гц, а первая мода кручения – на частоте 313 Гц (рисунок 2.36).



Частоты: *а* – 172 Гц, *б* – 313 Гц, *в* – 594 Гц, *г* – 1063 Гц

Рисунок 2.36 – Резонансные колебания корпуса наноспутника «Томск-ТПУ-120»

При измерении модальных составляющих искажения формы колебаний корпуса наноспутника в целом отсутствовали, что свидетельствует о правильной компоновке основных элементов наноспутника и равномерном распределении нагрузки. Тем не менее, исследование торцевых частей корпуса на стороне крепления антенны показало искажение формы резонансных вибраций в диапазоне частот от 1000 Гц до 1800 Гц. С целью определения дефектов элементов корпуса, расположенных на торцевой части наноспутника, помимо модальных испытаний, было проведено дальнейшее исследование вибраций в указанном частотном диапазоне. В частности, при детальном анализе вибраций на поверхности корпуса наноспутника «Томск-ТПУ-120» в диапазоне частот от 1000 Гц до 1800 Гц было обнаружено наличие локального резонанса дефекта на частоте 1,19 кГц на крышке изделия. Резонансные колебания сопровождались локальным увеличением амплитуды виброскорости от 1,5 мкм/с в бездефектной зоне до 6 мкм/с в области дефекта. Виброграммы, отражающие резонансных колебания боковой крышки корпуса наноспутника приведены на рисунке 2.37, в том числе с графической прозрачностью 80 % (рисунок 2.37, б).



Виброграммы с графической прозрачностью: *а* – 0 %, *б* – 80 %

Рисунок 2.37 – Виброграммы резонансных колебаний дефекта на поверхности крышки наноспутника на частоте 1,19 кГц

Как видно из полученных виброграмм, локальное усиление амплитуды колебаний ($SNR = 17,5$) на частоте 1,19 кГц свидетельствует о наличии дефекта. В условиях настоящего эксперимента интенсивные колебания не связаны

с наличием дефекта в структуре материала. Появление интенсивных вибраций связано с дефектом сборки в месте крепления фидера антенны на крышке корпуса. Следует заметить, что дефекты сборки космических спутников не допускаются, поскольку они могут привести к ухудшению передачи данных. Поэтому выявленный дефект в виде ослабления соединений элементов на крышке наноспутника был устранен, а состояние устройства оценено как удовлетворительное. Других дефектов на поверхности наноспутника, приводящих к локальному снижению жесткости устройства, в процессе его вибросканирования обнаружено не было, что свидетельствует о хорошем качестве печати корпуса и соединения составляющих элементов.

Резюмируя вышеизложенное, стоит отметить, что результаты НК корпуса наноспутника «Томск-ТПУ-120» подтвердили возможность использования лазерной виброметрии при акустической стимуляции для оценки качества изделий ракетно-космической техники, изготовленных методом 3D-печати. В частности, при проведении модального анализа наноспутника «Томск-ТПУ-120» в транспортировочном состоянии экспериментально определены резонансные частоты корпуса, а также демпфирующие характеристики изделия. В диапазоне частот от 10 Гц до 2,5 кГц экспериментально определены шесть мод колебаний корпуса наноспутника. При вибрационных испытаниях корпуса изделия на частоте 1,19 кГц обнаружен дефект на торцевой части наноспутника в виде ослабления соединения одного из фидеров антенны. Локальное увеличение амплитуды виброскорости в зоне дефекта составило 6 мкм/с по сравнению с 1,5 мкм/с в бездефектной зоне (отношение сигнал/шум 17,5). Других дефектов на поверхности наноспутника обнаружено не было, что свидетельствует о хорошем качестве печати и соединения составляющих элементов корпуса. Из полученных результатов следует, что метод лазерно-виброметрического неразрушающего контроля может быть эффективно использован для проведения НК испытаний изделий авиакосмического назначения, изготовленных с использованием аддитивных технологий.

По итогам модального анализа и неразрушающего контроля наноспутник «Томск-ТПУ-120» был допущен к натурным механическим испытаниям в НПО «Энергия». В результате проведенных испытаний было сделано заключение о том, что данное изделие исправно и может быть выпущено на орбиту. 31 марта 2016 г. с космодрома Байконур стартовал грузовой корабль «Прогресс МС-02», который доставил наноспутник на борт Международной космической станции, а 17 августа 2016 г. состоялся запуск с борта Международной космической станции наноспутника «Томск-ТПУ-120». На рисунке 2.38 приведены фотографии наноспутника «Томск-ТПУ-120» в транспортировочном состоянии и в процессе работы с ним космонавтами на МКС.



а



б

а – фотография наноспутника в транспортировочном состоянии,
б – фотография космонавтов с наноспутником перед его выпуском в космос

Рисунок 2.38 – Наноспутник «Томск-ТПУ-120» в транспортировочном состоянии и в процессе работы с ним космонавтами на МКС

Технологии аддитивного производства материалов и изделий в настоящее время находят все более широкое применение в космосе, привлекая внимание исследователей по всему миру к созданию новых высокотехнологичных устройств для 3D печати. Развитие аддитивного производства в области космических технологий и материаловедения в свою очередь сопровождается адаптацией разрабатываемых устройств к специфическим условиям выведения на орбиту, эксплуатации и воздействию физических факторов космического пространства [216], что в последнее десятилетие освещено в ряде научных работ по указанной тематике [217, 218].

Разработкой 3D-принтеров, способных работать в условиях микрогравитации, занимаются инженерные коллективы разных стран. В настоящее время на МКС находится несколько 3D-принтеров, включая космический 3D-принтер, разработанный в Томском политехническом университете (ТПУ) совместно с РКК «Энергия» имени С. П. Королева и Томским государственным университетом (ТГУ) (рисунок 2.39.). Устройство предназначено для аддитивного производства изделий из полимерных материалов ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол) и PLA (полилактид) в условиях микрогравитации.



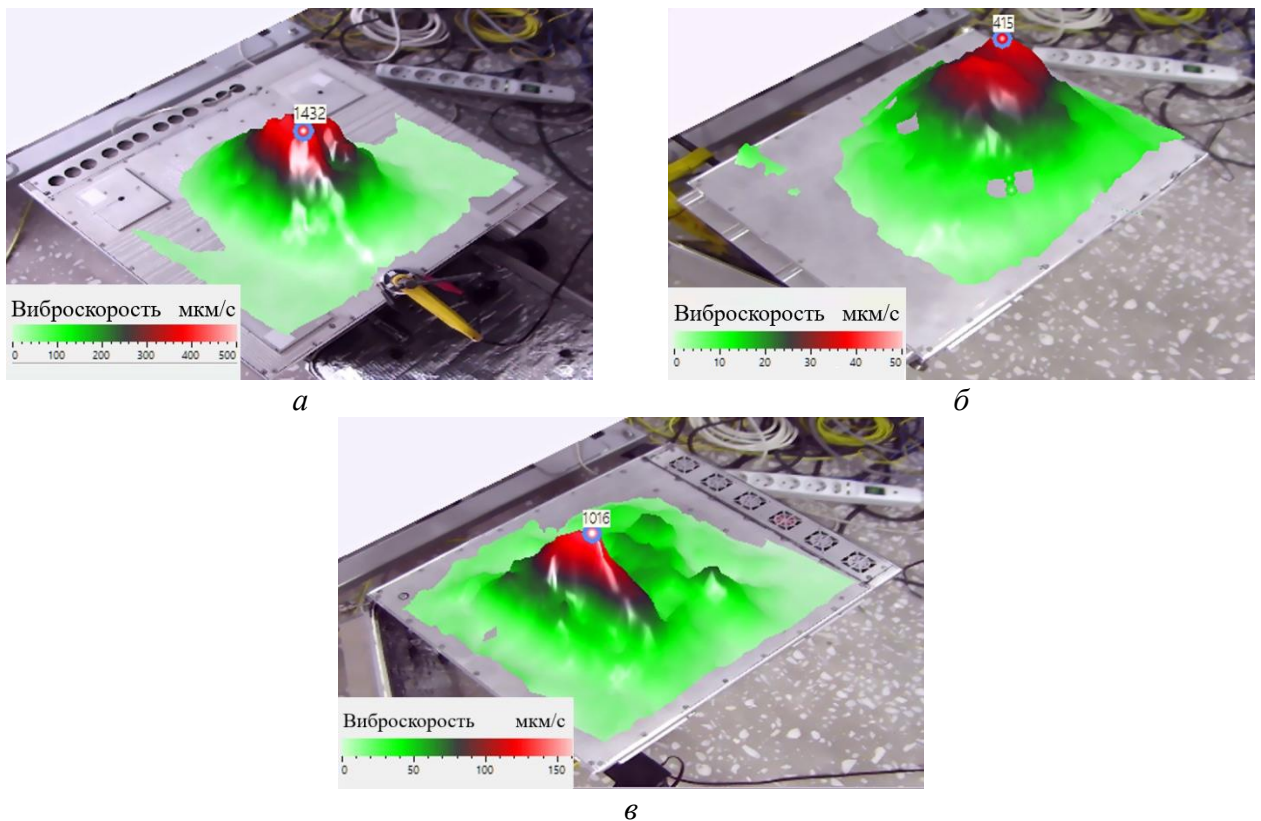
Рисунок 2.39 – Российский «3D-принтер», разработанный и изготовленный ТПУ с участием РКК «Энергия» и ТГУ [219]

Разработанный для космического эксперимента 3D принтер прошел вибропрочностные испытания на соответствие требованиям выведения на орбиту в составе доставляемых грузов ТГК «Прогресс» и эксплуатации в обитаемом контуре РС МКС, определенными ТЗ на «3D-принтер». Применение модального анализа с использованием сканирующей лазерной доплеровской виброметрии позволило дополнить получение информации о вибропрочности отдельных узлов конструкции, особенно подвижных или труднодоступных для контроля, а также рассматривать данный метод в отдельных случаях как альтернативу испытаниям на вибростендах. В частности, динамические характеристики 3D принтера экспериментально исследовали с использованием ультразвуковой диагностической системы на основе сканирующего лазерного доплеровского

виброметра, ранее применявшейся для неразрушающего контроля корпуса SubSat «Томск-ТПУ-120» по аналогичной методике.

В результате проведения лазерного вибросканирования определены резонансные частоты корпуса принтера и построены изображения колебаний объекта на следующих элементах: верхняя крышка корпуса, боковина левая, боковина правая. Дополнительно определены резонансные частоты привода печатающей головки в трех положениях (верхнем, нижнем и среднем).

При исследовании трех сторон корпуса принтера получено, что частота основного резонанса устройства зарегистрирована на 150 Гц. Распределение вибраций на корпусе принтера на указанной частоте приведено на рисунке 2.40, вибрационные характеристики (v_z и Δx_z – амплитуда виброскорости и виброперемещения колебания частиц на поверхности корпуса принтера по z координате, Q – добротность) обобщены в таблице 2.5.



a – верхняя крышка; *б* – правая боковина; *в* – левая боковина

Рисунок 2.40 – Распределение вибраций корпуса принтера на частоте основного резонанса

Таблица 2.5 – Определение вибрационных характеристик корпуса принтера на частоте основного резонанса

Поверхность измерения	Частота, Гц	v_z , мкм/с	Δx_z , нм	Q
Верхняя крышка	150	69	73,2	21,5
Правая боковина	150	18,2	19,3	11,6
Левая боковина	150	34	36	13,6

Ввиду наличия ребер жесткости на внутренней части принтера вибрации на внешней поверхности принтера распределены неравномерно. Однако следует отметить, что на всех трех исследуемых поверхностях (рисунок 2.40) наблюдается значительное увеличение амплитуды колебаний в центральной части, что характерно для первой резонансной частоты колебаний конструкций. Максимальная амплитуда виброскорости и виброперемещения была зарегистрирована на верхней крышке корпуса принтера, что составило 69 мкм/с и 73,2 нм соответственно. Амплитуда вибраций на левой боковине корпуса принтера снижается в два раза (до 34 мкм/с) по сравнению с амплитудой сигнала на верхней крышке устройства, а соответствующее значение вибрационного сигнала на правой боковине снижается в три раза до 18,2 мкм/с.

Исследование движущихся частей и внутренних элементов космической техники ввиду их повышенной чувствительности к вибрациям является одной из приоритетных задач вибрационных испытаний. В связи с этим, в рамках настоящей работы проведено исследование вибрационных характеристик печатающей головки, расположенной во внутренней части разрабатываемого 3D принтера, с использованием лазерной виброметрии при широкополосной акустической стимуляции корпуса. Важно отметить, что ввиду бесконтактного характера измерения колебаний лазерная виброметрия позволяет проводить виброизмерения в труднодоступных зонах, таких как печатающая головка принтера, с использованием зеркал. При этом зеркало размещается таким образом, чтобы отраженный лазерный луч (пятно луча 60–100 мкм) попадал на поверхность исследуемого элемента. При проведении настоящего исследования с целью осуществления доступа лазерного луча к печатающей головке технологическая

дверца корпуса принтера находилась в открытом состоянии, однако это не повлияло на жесткость конструкции ввиду низкой амплитуды воздействующего акустического сигнала. Лазерное вибросканирование проводилось в трех положениях печатающей головки: верхнем (близкое расположение к технологической дверце корпуса принтера), нижнем (в глубине корпуса принтера) и среднем.

В результате проведения лазерного вибросканирования получен амплитудно-частотный спектр колебаний и измерены вибрационные характеристики печатающей головки в диапазоне частот от 100 Гц до 200 Гц. В таблице 2.6 приведены результаты измерения вибрационных характеристик торцевой поверхности привода по x - y - z -координатам при изменении положения печатающей головки.

Таблица 2.6 – Вибрационные характеристики привода по x - y - z -координатам при изменении положения печатающей головки

Положение печатающей головки	Частота, Гц	v_x , мм/с	v_y , мм/с	v_z , мм/с	Δx_x , мкм	Δx_y , мкм	Δx_z , мкм
Верхнее	100	2,44	0,61	0,99	3,19	1,6	1,97
	150	2,06	0,54	0,87	1,94	0,57	0,92
	200	1,17	0,37	0,61	1,86	0,49	0,79
Среднее	100	2,65	0,95	1,53	4,22	1,5	2,4
	150	1,06	0,59	0,94	1,76	0,63	0,99
	200	0,98	0,35	0,56	0,78	0,28	0,45
Нижнее	100	2,1	0,76	1,24	3,35	1,21	1,97
	150	1,76	0,64	1,01	1,87	0,68	1,07
	200	0,87	0,32	0,5	0,69	0,26	0,4

Из полученных данных следует, что амплитуда сигнала виброскорости/виброперемещения по x - y - z -координатам достигает максимального значения на частоте основного резонанса конструкции (100 Гц) и постепенно снижается при увеличении порядка резонансных гармоник. В частности, максимальная амплитуда вибрационного сигнала на торцевой поверхности привода на частоте основного резонанса зарегистрирована в среднем положении печатающей головки, в то время как наименьшая амплитуда вибраций привода

соответствует нижнему положению печатающей головки. Это свидетельствует о подверженности привода вибрациям в среднем положении печатающей головки. С учетом полученных результатов рекомендуется арретировать печатающую головку 3D принтера в нижнем положении с целью минимизации вибрационных воздействий при транспортировке устройства.

Полученные результаты лазерной виброметрии также могут быть использованы при анализе соответствия устойчивости разрабатываемого устройства к внешним механическим воздействиям, таким как динамические нагрузки от вибраций, возникающие во время запуска на орбиту/орбитального полета спускаемого модуля; вибрационные нагрузки от акустических и механических воздействий при функционировании силовых установок; линейные и низкочастотные динамические перегрузки. Результаты исследований 3D принтера опубликованы в научном журнале «Космическая техника и технологии» [88].

2.6. Выводы по главе 2

Разработан проблемно-ориентированный метод лазерно-виброметрического неразрушающего контроля полимерных и композиционных материалов, а также определения их тепло- и механико-физических свойств за счет интерпретации данных, полученных в процессе сканирующей лазерной виброметрии и ИК термографии. Особенность лазерно-виброметрического неразрушающего контроля заключается в анализе резонансных явлений, возникающих в области дефектов, что позволяет направленно воздействовать на структурные неоднородности материалов за счет активации более интенсивных вибраций в областях со сниженным уровнем жесткости, приводящих к повышенному тепловыделению в этой зоне.

С использованием трехкомпонентной сканирующей лазерной доплеровской виброметрии исследованы резонансные явления в области дефектов простой геометрической формы в гомогенных материалах, а также резонансные явления

в области реальных дефектов в полимерных композитах. На примере исследования несквозных отверстий в полимерах показано, что основной вклад в формирование результирующих вибрационных сигналов в дефектах открытого типа вносят деформации изгиба (z -компонента колебаний). Усреднение данных на виброграммах, полученных по трем компонентам колебаний, повышает отношение сигнал/шум и достоверность дефектометрии. Полученные экспериментальные данные сопоставлены с результатами моделирования резонансных явлений в несквозных отверстиях с учетом распределения компонент колебаний по трем пространственным координатам. Расхождение между результатами моделирования и экспериментальными данными не превысило 10 %, что подтверждает справедливость предложенной математической модели.

Неразрушающий контроль дефектов в композитах в трехмерном представлении показал, что основной вклад в резонансные колебания скрытых дефектов, таких как ударные повреждения, вносят деформации растяжения–сжатия (x -компонента колебаний) по сравнению с колебаниями, измеренными по z -компоненте (вне плоскости пластины). При широкополосной акустической стимуляции углепластика возникает мультичастотный отклик в области дефекта, представляющего агломерацию отдельных трещин и расслоений (субдефектов), что связано со слоистой структурой композита. В связи с этим, каждый субдефект может быть охарактеризован своей площадью и глубиной залегания, а также может рассматриваться как независимый резонатор, который активируется на определенной частоте стимулирующих волн.

Использование аппаратуры инфракрасной термографии позволило исследовать теплофизические процессы, протекающие в дефектах при неразрушающем контроле материалов. Получено, 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. В частности, тепловые изображения имеют отличие от вибрационных картин, заключающееся в образовании дополнительных узловых линий и тепловых колец вблизи границ дефектов в виде несквозных отверстий, которые из-за деформации растяжения–сжатия обеспечивают достаточно сильный нагрев и четкое изображение границ дефекта на регистрируемых термограммах. Так, вибрации на частоте основного резонанса дефекта приводят к существенному увеличению температурного сигнала по сравнению с бездефектной зоной, а при увеличении порядка резонансных гармоник изменение сигнала существенно снижается. Дальнейшее измерение тепловыделения в области отверстия при увеличении порядка резонансных гармоник является нецелесообразным, так как изменение температурного сигнала приближается к уровню шума. Важно отметить, что широкополосная акустическая стимуляция приводит к слабой интенсивности вибраций в области дефектов. В связи с этим, регистрируемые ИК изображения также характеризуются низким отношением сигнал/шум, что приводит к необходимости извлечения фазового изображения из набора термограмм путем применения преобразования Фурье, но позволяет с высокой точностью определить размеры и расположение дефектов. Таким образом, для повышения точности воспроизведения полной формы, размеров и расположения дефектов необходимо проводить их широкополосную акустическую стимуляцию как на частоте резонанса дефектов, так и ее высших гармониках, однако следует учитывать требуемый уровень вводимой акустической мощности, достаточный для обнаружения дефектов.

В результате сравнения амплитуды прикладываемых напряжений при резонансной ультразвуковой стимуляции с величиной предела прочности исследуемых композиционных материалов было получено, что метод лазерно-виброметрического неразрушающего контроля при резонансной стимуляции дефектов можно отнести к неразрушающим методам контроля ввиду низкого уровня воздействий упругих волн на твердые тела в процессе акустической стимуляции.

В ходе экспериментального исследования материалов и изделий из композитов метод лазерно-виброметрического неразрушающего материалов был успешно использован для оптимизации последовательностей укладки слоев льна и углерода для повышения уровня поглощения энергии удара в гибридных композитах, повышения их механической прочности и ударопрочности. Проведение экспериментального модального анализа и контроля качества 3D напечатанного корпуса наноспутника «Томск-ТПУ-120» позволило определить модальные составляющие корпуса изделия, исследовать демпфирующие свойства материала и обнаружить дефекты сборки конструкции наноспутника. Также проведены неразрушающие испытания Российского «3D-принтера», изготовленного для космического эксперимента «3D-печать» на Российском сегменте Международной космической станции. Исследование движущихся частей и внутренних элементов принтера позволило определить вибрационные характеристики устройства и выработать рекомендации по арретированию печатающей головки в нижнем положении с целью минимизации вибрационных воздействий при транспортировке устройства.

Глава 3. Бесконтактная ультразвуковая стимуляция материалов воздушно-связанным магнитострикционным излучателем в задачах лазерной виброметрии

Актуальность разработки способов бесконтактного ввода ультразвука и соответствующих ультразвуковых (УЗ) воздушно-связанных акустических преобразователей связана с необходимостью обеспечения надежности и длительной эксплуатации изделий авиационной и ракетно-космической техники, основные ответственные элементы конструкций которых в настоящее время изготавливаются из композитов. Область применения материалов указанного типа обуславливает жесткие условия эксплуатации готовых изделий, определяемые резким перепадом и широким диапазоном температур, влажности, давления и т. д. В связи с этим, процедура производства и процесс эксплуатации готового продукта требуют проведения тщательного контроля качества изделий из композиционных материалов. Следовательно, модификация имеющихся и разработка новых надежных методов неразрушающего контроля является актуальной задачей научных исследований. Ультразвуковые методы неразрушающего контроля (НК) традиционно считаются одними из наиболее надежных и широко применяемых для оценки качества композиционных материалов в авиационной и ракетно-космической технике [1–5]. Сочетание акустической стимуляции контролируемых объектов и сканирующей лазерной виброметрии представляет собой сравнительно новый метод НК, активно развивающийся в последнее десятилетие. Общей тенденцией проведения работ в указанной области знаний является использование излучателей акустических сигналов для бесконтактного возбуждения колебаний в образцах, однако научные исследования по данному направлению в течение последнего десятилетия проводятся ограниченным числом научных групп [1–9]. Работы по использованию акустической стимуляции и вибросканирования для проведения неразрушающего контроля материалов проводятся в Нидерландах (Технический университет Делфта) [1], Польше (Горно-металлургическая академия имени Станислава Сташица) [2, 3], Канаде (Университет Лавалья) [4],

Великобритании (Университет Бата) [5]. Метод бесконтактной ультразвуковой стимуляции совместно с применением лазерной виброметрии описан в трудах исследовательской группы под руководством Солодова И. и Буссе Г. (Штутгартский университет, Германия) [6–9]. В работах [8, 9] показано, что применение маломощных резонансных излучателей для бесконтактной ультразвуковой стимуляции ограничено. В связи с этим, излучатели данного типа до настоящего момента не нашли широкого применения в промышленности для проведения неразрушающего контроля материалов и изделий. В отличие от упомянутой группы ученых из Германии, исследователи из Национальной лаборатории Лос-Аламос (США), работающие в области геофизики, провели ряд испытаний по неразрушающему контролю композиционных материалов с использованием набора мощных бесконтактных пьезоэлектрических преобразователей. В результате была доказана возможность идентификации слабых признаков ударных повреждений в композитах с использованием ряда бесконтактных излучателей. Предлагаемая методика устраняет необходимость непосредственного контакта с образцом, однако в процедуре контроля задействован набор измерительных датчиков, количество которых соответствует количеству точек измерения данных; кроме этого, метод обладает рядом других ограничений [40, 49]. Следует также отметить, что в подавляющем большинстве ультразвуковых методов НК для стимуляции колебаний в области дефектов используют акустические излучатели на основе пьезоэлектрических и магнитострикционных преобразователей. Все имеющиеся в настоящее время излучатели указанных типов обладают рядом характерных недостатков, что сужает их применение при контроле качества материалов и, соответственно, ограничивает внедрение разработанных диагностических методик в производство [61]. В частности, пьезокерамические преобразователи имеют существенные ограничения по амплитуде прикладываемого напряжения и, соответственно, по мощности; кроме этого, они хрупки и отличаются сравнительно узким диапазоном рабочих частот. Магнитострикционные излучатели, в свою очередь, обеспечивают требуемый уровень выходной мощности, что позволяет визуализировать подповерхностные

дефекты за счет активации интенсивных вибраций и внутреннего трения стенок дефектов в материалах [50, 51]. Важно отметить, что наиболее интенсивно тепловая энергия генерируется в так называемых «слипнутых» дефектах, стенки которых находятся в непосредственном контакте, однако при этом отсутствует взаимопроникновение материала на поверхности контакта. Дефекты указанного типа с трудом выявляются стандартными ультразвуковым и тепловым методами. Таким образом, обнаружение дефектов в композиционных материалах с использованием широко распространенных систем возбуждения ультразвуковых колебаний существенно усложняется на практике. В Томском политехническом университете исследования в области ультразвуковой вибротермографии и лазерной виброметрии выполняются с 2011 г. По результатам данных работ была создана лабораторная установка на основе контактного магнитострикционного преобразователя с потребляемой электрической мощностью 1,5 кВт, а также лабораторная установка для бесконтактной ультразвуковой стимуляции композитов на основе магнитострикционного и пьезокерамических излучателей в сочетании со сканирующей лазерной виброметрией [70–74]. Проведение исследовательских работ в области воздушно-связанной ультразвуковой виброметрии позволит заменить преимущественно используемые в настоящее время контактные ультразвуковые излучатели бесконтактными устройствами, перейти на удаленный режим возбуждения упругих волн в материалах, исключить возможность повреждения исследуемых объектов в точке ввода ультразвука и повысить экспрессность процедуры контроля качества.

Целью настоящего исследования является разработка способа ультразвукового неразрушающего контроля композиционных и полимерных материалов на основе взаимодополняющего использования бесконтактной ультразвуковой стимуляции и лазерного вибросканирования. Ключевым моментом в настоящем исследовании является создание воздушно-связанного акустического преобразователя, способного проводить контроль качества в воздушной среде без непосредственного контакта с исследуемым материалом и обеспечить информативный уровень вибрационного сигнала на поверхности контролируемого изделия, достаточного для обнаружения

структурных неоднородностей с использованием лазерного виброметра. Повышение эффективности диагностики качества сложных многокомпонентных материалов проводится путем исследования акустических явлений, возникающих в области структурных неоднородностей материалов. Использование сканирующего лазерного виброметра, в свою очередь, позволяет проводить спектральный анализ вибраций на поверхности материалов в процессе их акустической стимуляции. В ходе соответствующей разработки создано устройство бесконтактной ультразвуковой стимуляции для проведения контроля качества тонких, хрупких и гидрофильных материалов сложной формы, что позволяет усовершенствовать существующие технологии контроля качества материалов с использованием метода лазерной виброметрии.

3.1 Исследование основных вибро-акустических характеристик воздушно-связанного магнестрикционного преобразователя в сочетании с титановыми волноводами различной конфигурации

На первом этапе разработки проведены исследования титановых волноводов четырех конфигураций (ступенчатый параболоид, ступенчатый плоский, сферический, конусоидальный), используемых в сочетании с мощным бесконтактным магнестрикционным преобразователем. В частности, определен амплитудно-частотный спектр излучателя и получены зависимости виброперемещения торцевой поверхности излучателей от потребляемой электрической мощности прибора. Исследование проведено с целью оптимизации конструкции волновода и повышения эффективности бесконтактного ввода ультразвука при проведении неразрушающего контроля.

Лабораторная установка лазерной виброметрии при бесконтактной ультразвуковой стимуляции включала 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 ± 10 % Вт) и сканирующий лазерный доплеровский виброметр PSV-500-3D (Polytec, Германия),

как показано на рисунке 3.1. Лазерный виброметр позволяет измерять амплитуду скорости колебаний частиц среды в диапазоне от 0,01 мкм/с до 30 м/с при измерении спектра частот от 10 Гц до 20 МГц. Система управления генератора обеспечивает автоматический поиск и стабильное поддержание работы устройства на частоте резонанса электромеханической системы установки. Таким образом, устройство выполняет бесконтактную акустическую стимуляцию материалов акустическим сигналом фиксированной частоты. Уровень потребляемой электрической мощности магнитоотрицательного излучателя задает оператор, но его максимальное значение может варьироваться в зависимости от эксплуатационных характеристик совмещенных с магнитоотрицательным волноводов и не может превышать 1 кВт.

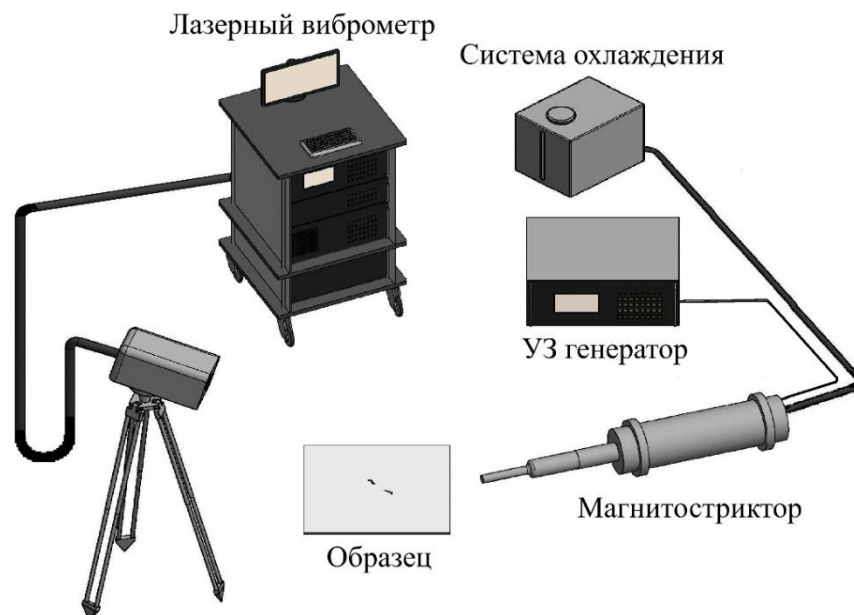


Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки лазерной виброметрии при бесконтактной ультразвуковой стимуляции с использованием магнитоотрицательного излучателя

Вибрации на поверхности исследуемых материалов, возникающие при их акустической стимуляции, анализировали методом сканирующей лазерной виброметрии (рисунок 3.1). Благодаря высокой чувствительности измерительной аппаратуры, по результатам лазерного вибросканирования визуализируется процесс взаимодействия распространяющихся упругих волн со структурными неоднородностями в исследуемых материалах. Результатом широкополосного

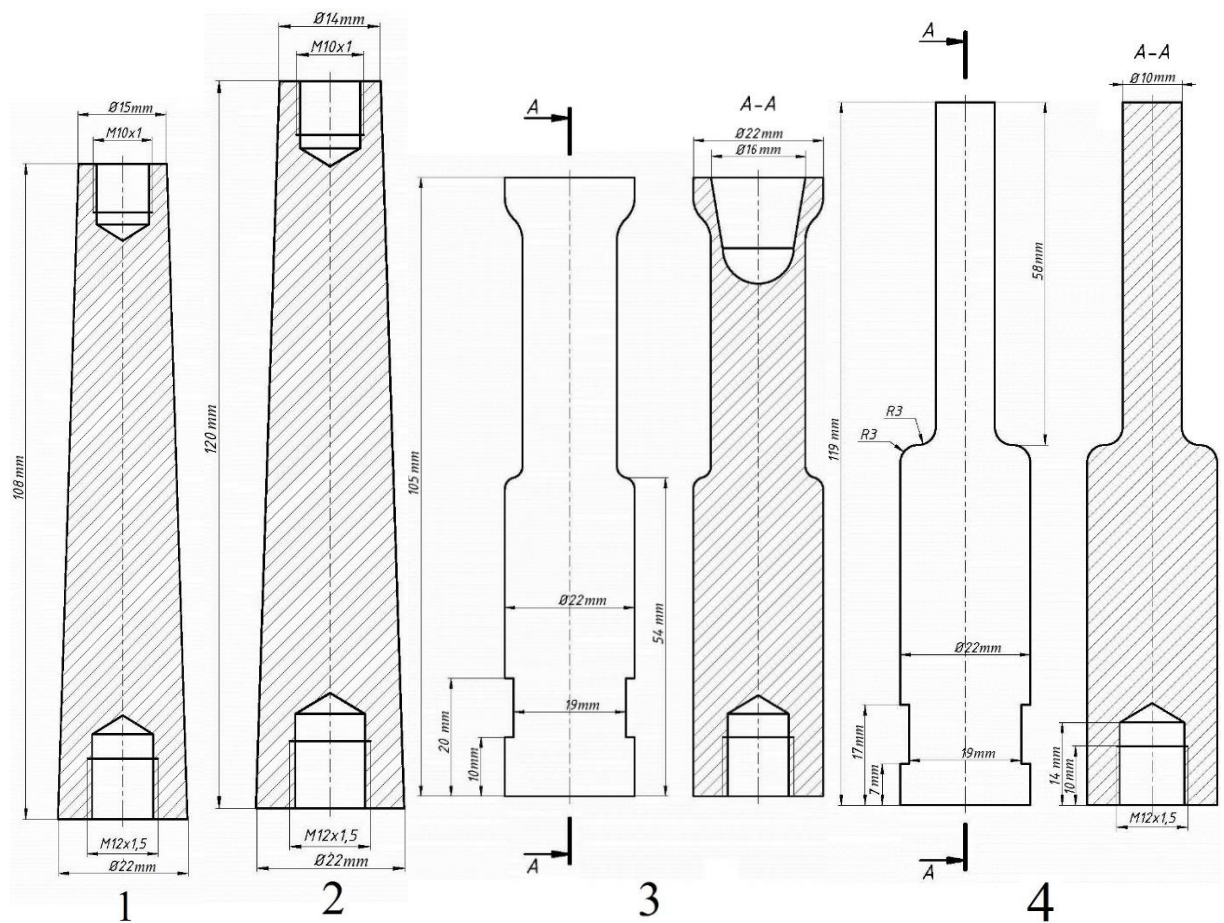
сканирования (в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц) в режиме быстрого преобразования Фурье (FFT) является амплитудно-частотный спектр вибраций, а также изображения распределения механических колебаний на поверхности исследуемых материалов в процессе УЗ стимуляции. Несмотря на резонансный режим работы магнитострикционного преобразователя, применение FFT для обработки данных является желательным, так как этот вид обработки позволяет устранить помехи путем перевода данных из временной области в фазо-частотную.

Исходя из того, что бесконтактная ультразвуковая стимуляция осуществляется непосредственно через воздушную среду, инжектирование упругих волн в контролируемый объект происходит по кратчайшему пути воздействия, которое направлено на поверхность материала. Вследствие существенного затухания УЗ в воздушной среде, для проведения контроля качества с использованием лазерной виброметрии является желательным использование УЗ преобразователей высокой мощности. Магнитострикционные преобразователи, как и пьезопреобразователи, способны обеспечить высокий уровень амплитуды колебаний волновода при его функционировании в диапазоне рабочих частот. Однако преобразователи магнитострикционного типа могут обеспечивать максимальную амплитуду колебаний волновода даже при наличии малой нагрузки, поскольку работа излучателей в воздушной среде приближена к режиму холостого хода. Пьезоэлектрический преобразователь в свою очередь не может полноценно функционировать в подобных условиях (вплоть до его разрушения) и обеспечивать требуемый уровень мощности ввиду отсутствия существенного сопротивления среды. В связи с этим, для оценки возможности применения магнитострикционных преобразователей для задач бесконтактного УЗ контроля, был проведен анализ конфигурации излучающих волноводов, совмещенных с магнитострикционным преобразователем. Для оценки эффективности передачи энергии за счет изменения формы волновода были изготовлены волноводы четырех конфигураций из титанового сплава в виде осесимметричных деталей: 1) конусовидный с плоским наконечником, 2) конусовидный со сферическим наконечником (радиус сферы 100 мм), 3) гиперболический параболоид, 4) ступенчатый. Вид титановых волноводов и их схемы показаны на рисунках 3.2 и 3.3 соответственно.



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

Рисунок 3.2 – Изображение титановых волноводов для бесконтактного магнитострикционного излучателя



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

Рисунок 3.3 – Схема титановых волноводов (все размеры в мм)

Излучаемая акустическая мощность магнитострикционных преобразователей является одной из основных технических характеристик, определяющих эффективность их работы. В связи с ограничениями диапазона рабочих частот таких устройств, необходимым условием эффективной работы является высокий уровень мощности установки. Указанный параметр определяется величиной потребляемых энергоресурсов, конфигурацией преобразователя и коэффициентом его полезного действия. Повышение энергопотребления установки до единиц кВт способствует увеличению уровня вводимой акустической мощности, однако это всегда ограничивается техническими характеристиками устройства. Входная электрическая мощность излучателя (W_e) определяется произведением напряжения возбуждения (U_T) на обмотке преобразователя и тока (I_T), протекающего через обмотку, с учетом сдвига фаз (φ) между ними [220]:

$$W_e = U_T \times I_T \times \cos \varphi \quad (3.1)$$

Помимо полезной работы, потребляемая электрическая мощность установки расходуется на ряд сопровождающих процессов. Таким образом, полная электрическая входная мощность магнитострикционного преобразователя определяется суммой мощности магнитных потерь из-за магнитного гистерезиса и вихревых токов (W_d) и общей механической мощностью преобразователя (W_m) [220]:

$$W_e = W_d + W_m. \quad (3.2)$$

Общая мощность механических потерь, в свою очередь, включает внутреннее сопротивление, которое имеет комплексный характер. Реактивная составляющая внутреннего сопротивления преобразователя обращается в нуль на частоте механического резонанса излучателя. При этом активная составляющая внутреннего сопротивления равна сопротивлению механических потерь (R_m). Тогда общая механическая мощность определяется выражением:

$$W_m = 0,5 \times R_m \times (v_m)^2, \quad (3.3)$$

где v_m – амплитуда колебательной скорости на торце волновода магнитострикционного преобразователя.

Амплитуда колебательной скорости также может быть выражена через амплитуду виброскорости на торце преобразователя (ξ_m):

$$v_m = 2\pi f \xi_m, \quad (3.4)$$

где f – частота резонанса преобразователя.

Теоретический расчет амплитуды виброперемещения на торце преобразователя выполняют с учетом геометрических параметров волновода, свойств материала и электрических характеристик системы. Для магнитострикционного преобразователя без волновода первой ступени выражение для определения амплитуды виброперемещения на торце имеет вид:

$$\xi_m = \frac{\sigma_m SA}{2\pi f (Z_i + R_n)}, \quad (3.5)$$

где σ_m – амплитуда магнитострикционных напряжений,

S – площадь поперечного сечения активной части преобразователя,

A – коэффициент, определяющий отношение ширины магнитострикционного преобразователя к ширине его окна,

Z_i – внутреннее сопротивление преобразователя,

R_n – сопротивление нагрузки.

Механическая мощность излучателя также может быть оценена экспериментальным путем в результате измерения амплитуды виброскорости/виброускорения частиц среды на торце преобразователя. Оценка виброскорости и виброперемещения активной области магнитострикционного преобразователя, совмещенного с определенным типом волновода, также позволяет определить эффективность работы и оптимизировать конфигурацию волноводов путем исследования их излучающих характеристик.

Предложенные титановые волноводы различных конфигураций были изготовлены для магнитострикционного преобразователя USG-2-22-MS-1 с учетом его резонансной частоты, физических свойств материала и требуемых технических характеристик устройства. Однако следует отметить, что даже небольшие изменения в геометрии волновода могут существенно повлиять на технические характеристики всей системы. В связи с этим, предельная мощность, переданная

по конкретному волноводу на частоте основного резонанса излучателя и во всей полосе рабочего частотного диапазона, может варьироваться в зависимости от характеристик волноводов, совмещенных с магнестрикционным излучателем. Ввиду вышеизложенного, с использованием лазерной виброметрии на торцевой поверхности магнестрикционного излучателя была измерена амплитудно-частотная характеристика устройства, работающего в сборке с исследуемыми волноводами. На рисунке 3.4 показана амплитуда виброскорости на торце устройства, измеренная в диапазоне рабочих частот от 20,5 кГц до 24,5 кГц.

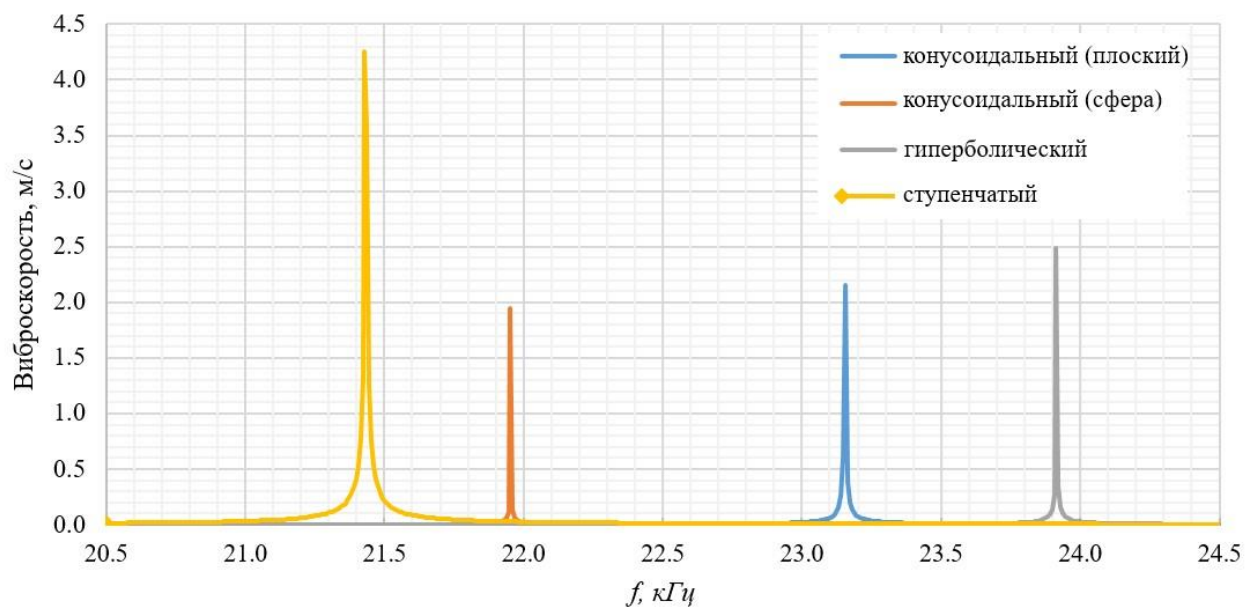


Рисунок 3.4 – Амплитудно-частотная характеристика бесконтактного магнестрикционного излучателя в сборке с титановыми волноводами четырех конфигураций

Измеренные с использованием лазерного виброметра резонансные частоты магнестрикционного излучателя варьировались в диапазоне от 21,43 кГц до 23,92 кГц в зависимости от типа используемого в сборке волновода (рисунок 3.4). Полученные экспериментальные данные сопоставлены с результатами моделирования, выполненного с использованием программного обеспечения Autodesk Inventor. В рамках конечно-элементного моделирования проведен модальный анализ собственных частот (f_{model}) и форм резонансных колебаний волноводов; результаты анализа систематизированы в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Вибро-акустические характеристики титановых волноводов, измеренные экспериментально и рассчитанные теоретически

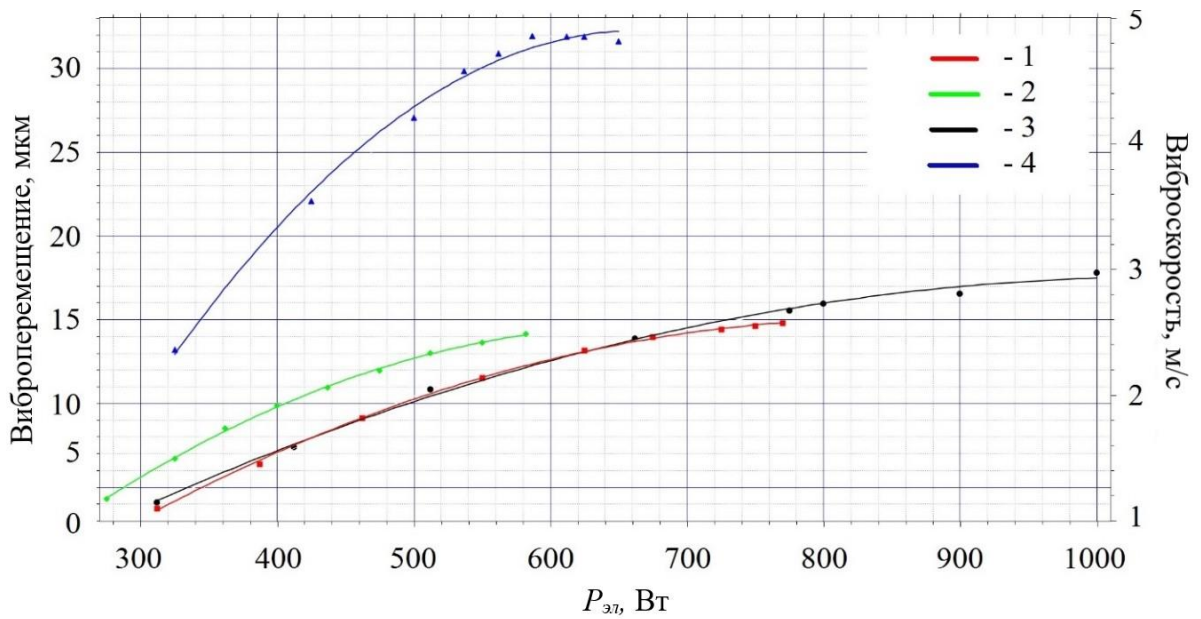
Тип волновода	f_{exp} , кГц	f_{model} , кГц	δ , %	Q-Factor (добротность)	Zeta, 10^{-6}
Конусовидный с плоским наконечником	23,15	23,74	2,5	28	18
Конусовидный со сферическим наконечником	21,95	21,48	2,1	52	10
Гиперболический параболоид	23,92	24,1	0,8	29	17
Ступенчатый	21,43	20,29	5,3	40	12

Помимо основных частот, важными характеристиками резонансной системы являются коэффициент добротности и коэффициент демпфирования. Коэффициент добротности волновода показывает, насколько демпфирован конкретный резонатор, и характеризуется шириной полосы частот резонатора относительно его резонансной частоты (f_{exp}). Перечисленные вибро-акустические характеристики магнитострикционного излучателя в сборке с различными волноводами измерены с использованием лазерной виброметрии и приведены в таблице 3.1.

Из полученных данных следует, что измеренные с использованием лазерного виброметра резонансные частоты волноводов проявляют высокую сходимость с результатами моделирования, проведенного с использованием программного обеспечения Autodesk Inventor. Фактически выполненный модальный анализ собственных частот и осциллограмм показал результаты, близкие к экспериментальным данным; соответствующая относительная ошибка не превышала 5,3 % для каждого типа волноводов. Важно также отметить, что более высокая добротность конического волновода со сферическим наконечником указывает на меньшую потерю энергии по отношению к энергии, запасенной в таком резонаторе. В этом случае колебания затухают медленнее, чем в других волноводах. Коэффициент демпфирования, обозначенный как ζ , весьма близок к критическому важному случаю ($\zeta = 1$) для каждого из волноводов, что вызвано вынужденными колебаниями системы (таблица 3.1). Также было показано, что экспериментально

измеренный диапазон рабочих частот магнитостриктора в сборке с титановыми волноводами незначительно отличается от результатов моделирования.

Как видно из полученных данных (рисунок 3.5), максимальная амплитуда виброперемещения, измеренная на торце ступенчатого цилиндрического волновода, составляет $\xi_{exp} = 31,9$ мкм, что также соответствует теоретическим предположениям. Такой результат можно объяснить максимальным отношением начального и конечного радиусов сечения концентратора (22:10), что является определяющим параметром коэффициента усиления. Помимо этого, 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.



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

Рисунок 3.5 – Зависимость виброперемещения и виброскорости на торцевой части волновода от величины потребляемой электрической мощности магнитостриктора в сборке с волноводами

3.2. Оценка эффективности использования четырех типов волноводов для передачи акустической энергии через воздушную среду

Следующий этап исследований включал оценку эффективности использования четырех типов волноводов для передачи акустической энергии через воздушную среду при работе магнитостриктора, а именно, определение интенсивности излучения, оценку уровня акустической мощности, вводимой в материал (полиметилметакрилат) при его ультразвуковой стимуляции с использованием титановых волноводов, оценку коэффициента полезного действия системы излучатель–волновод с учетом потребляемой электрической мощности устройства и акустической мощности, вводимой в исследуемый материал.

Как упомянуто выше, излучаемая мощность является основным параметром магнитострикционных устройств, влияющим на их эффективность. Этот параметр определяется эффективностью электромеханического преобразования энергии и максимально допустимой амплитудой колебательной скорости (или смещения).

В настоящем исследовании сравнивали как экспериментальные, так и теоретические акустические параметры, управляющие энергетической эффективностью четырех типов титановых волноводов, включая: 1) теоретическое значение коэффициента усиления, рассчитанное по известным входным/выходным сечениям волновода, и теоретическую амплитуду скорости вибрации (ζ_{theory}); 2) экспериментальную амплитуду скорости вибрации ζ_{exp} , определенную с помощью виброметрии. Результаты представлены в таблице 3.2. Потребляемую электрическую мощность P_e магнитостриктора изменяли в диапазоне от 0 до 1 кВт в зависимости от типа используемого титанового волновода. В предположении, что известны значения скорости вибрации v , плотности материала ρ и скорости ультразвука c , была рассчитана интенсивность ультразвукового излучения волноводов I_{exp} [220]:

$$I_{exp} = 0,5 \times v^2 \times \rho \times c. \quad (3.6)$$

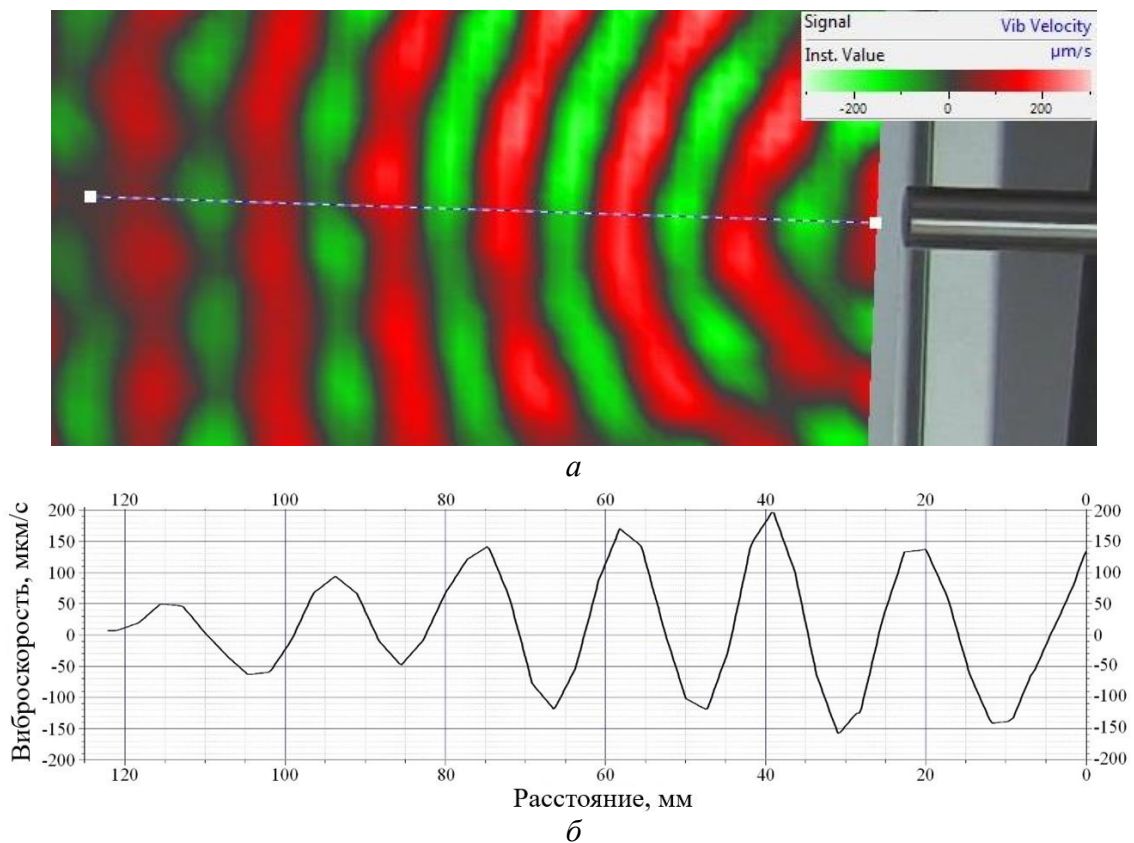
Таблица 3.2 – Теоретические и экспериментальные характеристики бесконтактного магнитострикционного преобразователя в сборке с четырьмя типами волноводов

Тип волновода	N	ζ_{theory} , мкм	ζ_{exp} , мкм	I_{exp} , Вт/см ²	P_e , Вт	P_a , мВт	η_{em} , %
Конический с плоским наконечником	1,5	15,8	14,8	24,7	770	0,47	0,061
Конический со сферическим наконечником	1,5	14,9	14,1	22,4	685	0,133	0,025
Гиперболический параболоид	1,8	18	17,8	35,8	1000	0,738	0,074
Ступенчатый	4,8	44,3	31,9	114,8	650	1,23	0,189

Важно заметить, что электрическая мощность (P_e), вводимая в объект исследования, составляет лишь небольшой процент от общей электрической мощности, потребляемой установкой, и является информативным параметром эффективности работы всей системы. Количественно указанный параметр может быть выражен через электромеханический коэффициент полезного действия (η_{em}) в виде отношения электрической мощности (P_e) к акустической (P_a):

$$\eta_{em} = P_a / P_e \times 100\%. \quad (3.7)$$

Значение η_{em} определяли путем анализа распространения акустических волн, возбуждаемых бесконтактным магнитострикционным излучателем на торце пластины полиметилметакрилата (ПММА) размерами $416 \times 325 \times 1$ мм, площадь поперечного сечения которой составила 325 мм^2 . Каждый из четырех волноводов располагался на расстоянии 20 мм от образца. Указанные упрощения позволяют оценить порядок величины акустической энергии, передаваемой в объект исследования от излучателя с использованием каждого из четырех типов концентраторов, а также определить эффективность их работы. Схема экспериментального измерения виброскорости на поверхности материала в процессе его ультразвуковой стимуляции приведена на рисунке 3.6.



a – изображение вибраций, *b* – профиль вибраций

Рисунок 3.6 – Изображение вибраций и их профиль на поверхности пластины из полиметилметакрилата толщиной 1 мм при бесконтактной ультразвуковой стимуляции

Акустическая мощность (P_a), вводимая в объект исследования в процессе ультразвуковой стимуляции, характеризуется отношением интенсивности волны (I_{exp}) к площади поперечного сечения (S) площадки, расположенной

перпендикулярно направлению ее распространения, с учетом свойств ПММА (плотности и скорости распространения звука в нем) [221]:

$$P_a = I / S . \quad (3.8)$$

Используя выражения (3.7), (3.8), с учетом плотности ПММА 1100 кг/м³ и скорости распространения звука в ПММА (2630 м/с) [222], был рассчитан уровень акустической мощности, вводимой в пластину оргстекла на расстоянии 20 мм от торца магнестриктора. Полученное значение акустической мощности было сопоставлено с уровнем потребляемой электрической мощности устройства для оценки эффективности передачи энергии, как показано в выражении (3.6).

В таблице 3.2 приведены экспериментальные величины акустической мощности, поглощенной пластиной ПММА и рассчитанной по формулам (3.7), (3.8) в отношении электроэнергии, потребляемой устройством. Результаты получены для каждого из четырех рассматриваемых типов волноводов.

Из результатов исследования волноводов (таблица 3.2) видно, что максимальная электрическая мощность потреблялась гиперболическим параболоидом. Амплитуда виброперемещения, измеренная на торцевой поверхности гиперболического параболоида, составила 17,8 мкм, что соответствует расчетному значению 18 мкм. Однако указанная амплитуда виброперемещения гиперболического концентратора на 30 % ниже аналогичного параметра ступенчатого волновода, в то время как потребляемая электрическая мощность магнестрикционного излучателя в сборке с гиперболическим параболоидом составила 1 кВт. В свою очередь, конические волноводы с плоским и сферическим наконечниками обеспечивают близкие значения вибрационных характеристик. Расчетные величины амплитуды смещения торцевой поверхности составляли 15,8 и 13,1 мкм для концентраторов с плоским и сферическим наконечниками соответственно. Экспериментально измеренные значения составили 14,8 и 14,1 мкм соответственно, отличаясь на 6,3 и 5,4 % от теоретических значений. Указанное расхождение теоретических и экспериментальных данных может быть объяснено более высоким уровнем потребляемой электрической мощности, 770 и 685 Вт соответственно. Таким образом, увеличение мощности на 85 Вт приводит

к увеличению амплитуды смещения на 0,8 мкм, даже в случае, если коэффициенты усиления идентичны.

Несмотря на сравнительно небольшой уровень потребляемой электрической мощности излучателя в сборке со ступенчатым цилиндрическим волноводом (650 Вт), указанная конфигурация также позволила наиболее эффективно преобразовать потребляемую электрическую мощность в механическую ($\eta_{em} = 0,189\%$) по сравнению с другими рассматриваемыми концентраторами. Визуально эффективное преобразование энергии подтверждается максимальной скоростью нарастания фронта кривой 1 на графике зависимости виброперемещения от потребляемой электрической мощности устройства (рисунок 3.5). Однако экспериментальная величина амплитуды виброперемещения (31,9 мкм) на 28 % меньше максимального уровня (44,3 мкм) аналогичного параметра, рассчитанного теоретически. Предположительно такое значительное отличие теоретических и экспериментальных данных может быть следствием существенных механических потерь, свойственных конкретному типу волновода.

Среди четырех волноводов максимальный уровень потребляемой электрической мощности соответствует криволинейному параболоиду. Как показали результаты тестирования, данный тип волновода способен обеспечить виброперемещение на торце амплитудой до 17,8 мкм при потребляемой электрической мощности излучателя порядка 1 кВт. Несмотря на существенное (более чем на 30 %) снижение амплитуды колебаний, измеренной на торце настоящего концентратора, по сравнению со ступенчатым цилиндрическим волноводом, сравнительно высокий уровень подводимой электрической мощности излучателя позволил обеспечить 17,8 мкм виброперемещения на торцевой части. Экспериментальные результаты хорошо коррелируют (отличаются не более чем на 1 %) с теоретическими данными (18 мкм). Снижение амплитуды виброперемещения можно объяснить потерями из-за наличия магнитного гистерезиса и вихревых токов.

Исследование четырех типов волноводов показало, что характеристики их механических колебаний существенно различаются даже при условии их

изготовления из идентичного материала. Изменение амплитуды скорости вибрации имеет квадратичную зависимость от потребляемой электрической мощности магнитостриктора, которая также следует из уравнения (3.3). Следует отметить, что скорость нарастания фронта кривых существенно различается для четырех типов титановых волноводов, что свидетельствует о влиянии конфигурации концентраторов на электроакустический коэффициент полезного действия системы излучатель–волновод. В данном исследовании коэффициент преобразования электрической энергии в акустическую отличался в диапазоне от 0,025 до 0,189 для всех четырех типов концентраторов. Следовательно, оптимальная конфигурация волновода позволяет повысить эффективность электромеханического преобразования энергии примерно в 7 раз, что значительно повышает эффективность ультразвуковой стимуляции.

3.3 Исследование диаграммы направленности магнитостриктора в сборке с титановым волноводом оптимальной конфигурации

Для определения области применения излучателя важное значение имеют анализ спектральных характеристик, определение характера акустического поля вокруг излучателя и диаграммы его направленности (ДН). Последняя характеристика, в свою очередь, отражает зависимость излучения устройства от его ориентации в пространстве. С целью определения направленности используемого магнитострикционного излучателя лабораторная установка лазерной виброметрии была модифицирована путем введения отражающего элемента для измерения вибраций, распространяющихся в воздушной среде от излучателя (рисунок 3.7).

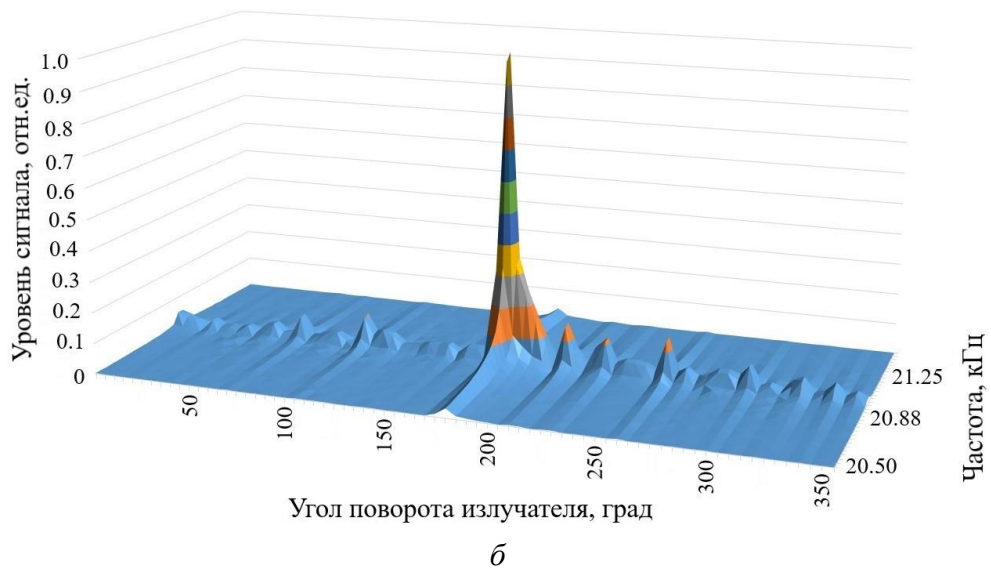
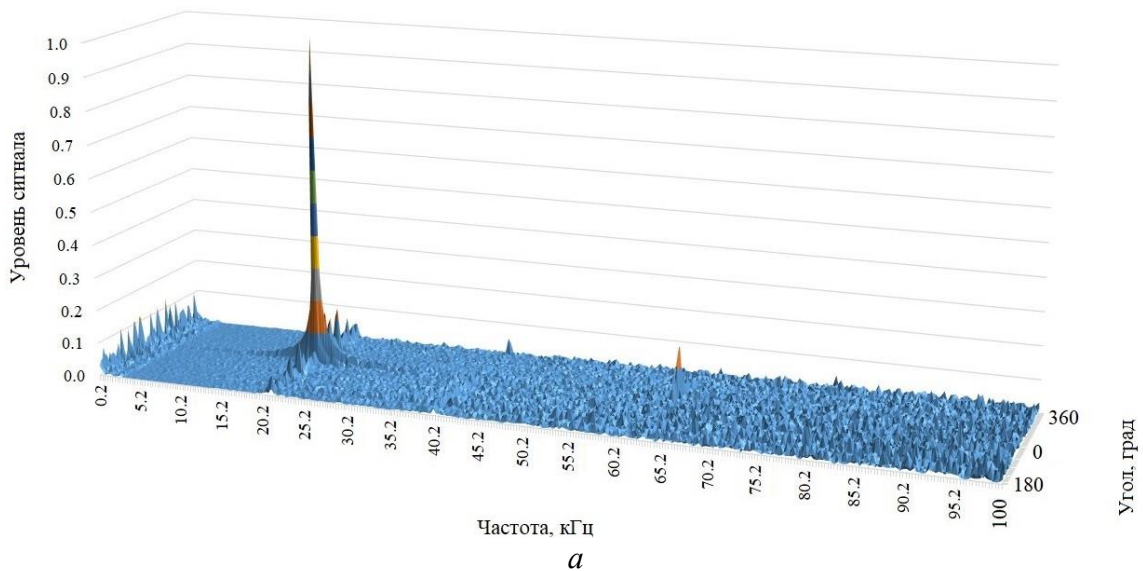


Рисунок 3.7 – Схема лабораторной установки для измерения диаграммы направленности ультразвуковых излучателей с использованием сканирующего лазерного доплеровского виброметра

В настоящей работе ДН воздушно-связанного магнитострикционного излучателя исследовали путем регистрации зависимости коэффициента усиления излучателя от его направления в заданной плоскости. Установка для измерения ДН включала лазерный доплеровский виброметр (PSV-500-3D-HV, Polytec), мембрану для приема акустической волны от излучателя, а также систему вращения излучателя относительно приемника на основе угломера (рисунок 3.7). Вращение излучателя производили на полный оборот ($\Theta = 360^\circ$) с точностью определения угла наклона $\pm 1^\circ$. В ходе измерения ДН магнитострикционного излучателя приемник акустического сигнала (латунная круглая мембрана диаметром 18 мм и толщиной 0,2 мм) был размещен на фиксированном расстоянии 45 мм от поверхности излучателя. Амплитуду виброперемещения на приемнике определяли с использованием лазерного доплеровского виброметра в режиме быстрого преобразования Фурье. Лазерное вибросканирование проводили по центральной оси излучения путем измерения амплитудно-частотного спектра колебаний. Амплитуду скорости вибраций на поверхности приемника регистрировали в частотном диапазоне от 31,5 Гц до 100 кГц, выполняя не менее

5 измерений в каждой точке. Количество спектральных линий составило 3200, что соответствовало шагу сканирования до 20 Гц.

При нормировании амплитуды виброперемещения по оси ординат было рассчитано отношение амплитуды виброперемещения частиц среды (Δx , мкм) на выбранной частоте к ее максимальному значению (Δx_{max} , мкм) во всем спектре измеряемых частот. Указанная величина характеризует уровень ультразвукового сигнала. Анализ результатов эксперимента позволил построить 3D поверхность, отображающую ДН в измеренном диапазоне частот (рисунок 3.8, *а*), а также в выборочной области (рисунок 3.8, *б*).



а – диапазон от 50 Гц до 100 кГц, *б* – диапазон от 20,5 Гц до 21,5 кГц

Рисунок 3.8 – Комплексная 3D диаграмма направленности магнестрикционного излучателя в диапазоне от 50 Гц до 100 кГц и в диапазоне от 20,5 Гц до 21,5 кГц

С целью определения полосы пропускания излучателя построена частотная зависимость амплитуды сигнала виброперемещения во всем исследуемом диапазоне частот от 31,5 Гц до 100 кГц (рисунок 3.9). В качестве линии среза выбран угол 180° , соответствующий направленности главного лепестка ДН.

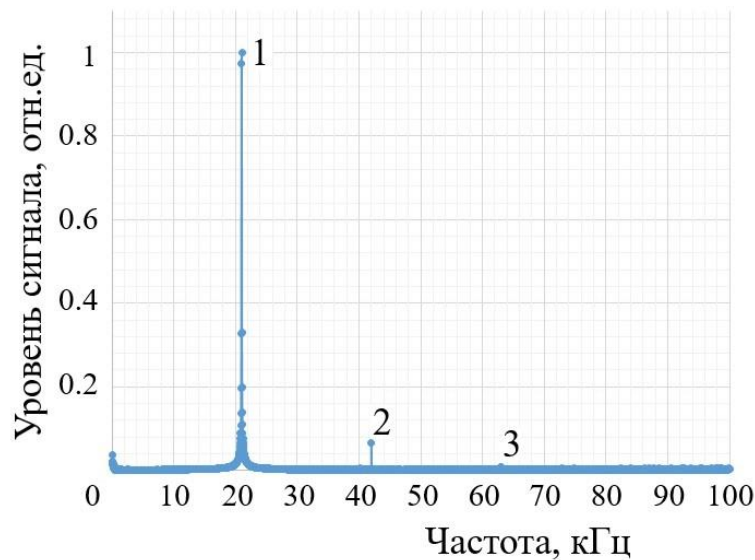


Рисунок 3.9 – Зависимость уровня сигнала от частоты на срезе 3D поверхности диаграммы направленности по плоскости 180°

Как видно из графика на рисунке 3.9, основная полоса пропускания магнитострикционного излучателя находится в частотном диапазоне 20,9 кГц ÷ 350 Гц. Частота основного резонанса излучателя составляет 20,88 кГц, а высшие резонансные гармоники наблюдаются на частотах 42 кГц и 63 кГц. Из полученных результатов также следует отметить низкий уровень амплитуды высших резонансных гармоник излучателя, что свидетельствует об узкой полосе пропускания устройства в рассматриваемом диапазоне частот (31,5 Гц ÷ 100 кГц). Нормированная диаграмма направленности излучателя на частоте 20,9 кГц в полярных координатах приведена на рисунке 3.10.

Как видно из графика, основной лепесток излучателя имеет узконаправленный характер с разверткой в 10° (от -5° до 5° при уровне коэффициента направленного действия выше 0,3). Для повышения точности определения направленности основного лепестка излучателя необходимо провести дополнительное исследование работы устройства в диапазоне углов от -5° до 5° с

более высокой дискретностью измерений. Согласно условиям проведения такого эксперимента, основной лепесток диаграммы направленности должен совпадать с направлением в 0° , что подтверждено экспериментально. Как следствие, основной лепесток диаграммы направленности соосен с главной акустической осью, причем уровень сигнала боковых лепестков не превышает 15 % от максимальной величины.

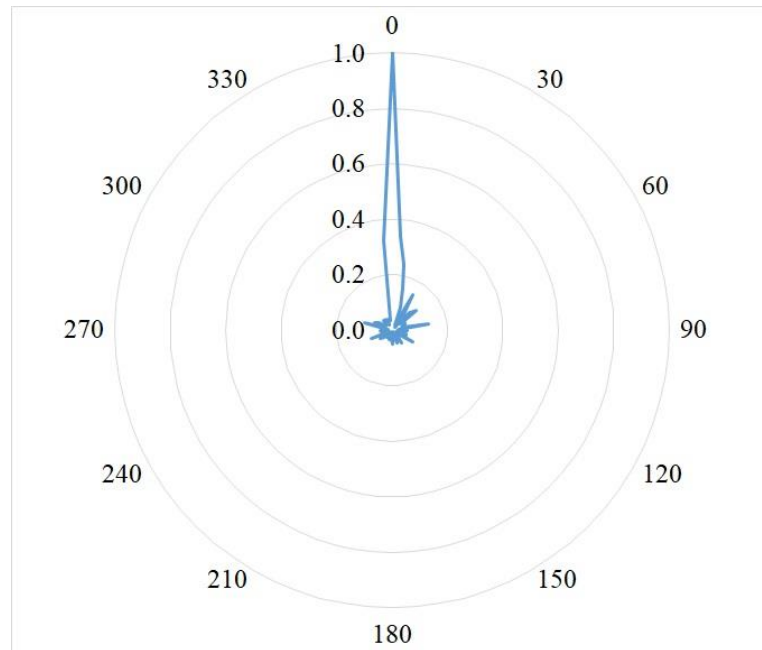


Рисунок 3.10 – Нормированная диаграмма направленности магнитострикционного излучателя на основной частоте резонанса 20,9 кГц в полярных координатах

Несмотря на низкую частоту дискретизации измерений, можно сделать вывод, что магнитострикционный излучатель в сборке со ступенчатым титановым волноводом имеет ярко выраженную узконаправленную область излучения в пределах 5° от основной оси излучения и полосу пропускания в диапазоне частот 20,5–21,5 кГц.

Из полученных данных следует, что с целью повышения эффективности последующего проведения испытаний материалов и изделий необходимо оптимизировать условия бесконтактного ввода ультразвука. Эта проблема рассмотрена в главе 4.

3.4 Применение воздушно-связанного магнитострикционного преобразователя для контроля качества композиционных материалов

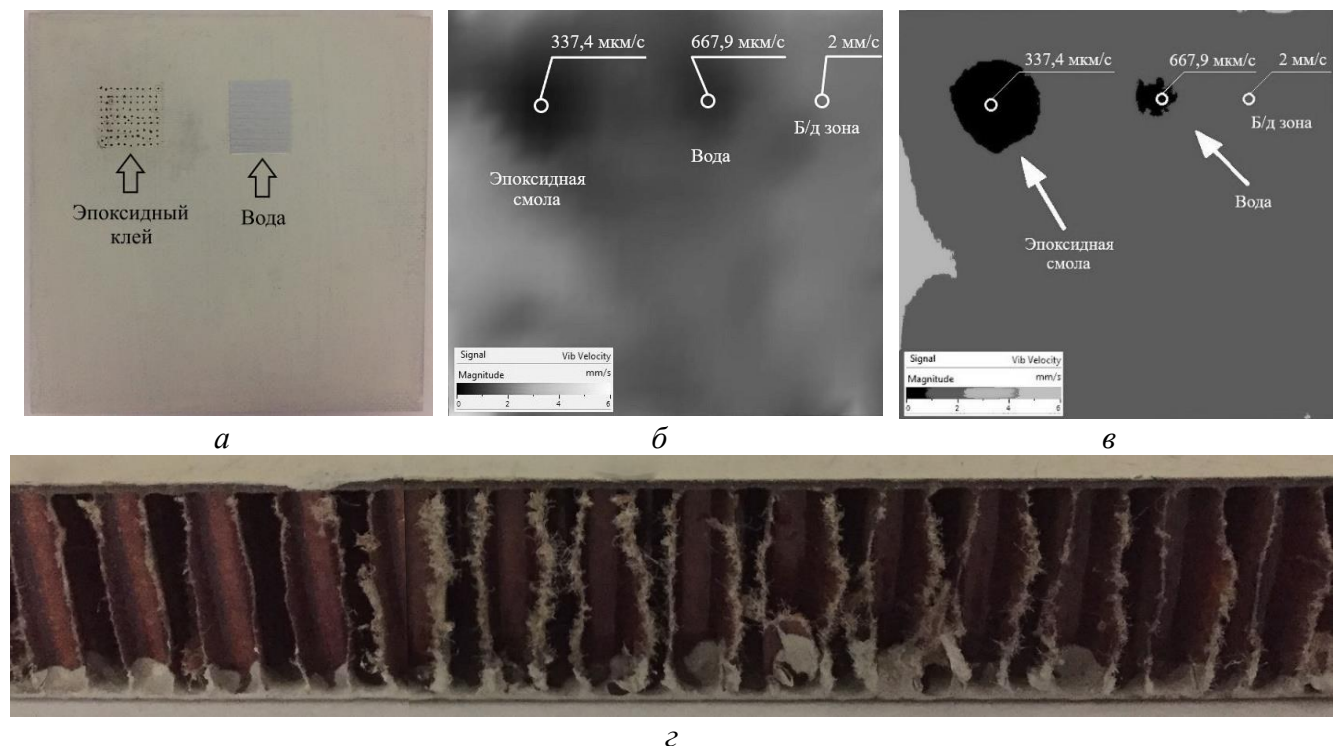
В настоящем разделе проведены исследования особенностей взаимодействия упругих волн с дефектами в полимерных композиционных материалах при проведении лазерного вибросканирования. Неразрушающий контроль проводили на примере сотовых композитов с типичными дефектами в виде избыточного содержания эпоксидной смолы и воды, углепластиковых композитов с ударным повреждением, а также стеклопластиковых композитов с заложенными дефектами.

В рамках проведения неразрушающих испытаний композиционных материалов использовалась лабораторная установка сканирующей лазерной доплеровской виброметрии при бесконтактной ультразвуковой стимуляции, схема которой приведена на рисунке 3.1 в разделе 3.1. Лазерный виброметр позволяет измерять амплитуду скорости колебаний частиц среды в диапазоне от 0,01 мкм/с до 30 м/с в спектре частот от 10 Гц до 25 МГц. Система управления генератора обеспечивает автоматический поиск и стабильное поддержание работы ультразвукового генератора на частоте резонанса электромеханической системы установки, а также поддерживает работу устройства на фиксированной частоте.

В процессе ультразвуковой стимуляции осуществляли лазерное вибросканирование поверхности контролируемого материала. Измерение вибраций производили в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц в режиме быстрого преобразования Фурье. Результатом виброметрии являются амплитудно-частотный спектр вибраций материала и виброграммы, отображающие распределение механических колебаний на поверхности тестируемых объектов при ультразвуковой стимуляции. Несмотря на резонансный режим работы магнитострикционного преобразователя, применение преобразования Фурье для обработки данных является желательным, так как позволяет устранить помехи путем перевода экспериментальных данных из временной области в фазо-частотную.

Проведение неразрушающих испытаний позволяет визуализировать процесс взаимодействия распространяющихся упругих волн со структурными неоднородностями в исследуемых материалах. Результатом широкополосного сканирования являются виброграммы, позволяющие определить размер и месторасположение структурной неоднородности в контролируемом материале вследствие локального увеличения амплитуды вибраций в зоне дефекта.

Одной из важных особенностей и преимуществ работы ультразвукового излучателя с воздушной связью является возможность проведения неразрушающего контроля хрупких и гидрофильных материалов. Пример исследования сотовой композитной панели размером 300×305 мм² приведен на рисунке 3.11. Панель изготовлена из углепластиковой обшивки толщиной 0,5 мм, приклеенной эпоксидной пленкой к сотовому наполнителю из бумаги (Nomex) толщиной 12 мм, как показано на рисунке 3.11, *а, г*.



а, г – фото панели, *б* – усреднение данных в диапазоне частот 50 Гц – 100 кГц,
в – усреднение данных с использованием ступенчатой дискретизации

Рисунок 3.11 – Обнаружение скрытой воды и избыточного эпоксидного клея
 в сотовой панели

Панель подвергали ультразвуковой стимуляции с использованием воздушно-связанного магнитострикционного преобразователя в сборке со ступенчатым волноводом. Область сканирования включала 60×50 точек общей площадью $180 \times 150 \text{ мм}^2$ с шагом сканирования 3 мм. За счет использования фиксированной частоты ультразвуковой стимуляции (23,5 кГц) время сканирования сократилось до 2,5 минут, что существенно меньше в сравнении с временем проведения многочастотной стимуляции с использованием пьезопреобразователей. Исследуемый образец (рисунок 3.11, а) содержал участки, где сотовые ячейки были заполнены водой и эпоксидным клеем.

В результате лазерного вибросканирования сотового композита выявлено, что области, содержащие воду и эпоксидную смолу, характеризовались пониженной амплитудой вибраций по сравнению с бездефектной (б/д) зоной. В соответствии с экспериментальными данными (рисунок 3.11, б), амплитуда вибраций в зоне содержания воды составила 668 мкм/с, а в области избыточного содержания эпоксидной смолы – 337 мкм/с, в то время как амплитуда вибраций в бездефектной области была всего лишь около 2 мм/с.

Отношение полезного сигнала к уровню шума на виброграммах было оценено по критерию «сигнал/шум» – SNR . Указанный параметр определяется отношением среднеквадратичной амплитуды измеренного сигнала виброскорости/виброперемещения в области дефекта (A_d) к бездефектной зоне (A_{nd}) [197]:

$$SNR = \frac{\overline{A_d - A_{nd}}}{\sigma_{nd}}, \quad (3.9)$$

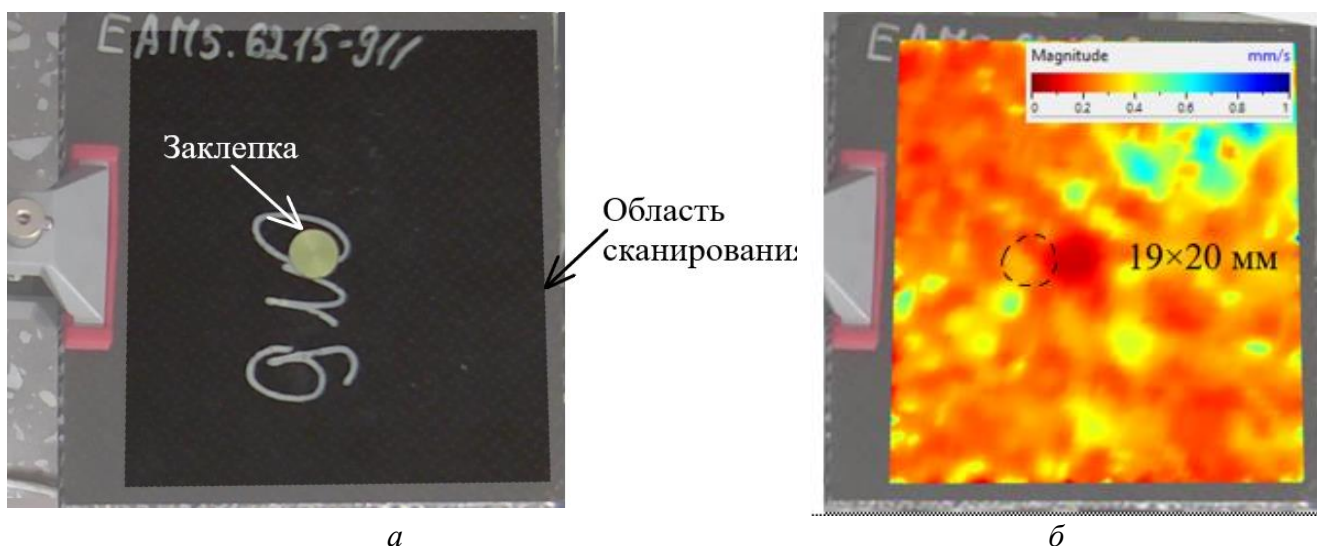
где σ_{nd} – дисперсия амплитуды вибрационного сигнала в бездефектной зоне.

С использованием выражения (3.9) было установлено, что величины SNR для полезного сигнала в области избыточного содержания эпоксидной смолы и воды составили 9 и 5,7 соответственно. Путем уменьшения количества цветов в палитре виброграммы до 16 была выполнена ступенчатая дискретизация. Результаты обработки данных позволили уточнить размеры и расположение участков,

заполненных водой и клеем (рисунок 3.11, в), путем повышения контрастности изображения.

В процессе изготовления изделий из полимерных композиционных материалов широко используют заклепки из прочных сплавов, например, с целью крепления сотовых панелей в авиационной промышленности. Будучи окрашенными под цвет композита, заклепки не визуализируются при осмотре изделия, однако могут быть обнаружены при проведении неразрушающего контроля. Ниже приведен пример анализа вибраций сотовой панели, имеющей заклепку из нержавеющей стали диаметром 20 мм в центре.

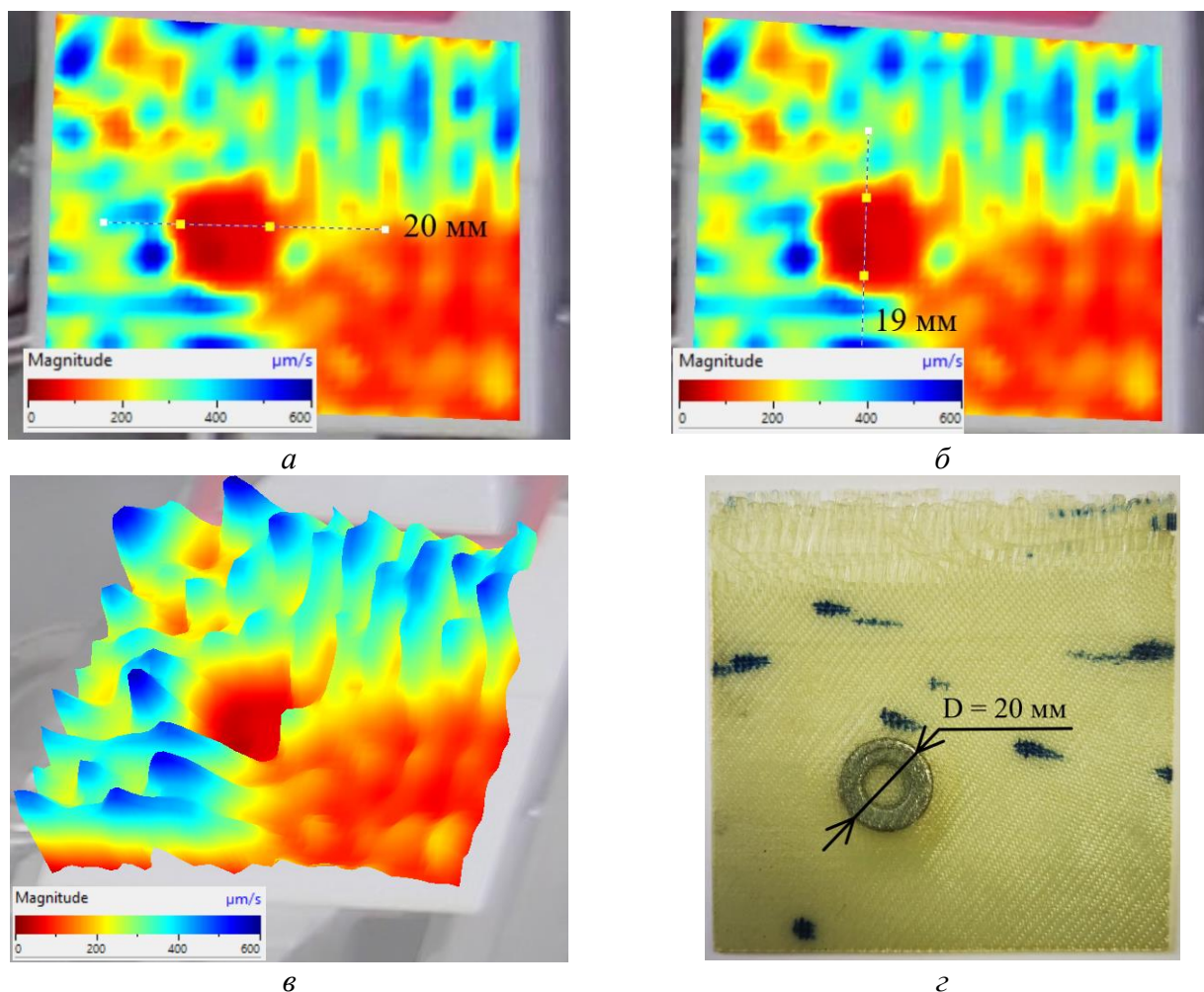
Анализ вибраций на поверхности композиционного материала позволяет определить расположение заклепки и оценить качество соединения композита. В частности, наличие металлической заклепки приводит к снижению амплитуды колебаний на поверхности контролируемого объекта с 0,3 до 0,05 мм/с, как показано на рисунке 3.12, б, однако на виброграмме не было обнаружено артефактов, свидетельствующих о неравномерном креплении композита. По результатам лазерного вибросканирования установлено, что сотовая панель содержит в центре металлическую заклепку размерами 19×20 мм², не имеющую дефектов крепления.



а – фотография сотовой панели, б – виброграмма сотовой панели

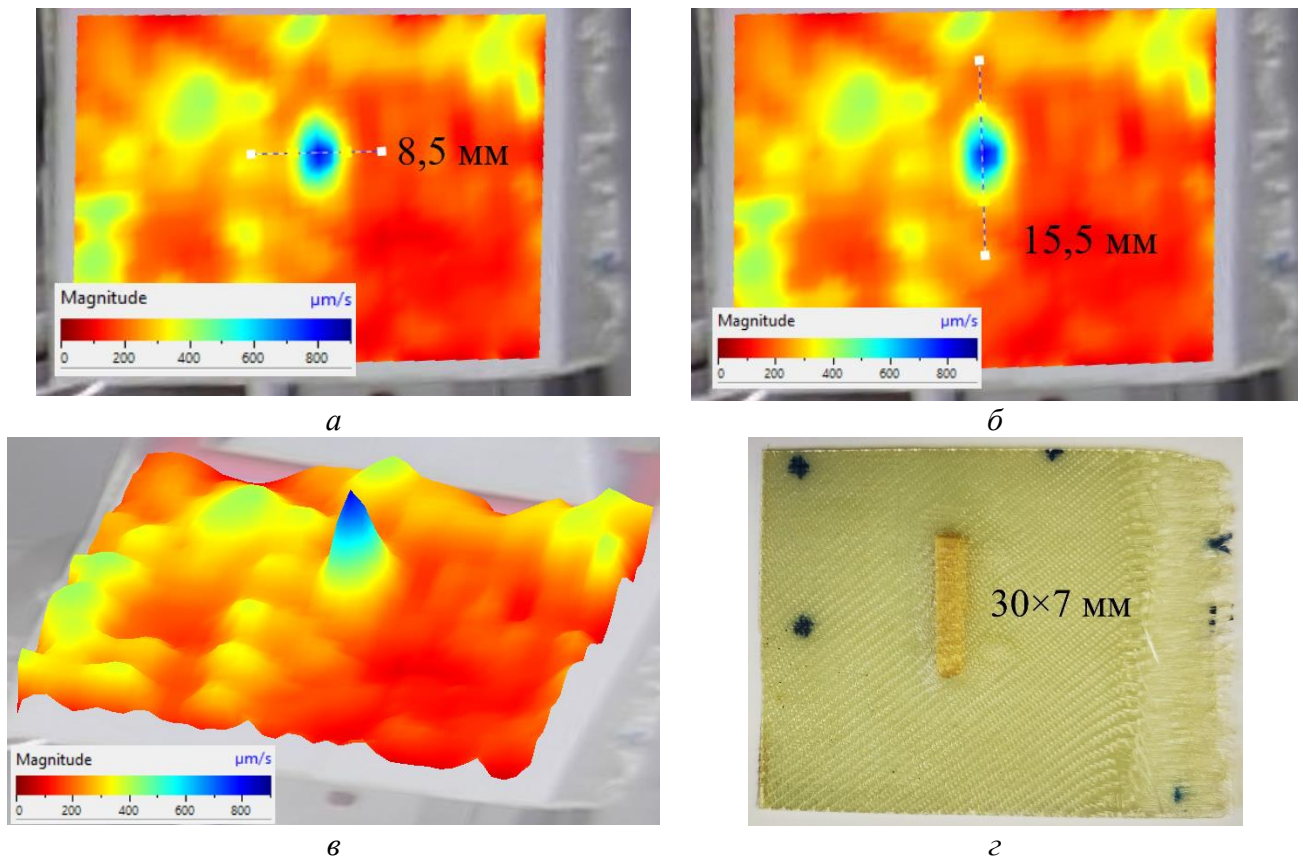
Рисунок 3.12 – Оценка поперечных размеров заклепки в сотовой панели с углепластиковым покрытием путем анализа 2D виброграммы при вводе ультразвука на расстоянии 20 мм с торцевой стороны композита

Одним из перспективных направлений использования бесконтактной ультразвуковой стимуляции является неразрушающий контроль хрупких материалов, а также изделий малой толщины. Было проведено исследование стеклопластиковых композитов толщиной 1 мм с закладными дефектами в виде металлической (рисунок 3.13) и деревянной (рисунок 3.14) вставок, а также квадратного отрезка угле-стекловолоконного материала, как показано на рисунке 3.12.



a, б – 2D виброграммы стеклопластикового композита, *в* – 3D виброграмма стеклопластикового композита, *г* – фотография стеклопластикового композита

Рисунок 3.13 – Оценка поперечных размеров закладного дефекта в виде металлической шайбы в стеклопластиковом композите путем анализа 2D и 3D виброграмм оборотной стороны пластины при вводе ультразвука на расстоянии 20 мм с торцевой стороны композита



a, б – 2D виброграммы стеклопластикового композита, *в* – 3D виброграмма стеклопластикового композита, *г* – фотография стеклопластикового композита

Рисунок 3.14 – Оценка поперечных размеров заложенного дефекта в виде деревянной вставки в стеклопластиковом композите путем анализа 2D и 3D виброграмм оборотной стороны пластины при вводе ультразвука на расстоянии 20 мм с торцевой стороны композита

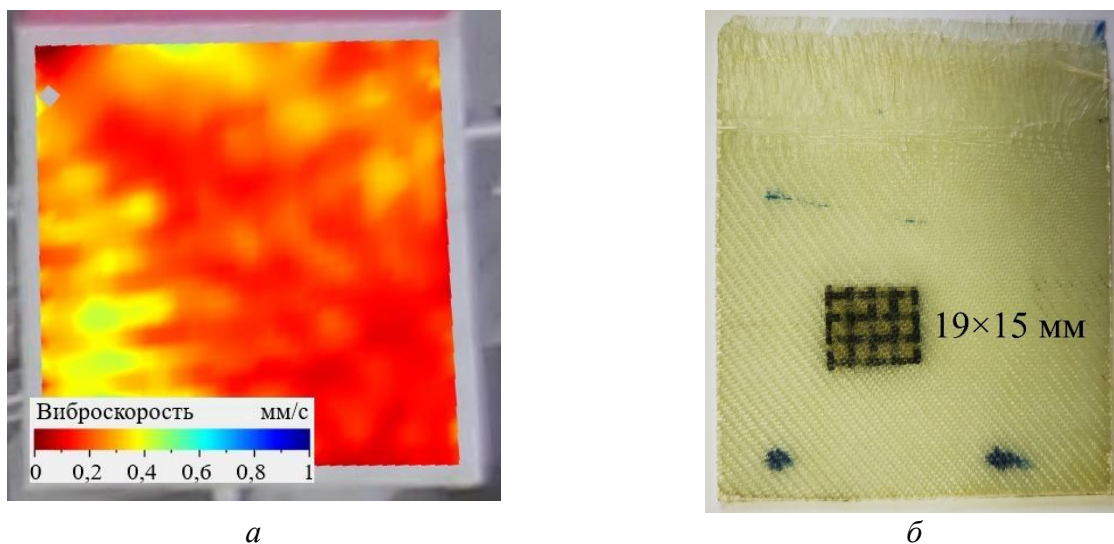
Подобно результатам исследования сотовой панели с заклепкой, лазерное вибросканирование стеклопластикового композита с металлической шайбой показало снижение амплитуды вибрационного сигнала в области закладного дефекта при ультразвуковой стимуляции (рисунок 3.13). В частности, амплитуда сигнала виброскорости снижалась с 300 до 50 мкм/с. Указанный эффект можно объяснить известным аналитическим выражением, определяющим связь между давлением p , скоростью звука c и сжатием (давлением) в бегущей волне, причем плотность стали ($\rho_{GFRP} = 7,9 \text{ гр/см}^3$) более, чем в четыре раза выше плотности стеклопластика ($\rho_{GFRP} = 1,66 \text{ гр/см}^3$). Как известно из [29], скорость движения частиц в акустической волне (v) обратно пропорциональна плотности среды (ρ)

и определяется как $\nu = \pm \frac{1}{\rho c} p$. Из указанного выражения следует, что дефекты, имеющие плотность меньшую, чем плотность материала исследуемой конструкции, будут отображаться на виброграммах в виде области с повышением амплитуды вибрационного сигнала, а в случае, когда плотность дефекта превышает плотность исследуемого материала, амплитуда вибраций в области дефекта ниже среднего значения вибраций в бездефектной зоне. В связи с этим, на виброграммах (рисунок 3.13, *a, б*) шайба визуализируется в виде прямоугольной зоны размерами $20 \times 19 \text{ мм}^2$, что связано с отслоением материала и наличием воздушной полости в месте расположения шайбы.

В отличие от металлической заклепки и шайбы, наличие закладного дефекта – деревянного бруска – было идентифицировано на виброграмме (рисунок 3.14) в виде усиления амплитуды скорости вибраций, что объясняется меньшей плотностью древесины ($\rho_{\text{сосны}} = 0,52 \text{ гр/см}^3$) по сравнению с плотностью стеклопластикового композита. Полученные в ходе эксперимента виброграммы приведены на рисунке 3.14.

По результатам вибросканирования стеклопластикового композита были определены размеры и расположение деревянной вставки. Измеренная зона неоднородности составила $15,5 \times 8,5 \text{ мм}^2$ (рисунок 3.14, *a, б*), в то время как фактический размер вставки составляет $30 \times 7 \text{ мм}^2$ (рисунок 3.14, *з*). Дефект был обнаружен с задней стороны пластины, на которой он не обнаруживается при визуальном контроле. Бесконтактную ультразвуковую стимуляцию осуществляли на расстоянии 20 мм с торцевой стороны композита.

Ниже приведены результаты исследования стеклопластикового композита с закладным дефектом в виде отрезка угле-стекловолоконной ткани. Плотность дефекта идентична плотности материала, используемого при производстве композита. Отрезок был внедрен в структуру пластины при изготовлении тестового образца и проклеен с использованием эпоксидной смолы. Фотография тестового образца показана на рисунке 3.15, *б*.



a – виброграмма стеклопластикового композита, *б* – фотография стеклопластикового композита с закладным дефектом в виде отрезка угле-стекловолоконного материала, полученная при бесконтактной ультразвуковой стимуляции с торцевой стороны композита на расстоянии 20 мм, и фотография образца

В результате лазерного вибросканирования стеклопластикового композита не был обнаружен закладной дефект в виде отрезка угле-стекловолоконного материала. Полученный результат можно объяснить с одной стороны идентичной плотностью материала дефекта и композита, а с другой стороны – хорошим склеиванием волокон в процессе формования композита. В связи с этим, наличие закладных дефектов в виде угле-стекловолоконного материала не приводит к значительному изменению амплитуды сигнала, и такие дефекты не могут быть обнаружены при проведении лазерного вибросканирования.

В рамках данного направления работ было проведено исследование ударных повреждений в гибридных композитах с использованием лазерной виброметрии при бесконтактной ультразвуковой стимуляции на основе магнитострикционного преобразователя. Объектом исследования был сэндвич-композит «лен–углерод–лен» размерами $150 \times 100 \times 4,5$ мм³, изготовленный путем вакуумирования с последующей термообработкой в автоклаве. Тестовый образец был подвергнут ударному повреждению энергией 40 Дж в центре, в результате чего на обратной стороне пластины образовалось отслоение льняных и углеродных волокон.

С целью обнаружения ударного повреждения бесконтактным способом ультразвуковую стимуляцию композита осуществляли с использованием магнестрикционного преобразователя на боковой поверхности образца в течение 60 с на расстоянии 20 мм от конца волновода. Ультразвуковую стимуляцию сопровождали лазерным вибросканированием поверхности исследуемого материала, как показано на рисунке 3.16.

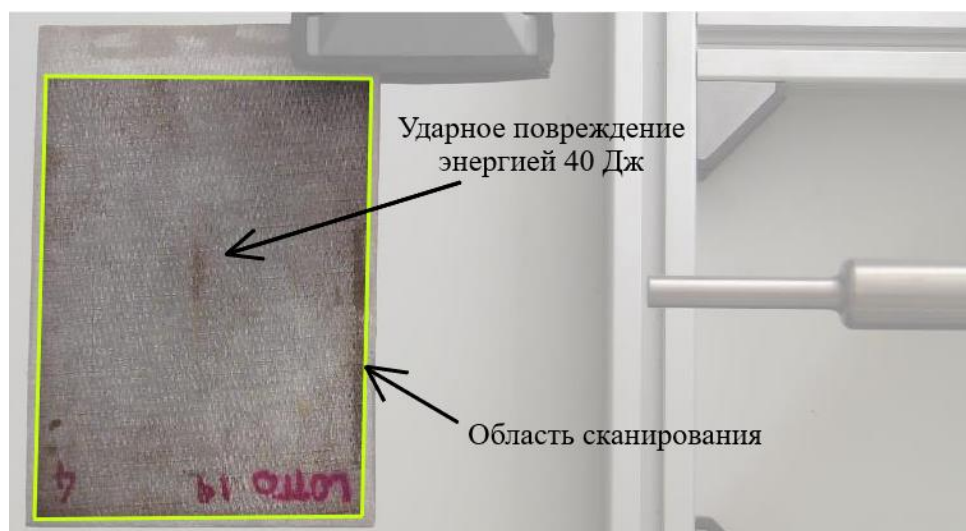
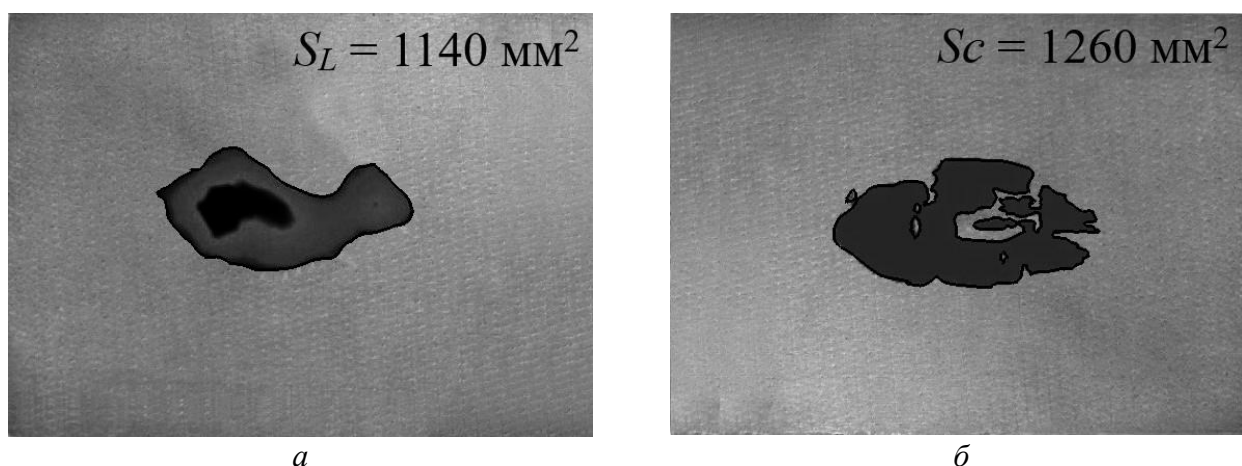


Рисунок 3.16 – Акустическая стимуляция гибридного лен-углеродного композита с использованием воздушно-связанного магнестрикционного излучателя

Для количественного сравнения эффективности неразрушающего контроля гибридного композита результаты лазерной виброметрии были дополнены результатами ультразвукового С-сканирования, поскольку контактный ультразвуковой контроль является одним из основных методов неразрушающего контроля полимерных композиционных материалов в соответствии с ГОСТ Р 56787-2015. В рамках настоящего исследования ультразвуковое сканирование выполнено на установке Harfang Veo 16:128 с использованием фазово-решетчатого ультразвукового преобразователя X3-PE-10M64E0.6P (Sonatest) с резонансной частотой 10 МГц. Скорость сканирования составила 2 мм/с, шаг 0,1 мм. Результаты С-сканирования (рисунок 3.17, б) были использованы в качестве эталонных данных по определению расположения и размеров ударного повреждения в гибридном FCF-композите и сравнены с результатами лазерной виброметрии (рисунок 3.17, а).



Фотографии композита: *a* – с наложением результатов анализа виброграмм, *б* – с наложением результатов анализа ультразвукового С-скана

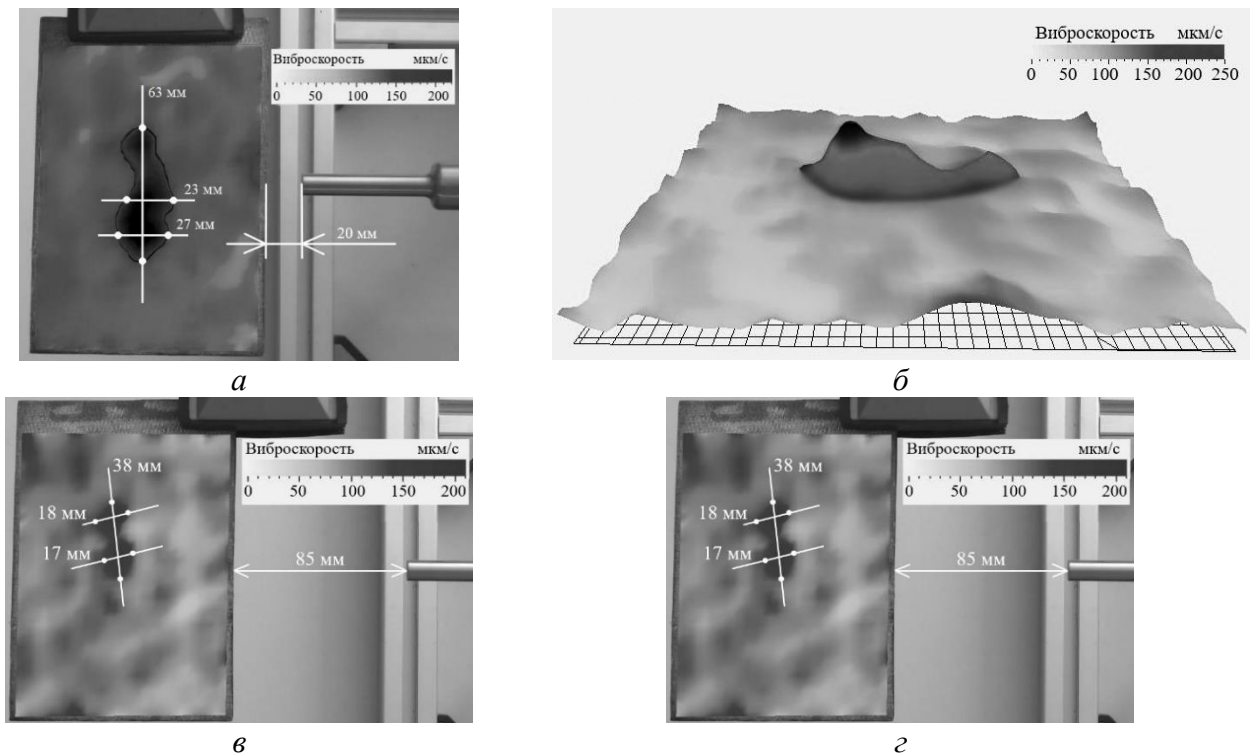
Рисунок 3.17 – Сравнение результатов неразрушающего контроля лен–углерод–лен композита с использованием лазерной виброметрии при бесконтактной ультразвуковой стимуляции с использованием воздушно-связанного магнитострикционного преобразователя и ультразвукового С-сканирования

Результаты ультразвукового С-сканирования позволили обнаружить множественные расслоения в гибридном композите, причем максимальная площадь дефекта с поперечными размерами $68 \times 33 \text{ мм}^2$ была зарегистрирована на глубине 3,7–3,8 мм с лицевой стороны образца (рисунок 3.17, *б*). На указанной глубине площадь расслоения (S_C) составила 1260 мм^2 , что примерно соответствует оценке, полученной с помощью лазерного вибросканирования при ультразвуковой стимуляции с использованием воздушно-связанного магнитострикционного преобразователя ($S_L = 1140 \text{ мм}^2$) (рисунок 3.17, *а*). Сходимость результатов лазерной виброметрии и С-сканирования оценивалась с использованием выражения для определения относительной погрешности:

$$\varepsilon = \frac{|S_L - S_C|}{S_C} \times 100. \quad (3.10)$$

В описываемом эксперименте относительная погрешность составила 9,5 %. По результатам анализа данных можно сделать заключение, что ультразвуковое С-сканирование подтвердило эффективность применения бесконтактной ультразвуковой стимуляции для неразрушающего контроля полимерных композитов с использованием воздушно-связанного магнитострикционного преобразователя.

Ниже приведены результаты определения площади ударного повреждения при изменении расстояния между волноводом и торцевой поверхностью исследуемого композита. На рисунке 3.18 приведены виброграммы, полученные при ультразвуковой стимуляции с боковой поверхности композита в течение 60 с на расстоянии 20 мм (рисунок 3.18, *а, б*) и 85 мм (рисунок 3.18, *в, г*). Вибрации на поверхности композита измеряли с использованием сканирующего лазерного виброметра в режиме быстрого преобразования Фурье в диапазоне частот $15 \div 25$ кГц. Площадь сканирования составляла 96×133 мм², количество точек – 100×100 , шаг сканирования – 1,3 мм.



а, в, г – 2D виброграммы композита, *б* – 3D виброграмма композита
 Расстояние между пластиной и торцом излучателя: *а, б* – 20 мм, *в, г* – 85 мм

Рисунок 3.18 – Оценка поперечных размеров ударного повреждения энергией 40 Дж в гибридном лен–углерод–лен композите путем анализа 2D и 3D виброграмм

Из полученных экспериментальных данных следует, что как на 2D (рисунок 3.18, *а*), так и на 3D (рисунок 3.18, *б*) виброграммах отчетливо видны следы ударного повреждения, образовавшего зону дефекта размером 63×27 мм вблизи тыльной поверхности образца (отношение сигнал/шум составляет 13). Отметим, что область ввода ультразвука характеризовалась интенсивными

поверхностными вибрациями (среднее значение амплитуды скорости вибраций составило 150 мкм/с). Увеличение расстояния между образцом и волноводом до 85 мм привело к уменьшению средней скорости вибраций в бездефектной зоне до 70–80 мкм/с, что свидетельствует о снижении уровня акустической энергии, вводимой в исследуемый объект. Соответственно, измеренный размер дефекта уменьшился до 38×17 мм², а отношение сигнал/шум – до 10 (рисунок 3.17, в). Относительная погрешность в данном случае составила 49 %. Несмотря на увеличение погрешности определения размеров неоднородности, бесконтактная ультразвуковая стимуляция на расстоянии 85 мм от исследуемого объекта позволяет сделать заключение о наличии неоднородности в структуре материала и определить ее положение.

3.5. Оценка влияния стоячих акустических волн на проведение контроля качества композитов с использованием бесконтактной ультразвуковой стимуляции фиксированной частоты

В настоящем исследовании оценено влияние стоячих волн на результаты лазерной виброметрии при акустической стимуляции с использованием воздушно-связанного магнестрикционного излучателя. Фотография экспериментальной установки для контроля углепластиковых композитов приведена на рисунке 3.19.

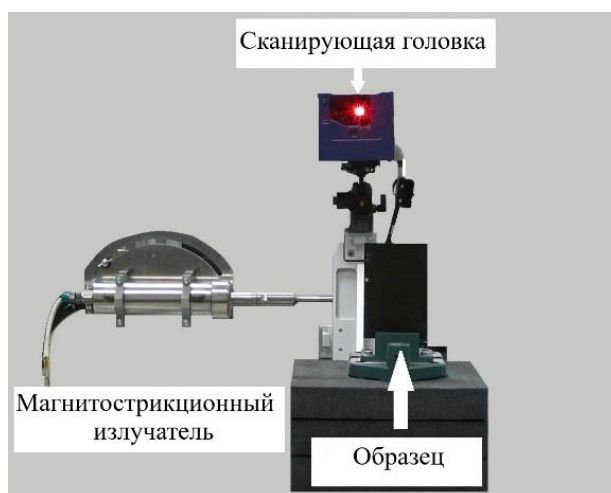


Рисунок 3.19 – Схема акустической стимуляции углепластикового композита с использованием воздушно-связанного магнестрикционного излучателя

Система возбуждения обеспечивала бесконтактную ультразвуковую стимуляцию на резонансной частоте магнестрикционного излучателя, создавая области разрежения и сжатия в воздушной среде. Более подробно процедура измерения вибраций в воздухе с использованием лазерного виброметра описана в работе [71]. В условиях настоящего эксперимента амплитудное значение виброперемещения на торце волновода составляло 30 мкм.

При резонансной ультразвуковой стимуляции в воздушной среде между излучателем и объектом контроля происходит интерференция падающей на объект контроля и отраженной от него ультразвуковых волн в соответствии с принципом суперпозиции. Возникающие интерференционные явления могут привести как к увеличению амплитуды колебаний в результирующей волне, так и к ее снижению [186]. В работе [222] показано, что регулирование воздушного зазора (d) между излучателем и исследуемым материалом существенно изменяет эффективность передачи ультразвука. Для достижения оптимального согласования системы в целом величина воздушного зазора должна быть кратна половине длины акустической волны (λ_{air}), распространяющейся в воздушной среде. Таким образом, условие согласования можно записать в виде:

$$d = n \times \lambda_{air} / 2, \quad (3.11)$$

где $n \in \mathbb{N}$.

Физически это означает условие согласования по фазе колебаний в образовавшейся стоячей волне. Например, на рисунке 3.20 приведен график распределения амплитуды вибраций, возникающих в воздушной среде между торцом излучателя и объектом в форме пластины. Видно, что амплитуда виброскорости ультразвуковой волны в воздухе спадает неравномерно. Таким образом, интерференция падающей и отраженной волн приводит к существенным искажениям амплитуды результирующего сигнала. Это также объясняется высокой мощностью вводимого ультразвука на постоянной частоте 20,9 кГц, наличием высших гармоник и нелинейных явлений, приводящих к расширению спектрального состава сигнала возбуждения. Следует заметить, что максимальное значение виброскорости в воздушной среде (до 200 мкм/с) наблюдалось

на расстояниях до 25 мм от излучателя. Далее, на расстояниях от 25 до 80 мм от излучателя, величина вибраций оставалась практически постоянной (около 150 мкм/с), после чего умеренно снижалась до 50 мкм/с на расстоянии до 230 мм. Из этого следует, что рекомендуемое расстояние между контролируемым объектом и воздушно-связанным магнитострикционным излучателем не должно превышать 80 мм, причем, как было отмечено выше, важно обеспечить фазовую синхронизацию между волной, падающей на объект контроля, и волной, отраженной от него.

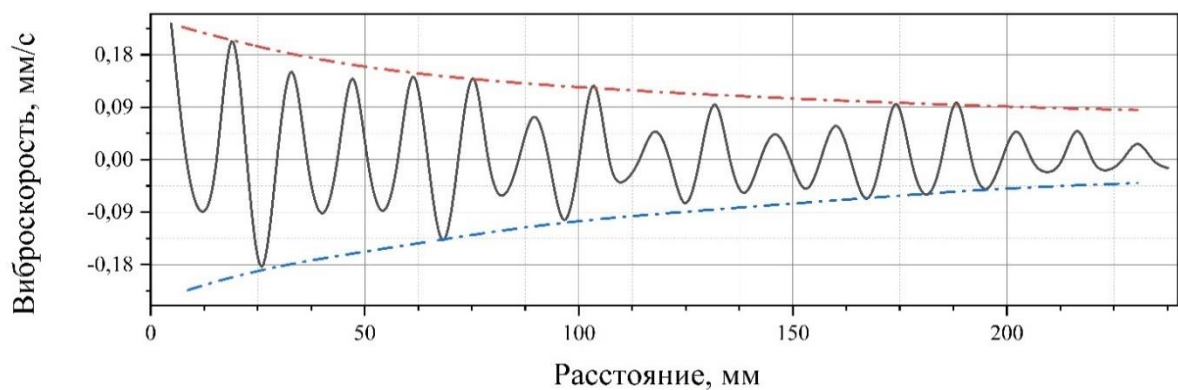
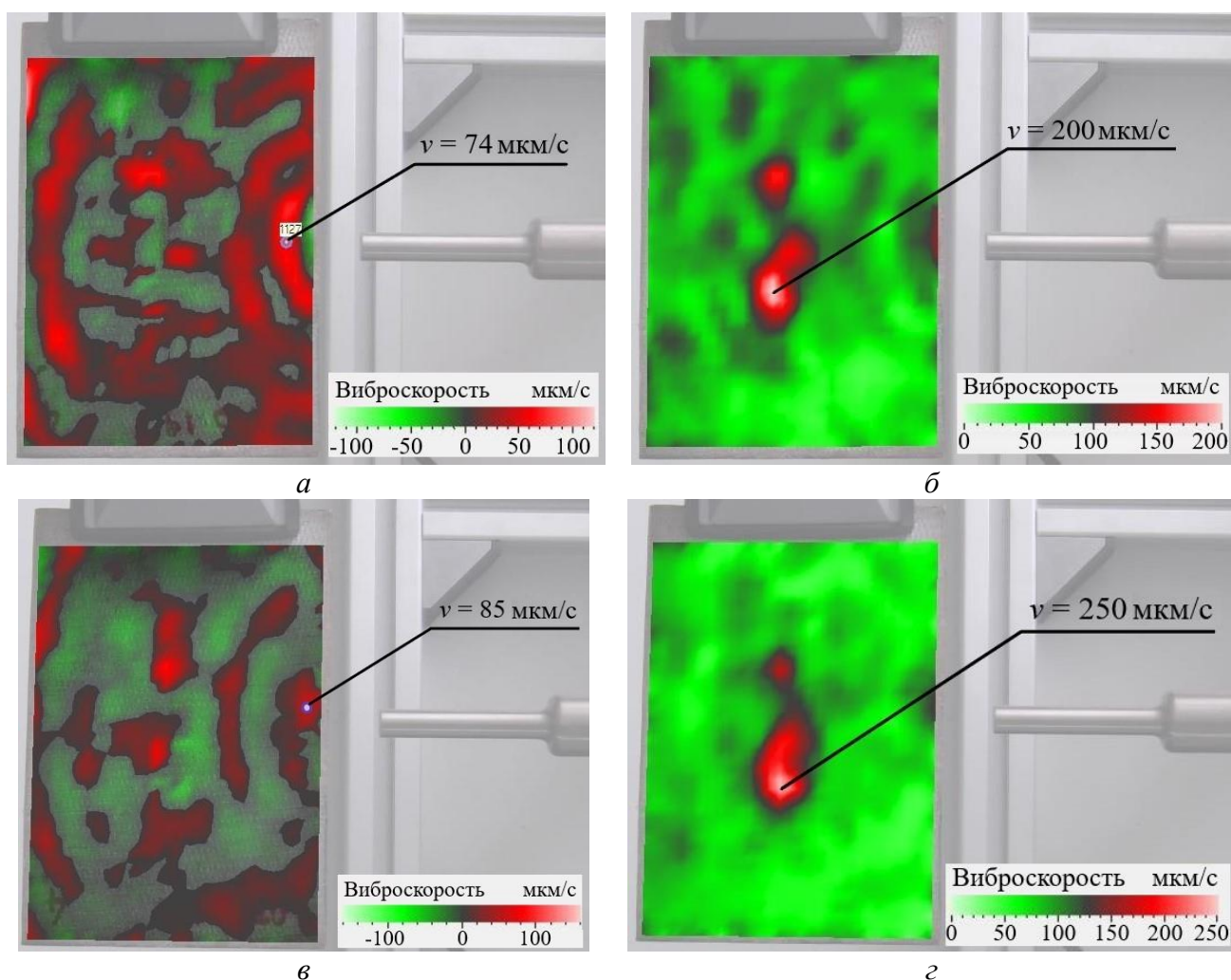


Рисунок 3.20 – Распределение амплитуды виброскорости в воздушной среде на различных расстояниях между излучателем и исследуемым объектом (частота 20,9 кГц, длина волны 14,3 мм)

Вышеприведенные положения были апробированы на примере исследования распространения упругих волн в гибридном лен–углерод–лен композите, подробно описанном выше. В частности, вибросканирование гибридного композита проводили при размещении воздушно-связанного магнитострикционного излучателя на расстоянии 15 мм (приближено к $\lambda_{air} = 14,3$ мм) и 21,5 мм (соответствует $3\lambda_{air}/2$) от торцевой поверхности пластины. На рисунке 3.21 приведены экспериментальные виброграммы.

В результате экспериментального исследования установлено, что на расстоянии 21,5 мм от торцевой поверхности композита до волновода скорость вибраций фронта волны при фазовом значении колебания частицы среды -114° в месте ввода ультразвука достигает 85 мкм/с (рисунок 3.21, в) при $d = 20$ мм, в то время как аналогичное значение фронта упругой волны при $d = 15$ мм составляет 75 мкм/с.



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

В процессе распространения ультразвука в структуре композита происходит взаимодействие упругой волны с ударным повреждением, что сопровождается локальным увеличением амплитуды вибраций из-за снижения жесткости материала в указанной области. Зарегистрированная амплитуда виброскорости в зоне дефекта также имеет большее значение (250 мкм/с) при $d = 20$ мм, чем при амплитуде виброскорости в области дефекта (200 мкм/с) при $d = 15$ мм. Таким образом, размещение волновода на меньшем расстоянии до контролируемого материала не привело к увеличению амплитуды вводимого акустического сигнала.

В то же время полученные экспериментальные результаты при $d = 21,5$ мм подтвердили обеспечение фазовой синхронизации ($d = 3\lambda_{air}/2$) между волной, падающей на объект контроля, и волной, отраженной от него, что позволило повысить эффективность бесконтактного ввода ультразвука и проведения неразрушающего контроля в целом.

На рисунке 3.22 показано акустическое волновое поле, отражающее распределение колебаний частиц воздуха над композиционным материалом при его ультразвуковой стимуляции (частота 23,5 кГц).

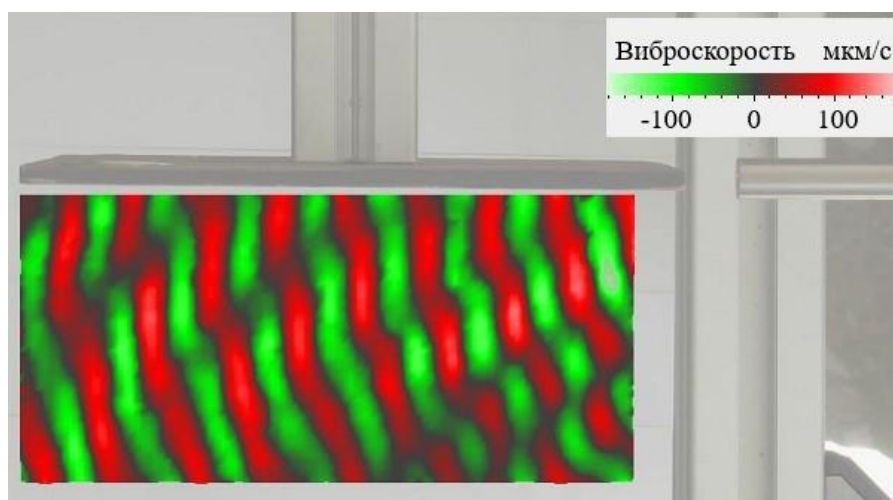


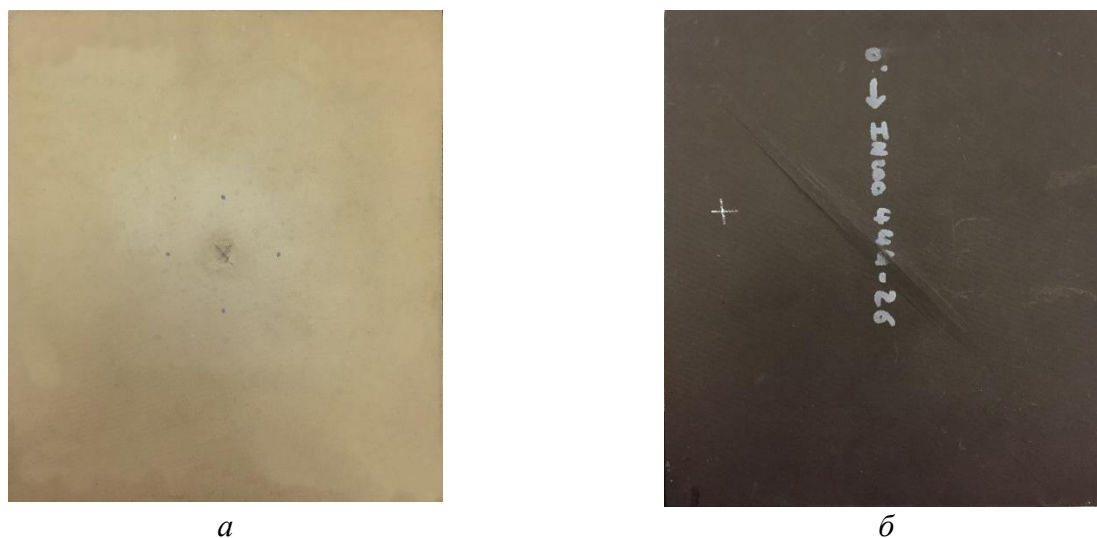
Рисунок 3.22 – Виброграмма ультразвукового поля в воздушной среде под тыльной поверхностью гибридного композита при проведении бесконтактной ультразвуковой стимуляции на частоте 23,5 кГц

В результате затухания ультразвука в воздушной среде амплитуда скорости колебаний частиц воздуха снижается до 150 мкм/с по сравнению с амплитудой скорости вибраций на поверхности композита (250 мкм/с), возникающих в аналогичных условиях (рисунок 3.21, *з*). Несмотря на наличие дефекта, фронт распространяющейся волны был зарегистрирован без искажений, что объясняется отсутствием резонансного отклика в области дефекта при проведении моночастотной ультразвуковой стимуляции. Подробно методика оценки акустических волновых полей, генерируемых в воздухе при проведении неразрушающего контроля, описана в [71].

3.6. Сравнение лазерной виброметрии при бесконтактной ультразвуковой стимуляции и классических методов неразрушающего контроля для обнаружения дефектов в композиционных материалах

В настоящем разделе оценена эффективность использования бесконтактной ультразвуковой стимуляции для обнаружения дефектов в композиционных материалах (ударного повреждения) по сравнению с традиционными методами неразрушающего контроля: лазерной виброметрией при контактной ультразвуковой стимуляции с использованием пьезоэлектрических преобразователей, традиционным ультразвуковым методом (С-сканирование), а также инфракрасной вибротермографией, основанной на сочетании инфракрасной термографии и мощной контактной ультразвуковой стимуляции.

Объектом исследования были выбраны пластины углепластикового композита размерами $155 \times 175 \times 1,5$ мм³ с ударным повреждением энергией 18 Дж в центре. Изображения лицевой и обратной сторон пластины приведены на рисунке 3.23.



a – лицевая сторона, *б* – обратная сторона

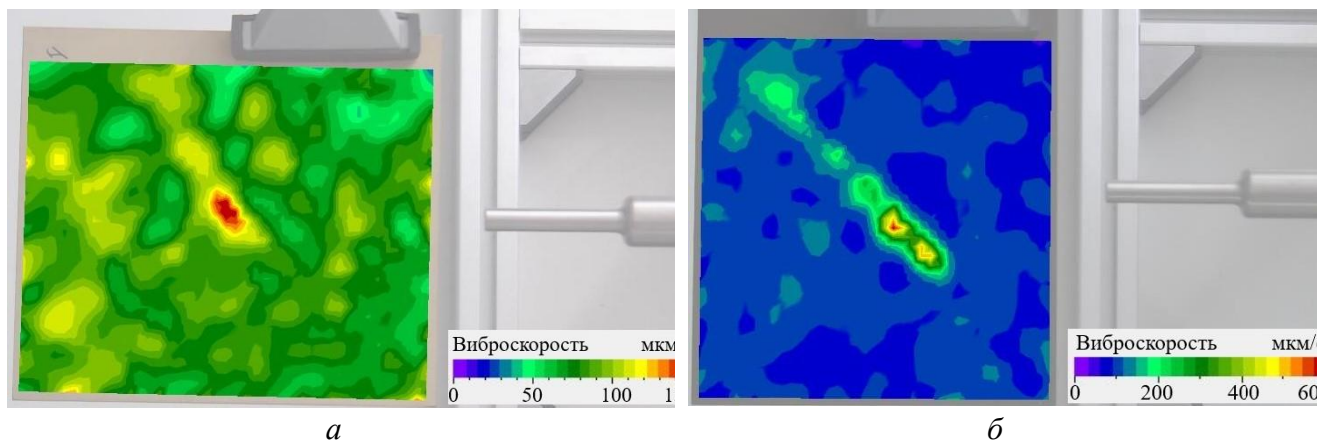
Рисунок 3.23 – Фотографии сторон контрольного образца из углепластика

Результаты оценки площади дефекта с использованием трех вышеуказанных методов неразрушающего контроля систематизированы и приведены в таблице 3.3. Вычисление отношения сигнал/шум проведено с использованием выражения (3.1).

Таблица 3.3 – Результаты контроля качества углепластикового композита при проведении лазерной виброметрии, теплового контроля, ультразвуковой вибротермографии и ультразвукового сканирования

Исследуемая поверхность	Вид процедуры НК						
	Лазерная виброметрия (бесконтактная стимуляция)		Тепловой контроль		УЗ вибротермография		УЗ сканирование (С-скан)
	$S_{def.}, \text{мм}^2$	SNR	$S_{def.}, \text{мм}^2$	SNR	$S_{def.}, \text{мм}^2$	SNR	$S_{def.}, \text{мм}^2$
Лицевая поверхность	300	7,6	1680	7,6	250	3,1	175
Обратная поверхность	1580	18	1510	14	860	2,2	1530

В процессе ультразвуковой лазерной виброметрии углепластиковый композит подвергали бесконтактной ультразвуковой стимуляции на фиксированной частоте 20,9 кГц. Вибрации на поверхности исследуемого композита, возникающие в процессе акустической стимуляции, регистрировали с использованием сканирующей лазерной виброметрии. Время сканирования составляло 3 мин. Результатом сканирования явилось изображение амплитуды вибраций на лицевой (рисунок 3.24, *а*) и обратной (рисунок 3.24, *б*) поверхностях контрольного образца.



а – лицевая поверхность, *б* – обратная поверхность

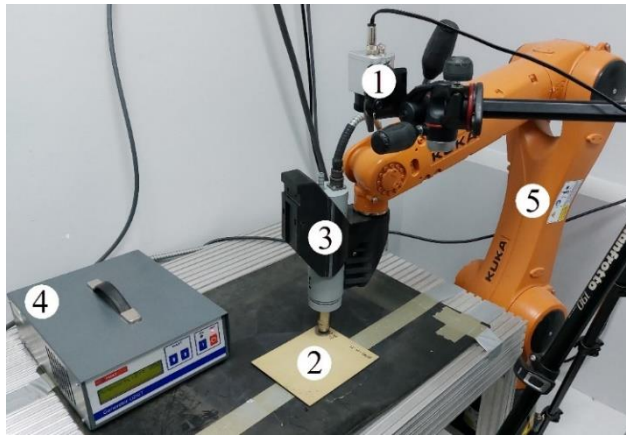
Рисунок 3.24 – Изображения вибраций на лицевой и обратной поверхностях контрольного образца из углепластикового композита, полученные в результате лазерного вибросканирования при бесконтактной ультразвуковой стимуляции материала

Из полученных данных видно, что область повреждения, идентифицированная на лицевой поверхности образца, существенно меньше зоны повреждения, образованной в результате сканирования обратной поверхности. Указанное различие в данных связано с пирамидальной структурой ударного повреждения в слоистом композите и ростом области неоднородности по мере увеличения глубины ее залегания. Измеренная площадь дефекта составила 510 мм² на лицевой поверхности пластины и 1580 мм² на обратной поверхности, отношение сигнал/шум 7,6 и 18 соответственно.

Для оценки эффективности бесконтактной ультразвуковой стимуляции проводили сравнение со стандартными методами неразрушающего контроля полимерных композиционных материалов. Одним из экспрессных методов является тепловой контроль, основанный на регистрации температурных полей на поверхности контролируемых изделий при их тепловой стимуляции с использованием оптических нагревателей, ультразвуковых излучателей, и применении других устройств. Фактически наличие структурных неоднородностей искажает регулярный характер тепловых потоков, что проявляется на поверхности контролируемого изделия в виде неравномерных температурных распределений. Указанные эффекты регистрируют с использованием инфракрасных камер, в результате чего определяют размер и положение дефектов.

В настоящем исследовании тепловой контроль углепластикового композита проводили с использованием лабораторной установки, показанной на рисунках 3.25 и 3.26. Регистрацию температурного поля на поверхности исследуемого образца осуществляли с использованием инфракрасной камеры OPTRIS PI640, работающей в спектральном диапазоне 8–14 мкм. Полученные последовательности термограмм анализировали на персональном компьютере с использованием программного обеспечения (ПО) ThermoLab Pro, разработанного в Томском политехническом университете и позволяющего проводить обработку температурных данных с использованием различных алгоритмов, таких как метод главных компонент, преобразование Фурье и др. Применение методов математического анализа для обработки последовательности термограмм позволяет улучшить контрастность дефектных зон, повысить соотношение сигнал–шум.

В зависимости от способа нагрева исследуемого образца в работе были применены два метода активного инфракрасного теплового контроля: с ультразвуковой и оптической стимуляцией. На рисунке 3.25 приведена фотография лабораторной установки теплового контроля при ультразвуковой стимуляции. Лабораторная установка теплового контроля при ультразвуковой стимуляции включает ИК камеру Optris PI640 (1), магнитострикционный излучатель (3) со сферическим наконечником (частота 22 кГц, потребляемая мощность управляющего блока 250 Вт), который прижимали к образцу роботоманипулятором KUKA KR 10 R1100 six. Время контроля составляло 40 с, что включает время ультразвуковой стимуляции (10 сек) и время наблюдения (30 с).

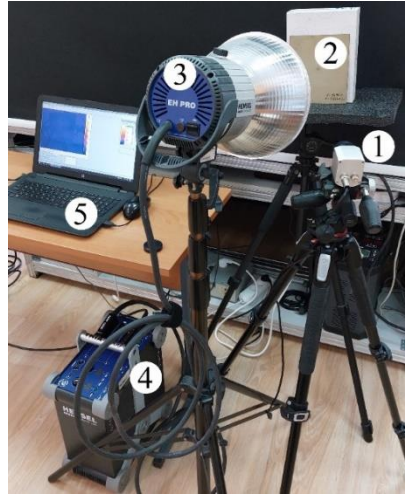


1 – ИК камера, 2 – объект исследования, 3 – контактный магнитострикционный излучатель, 4 – блок управления магнитострикционного излучателя, 5 – робот-манипулятор

Рисунок 3.25– Лабораторная установка теплового контроля при ультразвуковой стимуляции

На рисунке 3.26 приведена фотография лабораторной установки теплового контроля при оптической стимуляции. Оптическую стимуляцию осуществляли коротким тепловым импульсом от ксеноновой лампы-вспышки (потребляемая электрическая мощность 2 кВт) – № 3 на рисунке 3.26. Длительность импульса нагрева и мощность задавали блоком управления (№ 4 на рисунке 3.26) на уровне 5 мс и 2 кВт соответственно. В процессе тепловой стимуляции и в течение 10 сек после ее окончания регистрировали температурное поле на поверхности композита с использованием ИК камеры (№ 1 на рисунке 3.26.). Общее время контроля составило 30 сек. Временная дискретизация записи данных составила 100 мс

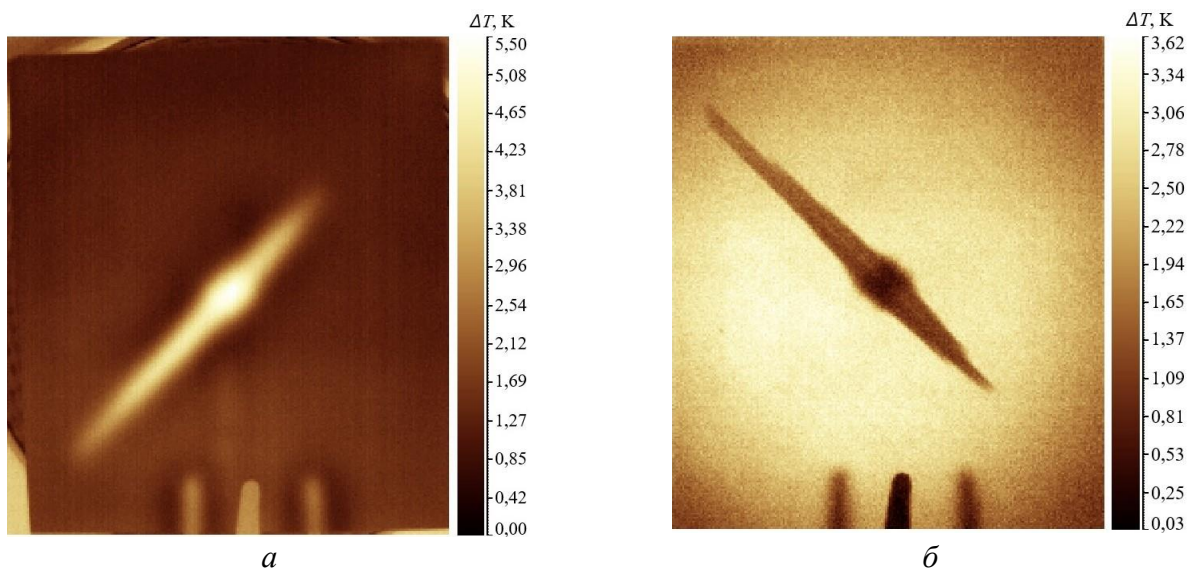
(частота записи кадров 10 Гц). Полученная последовательность термограмм далее была использована для анализа данных в ПО ThermoLab Pro (№ 5 на рисунке 3.26).



1 – ИК камера, 2 – объект исследования, 3 – ксеноновая лампа-вспышка, 4 – управляющий блок, 5 – ноутбук с ПО ThermoLab Pro

Рисунок 3.26 – Лабораторная установка теплового контроля при оптической стимуляции

На рисунке 3.27 приведены ИК термограммы лицевой (а) и обратной (б) поверхностей композита, отображающие максимальные величины текущего контраста, то есть оптимальные условия контроля.

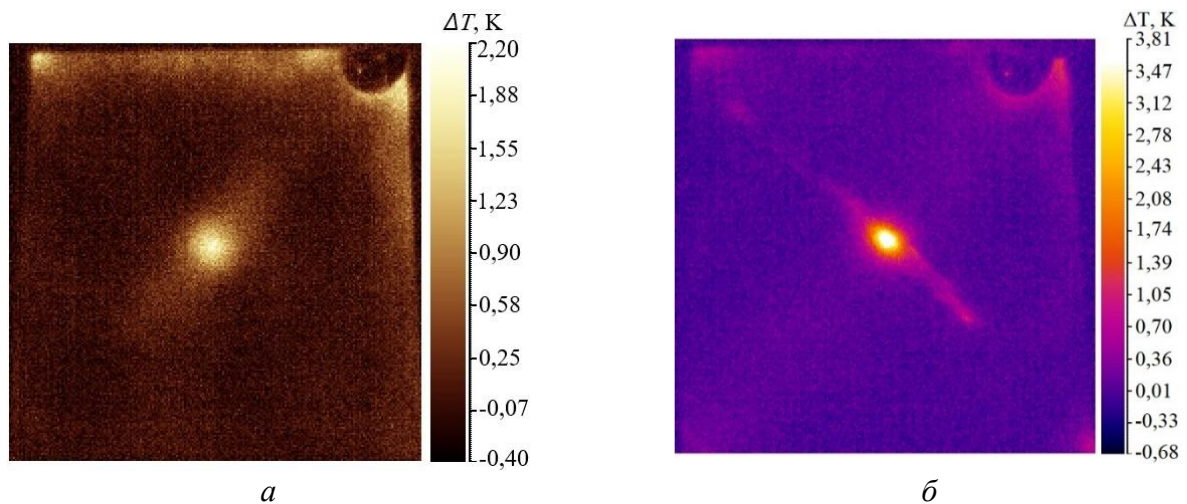


а – лицевая поверхность, *б* – обратная поверхность

Рисунок 3.27 – Инфракрасные термограммы лицевой и обратной поверхностей контрольного образца из углепластикового композита, полученные с использованием импульсной оптической инфракрасной термографии

Как видно из рисунка 3.27, результаты теплового контроля исследованного контрольного образца показали сопоставимые по форме и размеру температурных распределений результаты обнаружения дефекта на лицевой (рисунок 3.27, *а*) и обратной (рисунок 3.27, *б*) поверхностях пластины. Дефект имеет достаточно четкие очертания клиновидной формы, что связано с характерными для теплового метода условиями проведения НК: тепловая энергия от импульсного источника равномерно распределяется в бездефектной зоне и «накапливается» вокруг воздушных полостей, позволяя визуализировать наличие расслоения в композите. Измеренная площадь дефекта составила 1550 мм² на обратной поверхности пластины и 950 мм² на лицевой поверхности, отношение сигнал/шум – 3,1 и 2,2 соответственно. При этом величина дифференциального температурного сигнала над дефектом достигала 5 °С.

Далее была проведена УЗ вибротермография с использованием лабораторной установки, представленной на рисунке 3.25. Углепластиковый композит подвергли ультразвуковой стимуляции с использованием контактного магнитострикционного излучателя, прижимаемого к поверхности роботом-манипулятором. В процессе ультразвуковой стимуляции на поверхности исследуемой пластины регистрировали температурное поле с использованием ИК камеры Optris PI640 (рисунок 3.28).



а – лицевая поверхность, *б* – обратная поверхность

Рисунок 3.28 – Инфракрасные термограммы лицевой и обратной поверхностей контрольного образца из углепластикового композита, полученные в результате мощной ультразвуковой стимуляции в течение 10 секунд

По результатам анализа последовательности инфракрасных термограмм, полученных при контроле лицевой и обратной поверхностей композита, в области дефекта было зарегистрировано локальное увеличение температуры. В частности, величина температурного сигнала на лицевой поверхности материала составила $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 3.28, *а*) и $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ на обратной поверхности (рисунок 3.28, *б*) по отношению к бездефектной зоне. Таким образом, оцененная величина площади дефекта составила 250 мм^2 на лицевой стороне пластины и 860 мм^2 на обратной поверхности, а отношение сигнал/шум составило 3,1 и 2,2 соответственно. Из полученных данных следует, что наличие интенсивного трения стенок дефекта при ультразвуковой стимуляции приводит к локальному увеличению температуры в указанной зоне, что позволяет определить размер и расположение неоднородности при анализе последовательности инфракрасных изображений.

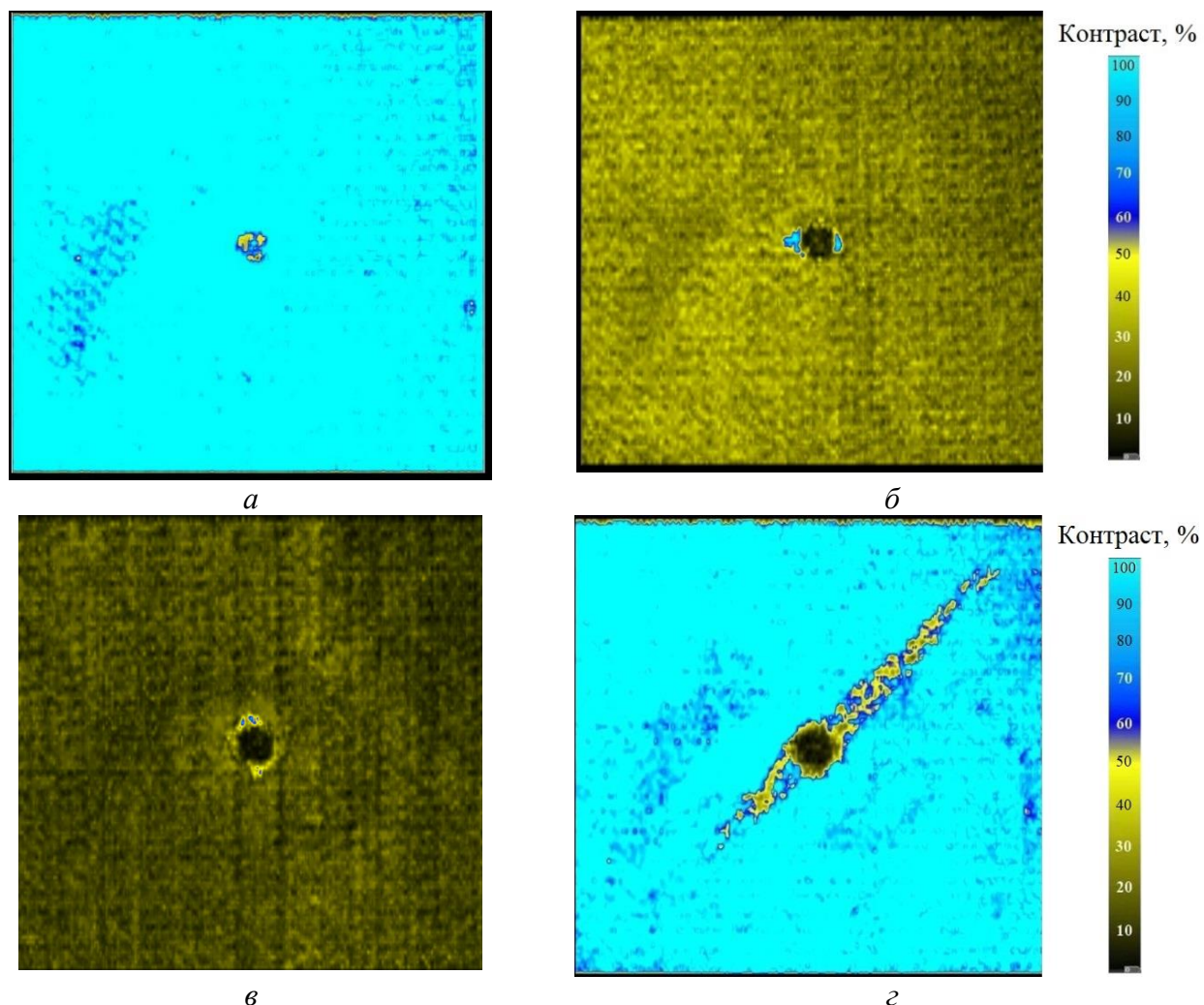
В качестве эталонного метода испытаний в настоящем исследовании использовали ультразвуковой контроль. Испытания композита проводили с использованием коммерческого 3D-сканера производства Ideal System (Германия), использующего пьезоэлектрический преобразователь диаметром 16 мм (рабочая частота 15 МГц, фокусное расстояние 50,8 мм). Шаг сканирования составлял 1 мм. Вид лабораторной установки показан на рисунке 3.29.



Рисунок 3.29 – Коммерческий ультразвуковой 3D-сканер (Ideal System)

При проведении ультразвукового контроля композиционный материал погружали в ванну с водой, а затем подвергали сканированию с использованием

импульсной эхографической процедуры на основе коммерческого ультразвукового 3D-сканера (рисунок 3.29). Результаты ультразвукового С-сканирования представлены на диаграммах текущего контраста, отображающих расположение ударного повреждения на различной глубине залегания в исследованном контрольном образце (рисунок 3.30).



Глубина дефекта: *а* – 0,1 мм, *б* – 0,9 мм, *в* – 1,3 мм, *г* – 1,5 мм (максимальный размер дефекта)

Рисунок 3.30 – Результаты ультразвукового С-сканирования ударного повреждения в контрольном образце из углепластикового композита толщиной 1,6 мм

Как видно на рисунке 3.30, область дефекта представлена множественными расслоениями, расположенными на различных глубинах неоднородного материала. Отдельные участки общего расслоения также распределяются по всей толщине материала ввиду неравномерного распределения ударной нагрузки. Как правило, дефект имеет вид пирамиды, вершина которой находится вблизи к месту удара,

т. е. на лицевой поверхности образца [74]. Площадь последовательных отслоений увеличивается с глубиной залегания дефекта, достигая максимального значения на тыльной поверхности образца, особенно в случае повреждения тонких панелей из композитов [223]. В настоящем исследовании площадь расслоения, измеренная в углепластике, составила 175 мм^2 на глубине $0,1 \text{ мм}$. По мере увеличения глубины залегания ударного повреждения площадь неоднородности возросла до 330 мм^2 на глубине $0,9 \text{ мм}$ и до 400 мм^2 на глубине $1,3 \text{ мм}$. Максимальная площадь расслоения, по форме напоминающего «бабочку», зарегистрирована на глубине $1,3\text{--}1,5 \text{ мм}$ и составила 1530 мм^2 (рисунок 3.30, з). Сравнение результатов контроля качества углепластиковой пластины с использованием четырех методов неразрушающего контроля приведено в таблице 3.3.

Результаты контроля лицевой поверхности композита с использованием лазерной виброметрии (рисунок 3.24, а) сопоставимы с результатами ультразвукового С-сканирования на глубине $0,9 \text{ мм}$ (рисунок 3.30, б). В частности, измеренная площадь дефекта на виброграмме в $1,1$ раз меньше соответствующего значения, полученного по результатам С-сканирования. Результаты контроля на обратной поверхности углепластика показали отличие в $1,03$ раз по сравнению с эталонным С-сканированием. На основании полученных данных можно предположить, что бесконтактная ультразвуковая стимуляция с использованием воздушно-связанного магнитострикционного преобразователя позволяет активировать вибрации подповерхностных слоев композита на глубине до 1 мм , т. е. достаточно точно определить площадь расслоений в композиционных материалах при двухстороннем доступе к контролируемому изделию.

При сравнении результатов оптического теплового контроля и ультразвукового С-сканирования лицевой поверхности контрольного образца установлено, что по оцененной площади дефекта результаты теплового контроля превосходят в $9,6$ раз результаты эталонного метода. На обратной поверхности результаты контроля показывают различие в $0,98$ раза, что можно объяснить возникновением тепловой диффузии в области неоднородностей. Несмотря на это, результаты контроля на обратной поверхности образца имеют лучшее совпадение

с результатами эталонного С-сканирования по сравнению с другими методами. Тепловой контроль является экспрессным, что определяет целесообразность его использования в качестве альтернативного метода неразрушающего контроля полимерных композитов.

Из полученных данных (таблица 3.3) видно, что наилучшее совпадение результатов контроля с эталонным методом показал метод УЗ вибротермографии. В частности, результаты контроля лицевой и обратной поверхностей углепластикового композита отличались не более чем в 1,4 и 0,56 раз по сравнению с результатами С-сканирования. По сравнению с данными лазерной виброметрии при бесконтактной стимуляции, эти данные продемонстрировали большую погрешность измерений. Это связано с тем, что лишь часть акустической энергии расходуется на генерацию тепла в результате механического трения стенок дефектов. В связи с этим, несмотря на очевидные преимущества контактного ввода ультразвука, информативность результатов вибротермографии уступает результатам лазерной виброметрии. Также важно заметить, что при контактном вводе ультразвука возникает вероятность повреждения объекта контроля в точке ввода ультразвука, особенно при контроле тонких и хрупких объектов. Указанные особенности ультразвуковых методов неразрушающего контроля следует учитывать при планировании экспериментов.

3.7. Выводы по главе 3

Разработан способ неразрушающего контроля композиционных и полимерных материалов на основе взаимодополняющего использования лазерного вибросканирования и бесконтактной ультразвуковой стимуляции с использованием магнитострикционного преобразователя. Ключевым моментом предложенной методологии является оптимизация работы воздушно-связанного акустического преобразователя с целью обеспечить информативный уровень вибрационного сигнала на поверхности контролируемых изделий, достаточный для обнаружения структурных неоднородностей. Оптимизация конфигурации

титанового волновода позволила до 7 раз повысить КПД излучателя с целью интенсификации процесса УЗ генерации. По результатам экспериментальных исследований и моделирования конфигурации волноводов установлено, что лучшими акустическими характеристиками обладает ступенчатый цилиндрический волновод с плоским наконечником. Данный излучатель способен максимально эффективно преобразовывать потребляемую электрическую энергию в акустическую по сравнению с другими рассмотренными типами волноводов. Указанные преимущества определили дальнейшее использование ступенчатого цилиндрического волновода при контроле качества материалов и изделий. Измерение диаграммы направленности бесконтактного магнитострикционного излучателя с использованием лазерной виброметрии позволило определить пространственную направленность излучения и оптимизировать условия проведения неразрушающего контроля полимерных и композиционных материалов с использованием бесконтактной УЗ стимуляции и лазерного вибросканирования.

Исследованы акустические явления, возникающие в области структурных неоднородностей полимеров и композитов, а также тонких, хрупких и гидрофильных материалов. Показано, что изменение угла наклона излучателя к исследуемой поверхности влияет на уровень вводимой акустической мощности. В частности, при непрерывной ультразвуковой стимуляции материалов происходит интерференция падающей и отраженной волн, что приводит к искажениям амплитуды результирующего сигнала. Это также объясняется наличием высших гармоник излучателя и нелинейных явлений, приводящих к расширению спектрального состава сигнала возбуждения. В связи с этим для повышения эффективности бесконтактного ввода ультразвука и неразрушающего контроля в целом необходима фазовая синхронизация падающей и отраженной волн. Сравнительный анализ результатов лазерной виброметрии при бесконтактной ультразвуковой стимуляции и ультразвуковом С-сканировании подтвердил эффективность бесконтактной стимуляции на расстояниях не более 80 мм до исследуемого материала в задачах неразрушающего контроля.

Глава 4. Разработка и исследование газоразрядного излучателя акустических колебаний для неразрушающего контроля методом лазерной виброметрии

Исследования в области разработки ультразвуковых излучателей с воздушной связью являются сложившейся тенденцией в многочисленных приложениях неразрушающего контроля (НК), в частности, при контроле материалов, таких как композиты, чувствительных к иммерсионному контакту с водой и другими жидкостями [7, 186]. Появление в начале 1980-х годов ультразвуковых излучателей с воздушной связью привело к созданию новых способов НК [224, 225]. В настоящее время соответствующие методики представляют собой определенную альтернативу традиционному ультразвуковому НК [226, 227]. Важным преимуществом устройств с воздушной связью является отсутствие иммерсионного слоя: твердого, жидкого или гелеобразного [228]. В связи с этим, актуальным в современных исследованиях считается разработка новых и совершенствование существующих воздушно-связанных ультразвуковых излучателей, а также исследование особенностей их работы, включая применение в неразрушающем контроле полимерных композитов.

В области разработки бесконтактных УЗ преобразователей для НК недавно было предложено возбуждать ультразвуковые волны с помощью импульсного электрического разряда, который вызывает быстрые изменения давления в окружающей среде [229]. Стремительный рост температуры, сопровождающийся расширением области плазмы газового разряда, вызывает волну сжатия (в ряде случаев подобную ударной), распространяющуюся в окружающем пространстве. Совокупность этих физических явлений условно можно назвать электро-термо-акустическим эффектом [55]. В газоразрядном промежутке ударная волна взаимодействует с электродами и стенками газоразрядной камеры, вызывая отклонение их от равновесного положения. Далее процесс релаксации в системе сопровождается формированием упругих волн в широком диапазоне частот. Энергия колебаний частично преобразуется в акустические волны,

распространяющиеся в окружающей среде [230]. Описанный механизм изучен недостаточно, поэтому исследование работы газоразрядных электроакустических преобразователей, а также изучение акустических систем с воздушной связью представляет собой актуальную тему для исследований.

Начиная с 1984 года, появились работы по исследованию возбуждения акустических колебаний открытыми плазменно-искровыми источниками. В частности, в работе [230] показано, что при протекании тока искрового разряда в окружающей воздушной среде формируется быстропеременный скачок давления. Это приводит к образованию продольных, поперечных и поверхностных волн. Указанный искровой разрядник является широкополосным источником ультразвука и в перспективе может использоваться как точечный акустический осциллятор. Более того, авторы вышеуказанной работы отметили возможность создания более дешевого излучателя по сравнению с импульсными лазерными системами. В то же время были отмечены некоторые недостатки предложенной конструкции, а именно повреждение поверхности электродов и объектов исследования искрой, технические сложности проектирования батареи высоковольтных конденсаторов и генератора, возбуждающего искровой разряд, а также необходимость обеспечения безопасной эксплуатации регистрирующих ультразвуковых детекторов.

Исследования искрового разряда между электродами, погруженными в жидкость [231], показали, что акустическая мощность нелинейно зависит от напряжения, прикладываемого к катоду и аноду: КПД установки быстро выходит на максимум при импульсах низких энергий и при небольших расстояниях между электродами, а при увеличении энергии в импульсе или величины межэлектродного зазора КПД падает. Аналогичный результат получен при исследовании установки-имитатора молнии в лабораторных условиях [232]. В работах [233, 234] в результате исследования особенностей генерации акустических волн искровым разрядом также был выявлен ряд недостатков функционирования акустических систем, таких как отсутствие направленности излучения, воздействие факторов окружающей среды (температуры и влажности

воздуха) на ионизацию газа в межэлектродном пространстве, и, как следствие, влияние на амплитуду генерируемых колебаний и фазового джиттера.

Вышеперечисленные недостатки и особенности работы искровых разрядников применительно к генерации акустических колебаний приводят к целесообразности создания как специализированной газоразрядной камеры, в которой осуществляется импульсный разряд, так и подходящей системы возбуждения импульсного разряда. В рамках настоящего исследования разработан и исследован бесконтактный газоразрядный излучатель на основе импульсного разряда атмосферного давления, позволяющий возбуждать мощный и широкополосный акустический сигнал. Кроме того, в работе рассмотрен ряд вопросов, связанных со спецификой функционирования излучателя (физические явления, возникающие при протекании тока разряда, излучение электромагнитных помех и т.п.).

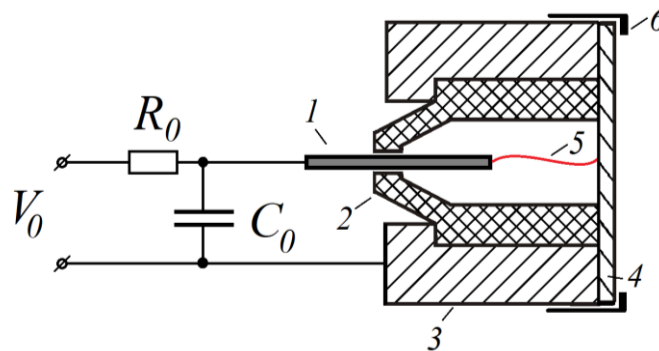
На первом этапе исследований было показано, что за счет выбора конструкции устройства можно влиять на фронт и диаграмму направленности акустического излучения, в то время как выбор материала и толщины мембраны позволяет регулировать диапазон рабочих частот излучателя.

Последующие исследования были направлены на анализ особенностей функционирования устройства, изучение электрофизических параметров разряда, проведение ресурсных испытаний излучателя с воздушной связью, а также анализ его вибрационных характеристик с использованием метода сканирующей лазерной доплеровской виброметрии (Scanning laser Doppler vibrometry – SLDV). Важно отметить, что оборудование для лазерной виброметрии использовано в качестве инструмента анализа колебаний твердых тел при их акустической стимуляции, что позволяет проводить неразрушающий контроль материалов и изделий. Кроме того, оценена направленность генерируемых излучателем акустических волн посредством визуализации их пространственного распределения методом рефрактовиброметрии, который был также реализован с использованием сканирующей лазерной виброметрии [233, 234].

4.1. Исследование воздушно-связанного газоразрядного излучателя

4.1.1. Конструкция излучателя

В общем случае разработанный газоразрядный излучатель представляет собой электродную систему, позволяющую осуществлять вывод акустических колебаний, формирующихся при протекании импульса тока разряда, в окружающую среду. Схематичное изображение прототипа разработанного газоразрядного излучателя приведено на рисунке 4.1.



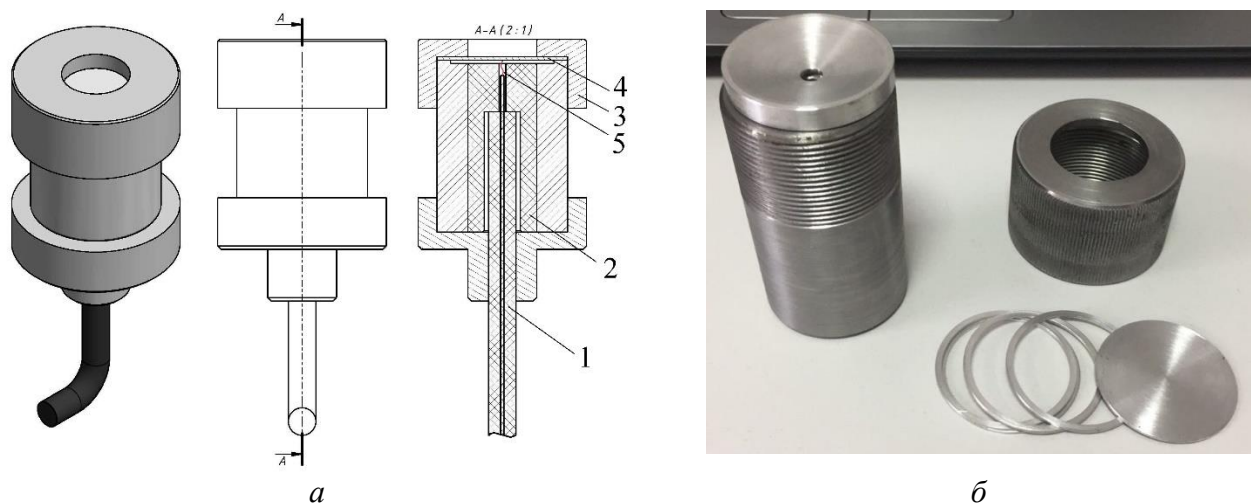
V_0 – напряжение источника заряда емкостного накопителя, R_0 – токоограничивающий резистор, C_0 – емкостной накопитель, 1 – потенциальный электрод, 2 – изолятор, 3 – корпус излучателя (обратный токопровод), 4 – диафрагма, 5 – схематичное положение разрядного канала, 6 – прижимной фланец

Рисунок 4.1 – Схематичное изображение конструкции прототипа газоразрядного излучателя

Принцип работы системы для генерации акустических колебаний на основе газоразрядного излучателя заключается в следующем. При включении источника тока заряда накопитель C_0 заряжается через токоограничительный резистор R_0 . Межэлектродный зазор выбирается таким образом, чтобы пробой в промежутке происходил при напряжении, меньшем, чем максимальное выходное напряжение источника заряда емкостного накопителя V_0 . При достижении некоторого порогового напряжения $V_{бр}$ в электродной системе газоразрядного излучателя происходит пробой, и емкостной накопитель разряжается через плазму образовавшегося искрового разряда (на рисунке 4.1 положение разрядного канала

схематично показано как позиция 5). При этом формируются импульс тока разряда и сопутствующий ему скачок давления в среде, окружающей разрядный канал. В данной конфигурации электродной системы диафрагма 4 представляет собой дисковый электрод, который является частью обратного токопровода и может совершать механические колебания под действием скачка давления от импульсного разряда. Часть энергии механических колебаний диафрагмы 4 излучается в виде акустических волн в окружающую среду. По мере разряда накопителя C_0 наступает момент, когда электрическое поле в газоразрядном промежутке становится недостаточным для самоподдержания плазмы. Это приводит к рекомбинации плазмы разряда, деградации разрядного канала и обрыву тока через газоразрядный промежуток. Далее по мере подачи следующего импульса тока от генератора вышеописанные процессы повторяются снова. Для заряда емкости использовали источник высокого напряжения ($V_0 < 10$ кВ) с ограничением тока за счет наличия балластного сопротивления.

Сборочный чертеж и фотография прототипа газоразрядного излучателя аксиального типа приведены на рисунке 4.2.



a – сборочный чертеж, *б* – фотография

Рисунок 4.2 – Сборочный чертеж и фотография конструкции газоразрядного излучателя аксиального типа

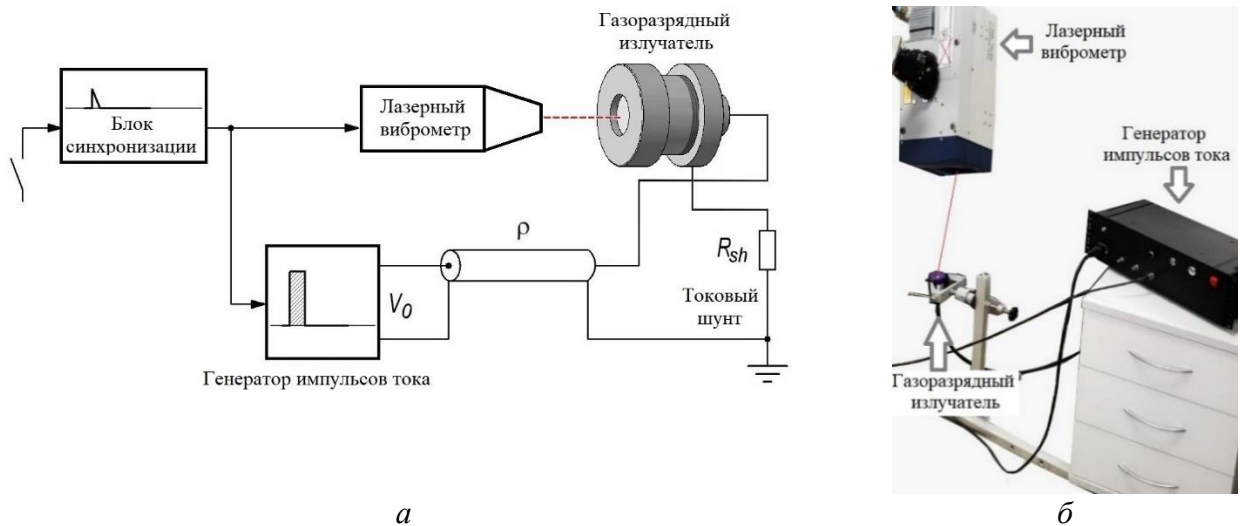
Разработанный опытный образец газоразрядного излучателя акустических колебаний имеет индуктивность разрядного контура менее 0,25 мкГн. Ввод

электрической энергии осуществляется через гибкий коаксиальный кабель. Конструкция излучателя позволяет осуществлять регулировку газоразрядного зазора в диапазоне от 1 до 15 мм, а также обеспечивает смену излучающих мембран с различной толщиной и диаметром до 38 мм.

Конфигурация электродной системы (рисунок 4.1) предполагает, что дисковый электрод (далее по тексту мембрана) является частью обратного токопровода. Под действием скачка давления от импульсного разряда мембрана совершает механические колебания и провоцирует генерацию акустических волн в воздушной среде, выполняя функции излучающей поверхности излучателя. Когда звук сталкивается с границей между двумя материалами с разным акустическим импедансом, часть звуковой энергии отражается, а часть передается через границу. Потеря энергии при передаче сигнала определяется величиной различия акустического импеданса двух взаимодействующих сред. В связи с низким акустическим импедансом воздуха ($4,17 \times 10^6$ кг/м²с при атмосферном давлении 1,225 кг/м³ и 15 °С) для обеспечения наименьших потерь акустической энергии при изготовлении мембраны газоразрядного излучателя было необходимо подобрать материал, обладающий одновременно низким электрическим и акустическим импедансом. Для этих целей выполнен сравнительный анализ, после чего выбран алюминиевый сплав, имеющий значение акустического импеданса $17,06 \times 10^6$ кг/м²с.

4.1.2. Измерение амплитудно-частотного спектра излучателя и оценка повторяемости амплитуды колебательного смещения диафрагмы

С целью определения характеристик газоразрядного излучателя была использована экспериментальная установка на основе сканирующей лазерной доплеровской виброметрии (СЛДВ), функциональная схема которой представлена на рисунке 4.3.



a – функциональная схема установки, *б* – фотография установки

Рисунок 4.3 – Функциональная схема и фотография установки для исследования вибрационных характеристик газоразрядного излучателя

Установка включает генератор импульсов тока, линию связи и газоразрядную систему с возможностью вывода колебаний в окружающую среду, а также сканирующий лазерный виброметр PSV-500-3D-HV (Polytec, Германия) и цифровой осциллограф OWON DS5032EV. В настоящем исследовании разряд возбуждали от генератора импульсов тока с частотой следования импульсов 4 Гц.

Опытный образец генератора импульсов тока для получения искрового разряда в воздухе при атмосферном давлении отвечает следующим характеристикам: при амплитуде выходного напряжения 15 кВ предельная амплитуда импульса тока генератора оценена на уровне 650 А. При использовании накопителя емкостью 2,35 нФ и пробивном напряжении 15 кВ запас энергии в накопителе составляет 0,25 Дж. Устройство обеспечивает регулировку частоты следования импульсов тока разряда в диапазоне от 1 до 4 Гц, а выбранные схемотехнические решения позволяют реализовать как синхронизацию генератора импульсов тока с лазерным виброметром, так и ждущий режим работы устройства.

Как было отмечено выше, принцип работы газоразрядного излучателя заключается в формировании импульса электрического тока в электродной системе излучателя в процессе разряда емкостного накопителя через плазму искрового разряда. В условиях настоящего исследования пробивное напряжение составляло около 12 кВ, ток через газоразрядный промежуток – не более 1 кА, что

соответствует приблизительно 10 кВт импульсной электрической мощности (пиковое значение). Формирование импульса электрического тока происходит в течение сотен наносекунд и сопровождается скачком давления в среде, окружающей разрядный канал. Это приводит к колебаниям элементов конструкции излучателя и генерации акустических волн в воздушной среде.

Возникновение колебаний элементов газоразрядного излучателя в процессе протекания искрового разряда было исследовано путем анализа вибраций мембраны электроискрового излучателя. С помощью лазерного виброметра был зарегистрирован временной ход виброперемещения центра мембраны при протекании импульса тока разряда (рисунок 4.4), а также затухающие колебания мембраны после прекращения подачи возбуждающего сигнала.

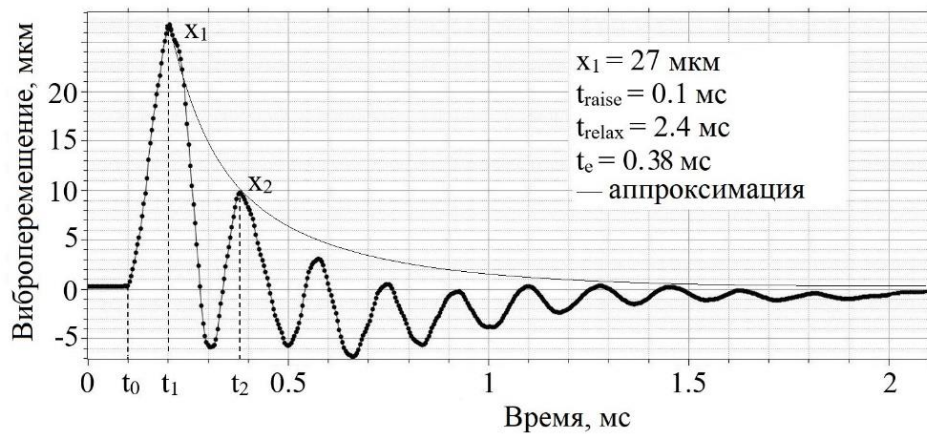


Рисунок 4.4 – Колебания мембраны газоразрядного излучателя, выведенной из состояния покоя импульсом искрового разряда

Рассмотрим колебания мембраны газоразрядного излучателя, выведенной из состояния покоя импульсом искрового разряда (рисунок 4.4). Из графика видно, что амплитуда первого максимума колебаний мембраны (x_1, t_1) достигает величины 27 мкм за 0,1 мс ($t_{\text{raise}} = t_1 - t_0$) после начала импульса искрового разряда ($t_0 = 0,1$ мс). В момент времени 0,38 мс наблюдается второй максимум (x_2, t_2) затухающих колебаний амплитудой 9,9 мкм, причем данный пик также соответствует времени затухания сигнала ($t_e = t_2 - t_1$), равного 0,18 мс, когда амплитуда сигнала уменьшается в e раз относительно максимального значения. Характерное время релаксации колебаний (t_{relax} — время релаксации) составляет 2,1 мс, в связи с чем

в условиях эксперимента предельная частота работы газоразрядного излучателя в импульсном режиме достигает приблизительно 500 Гц. На практике такой режим недостижим ввиду плазмохимических процессов и тепловой нагрузки на электроды и изоляторы. Из полученных данных следует, что затухание в рассматриваемой колебательной системе относительно мало, однако это может быть скорректировано путем изменения демпфирующих характеристик конструкции в соответствии с требованиями конкретного практического приложения.

Выявлено, что при величине межэлектродного зазора около 5 мм амплитуда виброперемещения алюминиевой мембраны толщиной 1 мм достигает 27 мкм. Указанная величина амплитуды виброперемещения сопоставима с используемыми источниками возбуждения на основе пьезоэлектрического преобразователя или мощного магнитостриктора [9, 70].

Повторяемость амплитуды виброперемещения при протекании электроискрового разряда была оценена в результате проведения 100 измерений при минимальной величине межэлектродного зазора, равной 5 мм. Измерения были проведены в непрерывном режиме работы устройства при частоте следования импульсов 2,5 Гц. Повторяемость амплитуды виброперемещения на мембране газоразрядного излучателя показана на рисунке 4.5.

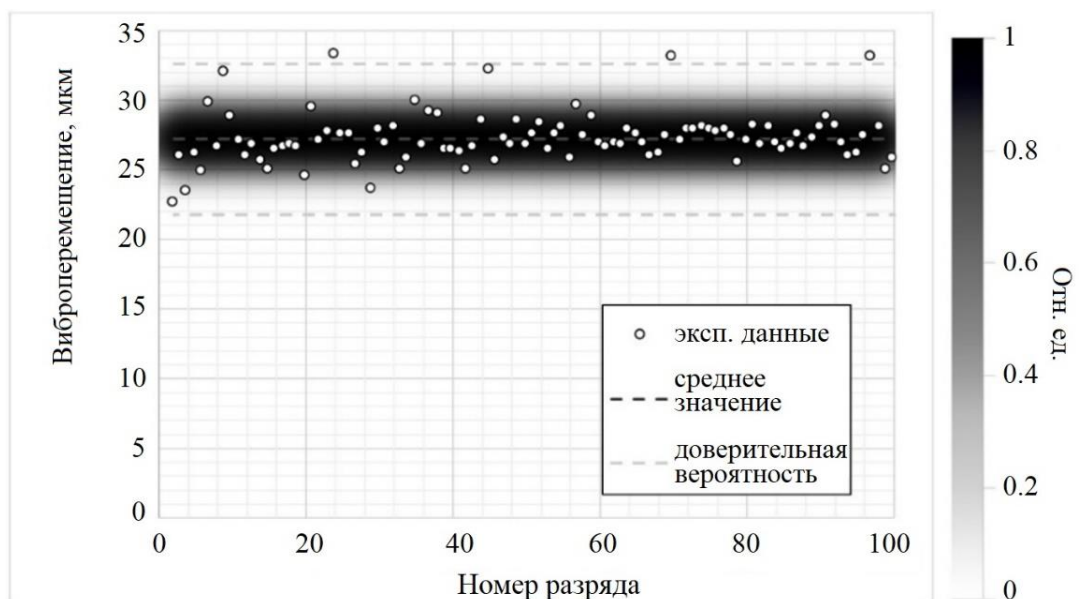


Рисунок 4.5 – Оценка повторяемости результатов измерения амплитуды виброперемещения на мембране газоразрядного излучателя

В результате анализа данных установлено, что амплитуда виброперемещения на торцевой части излучателя варьирует в диапазоне от 23 до 33 мкм, усредненное значение виброперемещения составляет 27 мкм. Минимальное значение соответствует первому измерению, что, вероятно, связано с особенностями выхода устройства на стационарный режим работы. Градиентом серого цвета на рисунке 4.5 представлена доверительная вероятность распределения экспериментальных данных. Границы доверительного интервала относительно среднего значения представлены в виде пунктирных линий. Из графика видно, что из 100 проведенных экспериментов в границы доверительного интервала не попадают лишь 3 измерения, что удовлетворяет доверительной вероятности 95 %. При этом амплитуда указанных трех «выбросов» превышает 33 мкм, а еще в двух измерениях амплитуда достигает 32 мкм, которые не выходят за границы доверительного интервала. Указанные пять импульсов встречаются с периодичностью примерно раз в 20 измерений и интересны с практической точки зрения, поскольку они соответствуют наиболее эффективному режиму излучения при данных условиях.

После исследования повторяемости вибрационного сигнала на мембране газоразрядного излучателя было проведено преобразование вибросигнала из временной области в фазо-частотную. Полученный амплитудно-частотный спектр (спектральное разрешение 30 Гц, количество спектральных линий 3400) колебаний мембраны газоразрядного излучателя в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц приведен на рисунке 4.6.

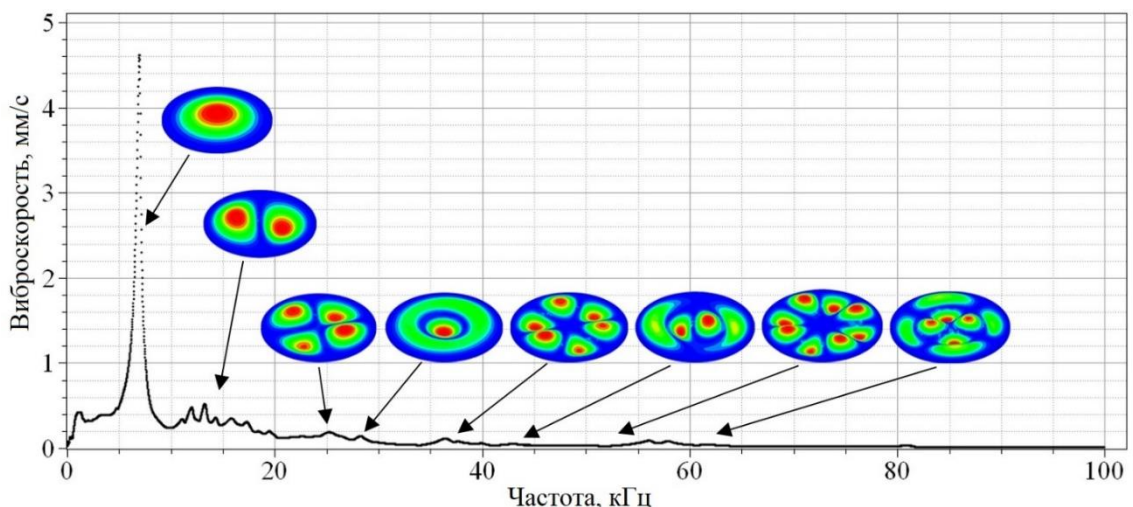


















Рисунок 4.6 – Амплитудно-частотный спектр колебаний мембраны газоразрядного излучателя в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц

Аналитическое моделирование может также объяснить происхождение некоторых резонансов в спектре. Для визуализации собственных мод колебаний мембраны излучателя в исследуемом диапазоне частот, а также их сопоставления с экспериментальными результатами, в программном обеспечении Autodesk Inventor проведено моделирование модальных характеристик алюминиевой мембраны методом конечных элементов. 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 колебаний мембраны в диапазоне частот от 0 до 100 кГц. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными измерениями резонансных частот газоразрядного излучателя (f_{max}), определенных в диапазоне частот от 10 Гц до 100 кГц (таблица 4.1), а также использованы для уточнения происхождения резонансных пиков на амплитудно-частотном спектре газоразрядного излучателя. На рисунке 4.6 и в таблице 4.1 показаны результаты моделирования вибраций алюминиевой мембраны с зажатými краями. Соответствующие оценки представлены в таблице 4.1 наряду с расчетом относительной погрешности $\varepsilon = (f_m - f_r)/f_r$, где f_m и f_r – резонансные частоты мембран, рассчитанные по результатам моделирования, и истинные значения, полученные с использованием лазерной виброметрии.

Таблица 4.1 – Результаты моделирования и экспериментального анализа спектральных характеристик газоразрядного излучателя

Измеряемая величина	Частотный диапазон, кГц							
	5,2–8,7	15–16,2	24,4–26	28–28,6	35,8–37	42,5–43,4	49,2–50,2	57–58,9
v_{max} , мм/с	4,6	0,35	0,19	0,144	0,106	0,051	0,033	0,08
f_r , Гц	6953	15844	25391	28297	36531	42969	49547	57938
f_m , Гц	7183	15046	24948	28087	36740	43269	50178	60510
ε , %	3,3	5	1,6	0,7	< 1	< 1	< 1	4
RMS , мм/с	19	1,78	1,2	0,62	0,62	0,27	0,18	0,5
Резонансные моды (эксп.)								
Резонансные моды (модел.)								

Из полученных данных следует, что относительная погрешность не превосходит 5 %, что подтверждает высокую степень сходимости результатов моделирования с экспериментальными данными.

Для каждого выбранного диапазона частот с помощью лазерного виброметра определены максимальные значения скорости вибраций (v_{max}), а также его среднеквадратичное значение (RMS). Полученные экспериментальные данные позволили оценить изменение излучающей способности газоразрядного излучателя на различных частотах.

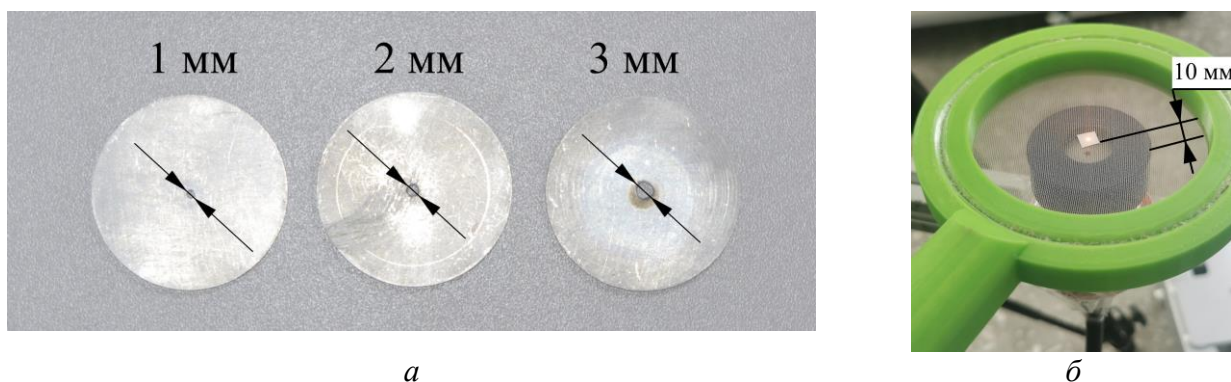
Как видно из полученных данных (рисунок 4.6, таблица 4.1), по мере увеличения частоты наблюдается снижение амплитудного значения скорости вибраций на излучающей поверхности устройства, а также снижение среднеквадратичного значения виброскорости. В рассматриваемом диапазоне частот максимальное значение амплитуды скорости вибраций на излучающей поверхности достигает 4,62 мм/с на частоте 6,69 кГц, минимальное – 0,006 мм/с на частоте 84 кГц, а среднее значение амплитуды вибраций составляет 0,132 мм/с. Таким образом, при анализе амплитудно-частотного спектра показано, что основная энергия колебаний излучающей поверхности сосредоточена в области частот до 10 кГц, однако присутствуют высокочастотные гармоники и составляющие акустического сигнала с частотой выше 80 кГц. Присутствует пик на частоте 6,69 кГц, характерный для собственного резонанса излучающей поверхности (диафрагмы излучателя).

Важно отметить, что резонансные частоты колебаний диафрагмы, определенные в результате лазерного сканирования, отличаются от результатов моделирования не более, чем на 5 %. Пространственное распределение интенсивности колебаний мембраны, измеренное виброметром, коррелирует с результатами модального анализа, однако имеются искажения, связанные с нестационарными процессами в плазме, а также вероятностью неравномерного распределения силы зажима ее кромки. Важно также заметить, что частота резонанса элементов электродной системы электроискрового излучателя существенно влияет на диапазон его рабочих частот, что подтверждается анализом амплитудно-частотного спектра излучателя. Из этого следует, что использование электродов различных размеров, конфигурации и металлического состава позволит

реализовать требуемую частоту резонансных колебаний электрода, определяя тем самым спектр акустического излучения газоразрядной системы.

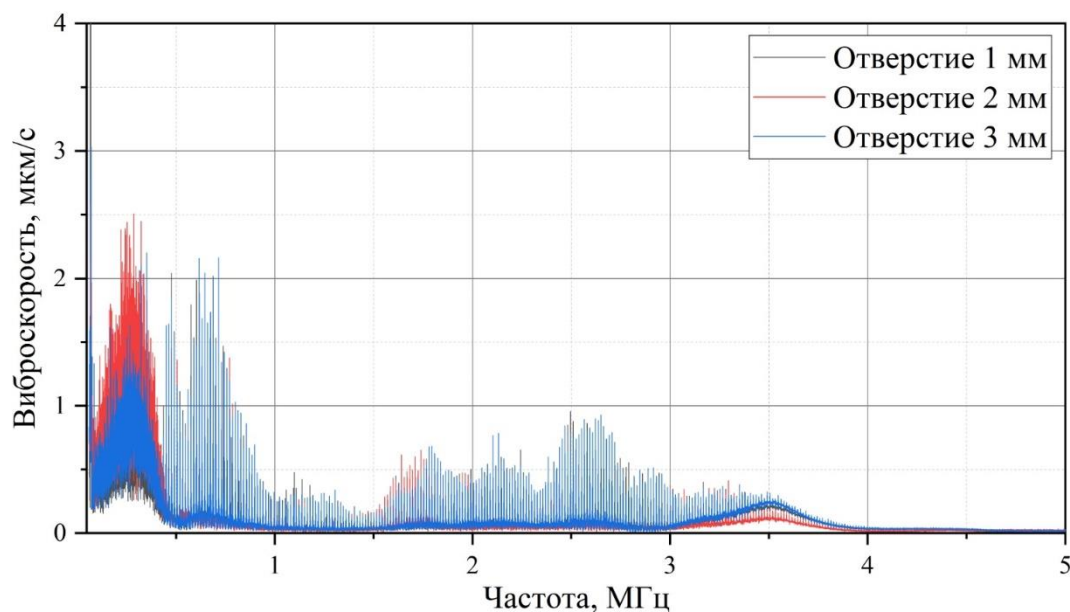
Открытая конфигурация газоразрядного излучателя отличается от закрытого типа негерметичным исполнением разрядной камеры в результате использования мембран с сквозными отверстиями. Указанная конфигурация электродной системы позволяет повысить акустическую мощность излучения устройства за счет беспрепятственного выноса разряда из разрядной камеры во внешнюю среду. Ниже приведены результаты измерения амплитудно-частотного спектра излучателя открытого типа при использовании набора мембран со сквозными отверстиями диаметром от 1 до 3 мм в центре, как показано на рисунке 4.7, *а*. Регистрация спектров проводилась на отражающем элементе, расположенном на тонком сетчатом нейлоне на расстоянии 10 мм от излучателя (рисунок 4.7, *б*).

Из амплитудно-частотных спектров на рисунке 4.7, *в* 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. При этом увеличение диаметра отверстия в центре мембраны приводит к увеличению амплитуды зарегистрированного вибрационного сигнала.



а – фотография мембран открытого типа, *б* – фотография лабораторного стенда для измерения колебаний в центре сетчатого нейлона на расстоянии 10 мм от излучателя

Рисунок 4.7, *а*, *б* – Измерение амплитудно-частотных спектров колебаний газоразрядного излучателя открытого типа в диапазоне частот от 100 кГц до 4 МГц на расстоянии 10 мм от излучателя при использовании мембран открытого типа с отверстиями различного диаметра



в

в – амплитудно-частотные спектры колебаний, измеренный в центре сетчатого нейлона

Рисунок 4.7, *в* – Измерение амплитудно-частотных спектров колебаний газоразрядного излучателя открытого типа в диапазоне частот от 100 кГц до 4 МГц на расстоянии 10 мм от излучателя при использовании мембран открытого типа с отверстиями различного диаметра

Резюмируя вышеизложенное, следует заметить, что к преимуществам излучателя закрытого типа следует отнести возможность герметичного исполнения конструкции и электрическое экранирование устройства по сравнению с излучателем открытого типа. Последний в свою очередь характеризуется большей амплитудой вибрационного сигнала в рассматриваемом диапазоне частот. Однако газоразрядный излучатель открытого типа является электрически небезопасным за счет выноса разряда, образует электромагнитные поля и помехи в области излучения, а также требует обеспечения электромагнитной совместимости с объектом контроля. Указанные особенности могут быть минимизированы путем экранирования оборудования, линии электроснабжения, а также при близком размещении излучателя к объекту контроля. Указанные решения позволят обеспечить эффективную передачу акустического сигнала при минимальном выносе электромагнитного излучения и помех во внешнюю среду. Эти и другие вопросы являются важными в области дальнейшего развития

технологии использования импульсных электрических разрядов для генерации акустических волн в воздушной среде.

4.1.3. Определение влияния состава мембраны на диапазон рабочих частот газоразрядного излучателя

В работах [235–238] показано, что изменение основной резонансной частоты акустических преобразователей зависит от многих факторов. В частности, даже незначительные изменения геометрии преобразователя, например, касающиеся толщины или диаметра мембраны, могут вызвать существенные различия в его резонансной частоте [239]. В ходе настоящего исследования оценено влияние металлического состава мембраны на диапазон рабочих частот излучателя. Это позволило получить информацию об особенностях работы системы и оптимизировать конструкцию газоразрядного излучателя.

В частности, проведен анализ амплитудно-частотного спектра излучателя в сборке с мембранами, изготовленными из различных металлов: латунь, титан, алюминий, сталь. Фотография мембран для газоразрядного излучателя, изготовленных из различных металлов, представлена на рисунке 4.8.

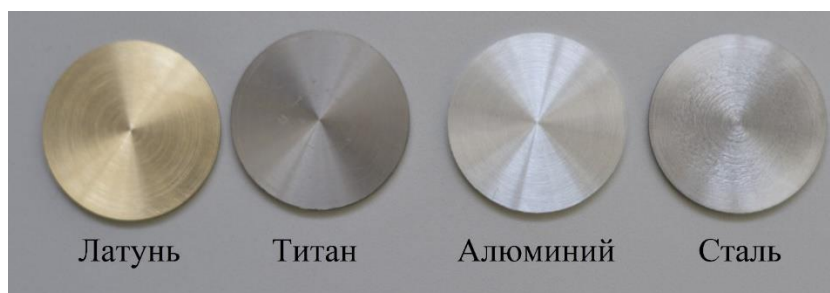


Рисунок 4.8 – Изображение мембран газоразрядного излучателя

Мембраны из латуни (марка ЛС59), титана (марка ВТ6-1) и алюминия (марка Д16Т) размерами 38×2 мм, 38×2,3 мм, 38×2,6 мм были изготовлены по 5 шт. каждого размера. Мембраны из стали (марка Ст3) диаметром 38 мм, толщиной 1 мм, 1,5 мм, 2 мм, 2,3 мм, 2,6 мм были изготовлены по 5 шт. каждого размера. Физические свойства исследуемых металлов приведены в таблице 4.2 [240].

Таблица 4.2 – Физические свойства исследуемых металлов

Физические свойства	Металл			
	Алюминий	Титан	Сталь	Латунь
E , ГПа	70	112	190–210	95
ρ , кг/м ³	2700	4500	7700–7900	8500

Частоту вынужденных колебаний диафрагмы газоразрядного излучателя, выведенной из состояния покоя импульсом искрового разряда, можно оценить в соответствии с выражениями, приведенными в [187]. Потенциальная энергия колебаний тонкой изотропной мембраны радиуса R , толщиной h и площадью S с зажатými краями определяется как:

$$E_p = \pi D \int_0^R \left(\frac{\partial^2 U(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial U(r)}{\partial r} \right)^2 r dr, \quad (4.1)$$

где $U(r)$ – радиальное распределение прогиба мембраны,

D – изгибная жесткость мембраны, определяемая как:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (4.2)$$

где E – модуль Юнга (модуль упругости),

ν – коэффициент Пуассона,

h – толщина мембраны.

Кинетическая энергия колебаний равна:

$$E_c = \pi \rho h \frac{\omega_0^2}{4\pi^2} \int_0^R U(r)^2 r dr. \quad (4.3)$$

В этом случае полная механическая энергия колебаний мембраны будет складываться из суммы кинетической и потенциальной энергии:

$$E = E_c + E_p = \text{const.}$$

Основная частота колебаний мембраны будет иметь вид:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1.6h}{R^2} \sqrt{\frac{E}{12(1-\nu^2)\rho}} \quad (4.4)$$

Из вышеизложенного следует, что основная частота колебаний мембраны будет определяться геометрическими размерами, а также свойствами материала, из которого она изготовлена.

В рамках настоящей работы для экспериментального исследования вибрационных характеристик и диапазона рабочих частот газоразрядного излучателя использована лабораторная установка на основе лазерного виброметра, изображенная на рисунке 4.3. Разряд возбуждали от генератора импульсов тока при выходном напряжении $V_0 < 12$ кВ, что соответствует току короткого замыкания до 1 кА. При проведении лазерной виброметрии регистрировали сигналы виброскорости и виброперемещения в центре мембраны газоразрядного излучателя, как показано на рисунке 4.3, б. Лазерное вибросканирование проводилось в режиме быстрого преобразования Фурье с регистрацией сигнала в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц с разрешением 7,8125 Гц (количество спектральных линий 12800). Частота следования импульсов разряда была одинаковой для всех измерений и составляла 1 Гц. Было проведено по 5 измерений в центре каждой мембраны различного размера и металлического состава (суммарно 300 измерений).

В таблице 4.3 приведены усредненные значения виброскорости (v) и виброперемещения (Δx), измеренные в центре мембран различного состава (алюминий, латунь, сталь, титан) толщиной ($2 \div 2,6$ мм). Частота следования импульсов – 4 Гц.

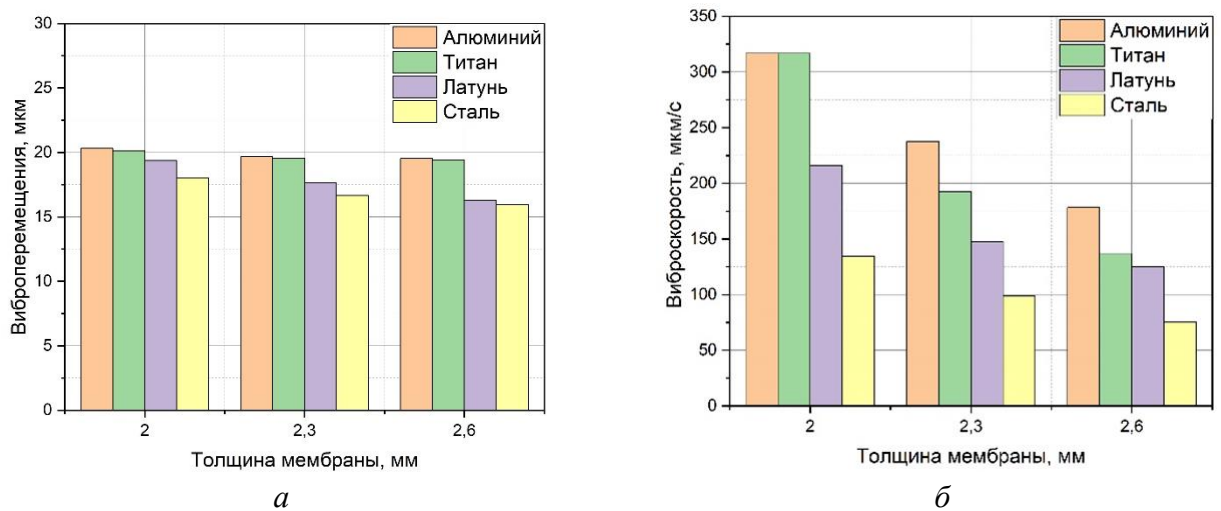
Таблица 4.3 – Амплитуды виброперемещения Δx и виброскорости v в центре мембран различной толщины, изготовленных из разных металлов

Измеряемая величина	Толщина мембраны, мм	Материал			
		Алюминий	Латунь	Сталь	Титан
Δx , мкм	2,0	$20,32 \pm 0,50$	$19,37 \pm 0,47$	$18,02 \pm 0,23$	$20,12 \pm 0,33$
	2,3	$19,66 \pm 0,19$	$17,65 \pm 0,43$	$16,66 \pm 0,42$	$19,55 \pm 0,43$
	2,6	$19,55 \pm 0,43$	$16,26 \pm 0,25$	$15,97 \pm 0,37$	$19,42 \pm 0,20$
v , мкм/с	2,0	$316,62 \pm 17,37$	$215,68 \pm 4,07$	$134,36 \pm 5,21$	$316,62 \pm 17,37$
	2,3	$237,36 \pm 14,62$	$147,86 \pm 7,85$	$98,44 \pm 3,12$	$192,36 \pm 14,02$
	2,6	$178,13 \pm 14,17$	$124,94 \pm 8,23$	$75,48 \pm 4,99$	$136,72 \pm 8,12$

В соответствии с данными, приведенными в таблице 4.3, погрешность измерения виброперемещения не превышает 2,7 %, виброскорости – 8 %, что

свидетельствует о высокой повторяемости результатов измерений для пластин из одинакового материала с одинаковыми геометрическими размерами.

На рисунке 4.9 приведены гистограммы зависимости амплитуды виброперемещения и виброскорости в центре мембран различного металлического состава от их толщины.



а – амплитуды виброперемещения, *б* – амплитуды виброскорости

Рисунок 4.9 – Зависимость амплитуды виброперемещения и виброскорости в центре мембраны различного состава (алюминия, титана, латуни, стали) от их толщины

Из гистограммы, приведенной на рисунке 4.9, *а*, видно, что амплитуды виброперемещения, измеренные в центре мембран, незначительно уменьшаются по мере увеличения толщины мембраны, однако отличаются для изделий различного металлического состава при одинаковом значении импульсной электрической мощности генератора. В частности, максимальное экспериментальное значение амплитуды виброперемещения в центре дискового электрода излучателя около 20 мкм соответствует мембранам из алюминия и титана. Различия можно объяснить меньшей плотностью указанных металлов по сравнению с плотностью стали и латуни, что оказывает влияние как на амплитуду, так и на основную частоту колебаний мембран. Из гистограммы, приведенной на рисунке 4.9, *б*, видно, что при одинаковом значении импульсной электрической мощности генератора, виброскорости, измеренные в центре

мембран, значительно отличаются как для различных металлов, так и по мере изменения толщины мембраны. Более подробно понять полученные в эксперименте закономерности можно с привлечением дополнительных данных, полученных при исследовании амплитудно-частотного спектра излучателя.

На рисунке 4.10 представлен амплитудно-частотный спектр вибраций в диапазоне частот от 50 Гц до 30 кГц, измеренный в центре мембран толщиной 2 мм, изготовленных из алюминия, титана, латуни и стали.

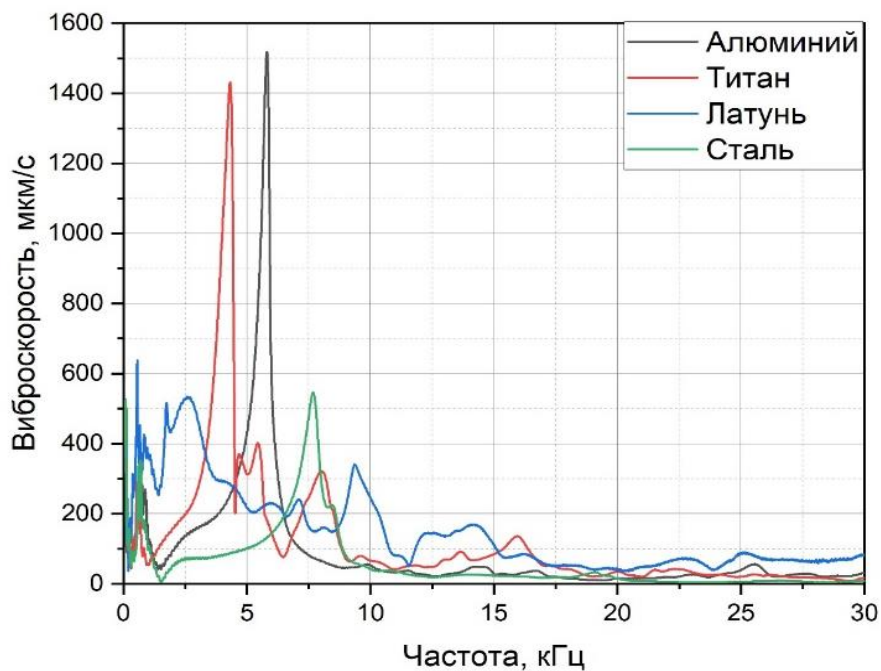


Рисунок 4.10 – Амплитудно-частотный спектр колебаний в центре мембран толщиной 2 мм различного металлического состава

Как показано на графике (рисунок 4.10), амплитудно-частотные спектры мембран различного состава отличаются. Несмотря на одинаковые геометрические размеры, резонансный максимум отличался для каждого отдельного типа мембран в исследуемом диапазоне частот. В частности, для мембран из алюминия резонансная частота была определена на частоте 5,81 кГц, для мембран из титана – 4,32 кГц, для мембран из стали – 7,68 кГц. При этом спектр латунной мембраны отличается менее выраженными резонансными пиками по сравнению с другими исследуемыми металлами и имеет сглаженную характеристику с максимумом на частоте 2,57 кГц. Мембраны из алюминия и титана отличаются явно

выраженными узкими полосами частот, причем амплитуды виброперемещения, измеренные в центре мембран (20,3 мкм – для алюминия, 20,1 мкм – для титана) также имеют большее значение по сравнению с двумя другими рассматриваемыми типами мембран (таблица 4.3). В спектре колебаний мембраны из стали также наблюдается характерный резонансный максимум, однако амплитуда скорости его колебаний меньше в 2,5 раза по отношению к амплитуде скорости колебаний мембран из алюминия и титана, что сопоставимо с соответствующими значениями для латунной мембраны. Указанные особенности колебаний мембран определяются различием физических свойств металлов, влияющих на диапазон рабочих частот, согласно выражению (4.4). Также следует отметить наличие высокочастотных резонансных пиков в спектре, неизбежно возникающих из-за активации высших резонансных гармоник мембраны и вибраций элементов конструкции газоразрядного излучателя.

Из полученных данных следует, что выбор геометрических размеров и металлического состава мембраны излучателя позволяет задать диапазон рабочих частот излучателя. Использование набора мембран различного металлического состава и геометрии в дальнейшем позволит получать необходимый диапазон рабочих частот излучателя в соответствии с требованиями практических задач.

4.1.4. Исследование влияния конфигурации электродной системы на изменение амплитуды колебательного смещения диафрагмы излучателя

В рамках настоящего исследования определено влияние величины объема межэлектродного промежутка газоразрядного излучателя на амплитуду виброперемещения поверхности мембраны. При проведении лазерной виброметрии регистрировали сигналы виброскорости и виброперемещения в центре мембраны газоразрядного излучателя, как показано на рисунке 4.3, б. Лазерное вибросканирование проводилось в режиме «time» с регистрацией сигнала виброперемещения на поверхности мембраны во времени.

В эксперименте с изменением межэлектродного зазора использовалась мембрана из дюралюминия диаметром 38 мм и толщиной 1 мм. Регулировка объема межэлектродного промежутка осуществлялась за счет изменения положения потенциального электрода относительно мембраны. Минимальная величина межэлектродного зазора составляла 5 мм, диаметр канала – 2 мм. Объем полости газоразрядного промежутка при варьировании зазора изменяется приблизительно от 15 мм³ до 35 мм³. Частота следования импульсов разряда 2 Гц была одинаковой для всех измерений. С использованием лазерного виброметра зарегистрирован временной ход виброперемещения мембраны при протекании импульса тока разряда. На рисунке 4.11 приведен график зависимости амплитуды виброперемещения на поверхности алюминиевой мембраны от величины межэлектродного зазора газоразрядного излучателя.

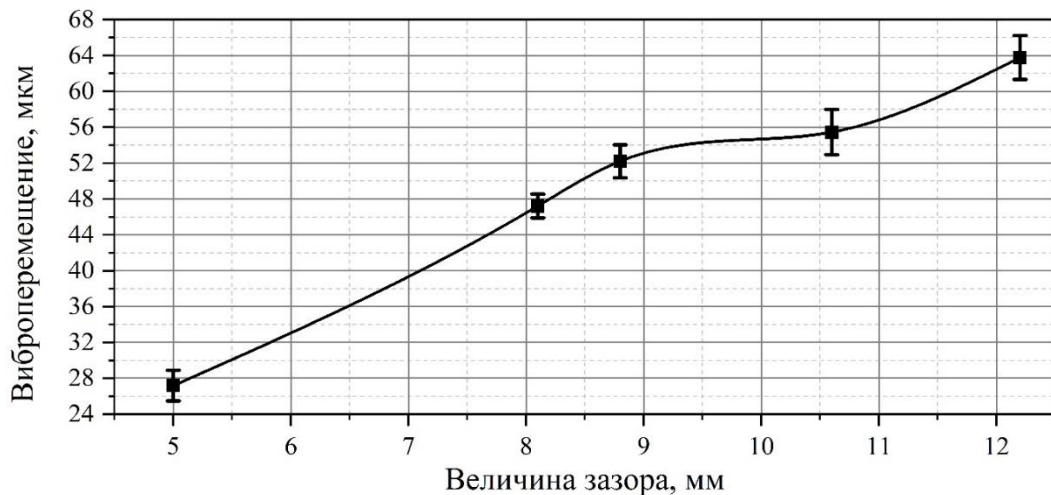


Рисунок 4.11 – Зависимость амплитуды виброперемещения центра алюминиевой мембраны от величины межэлектродного зазора газоразрядного излучателя.

Толщина мембраны 1 мм

При увеличении расстояния между электродами возрастает величина пробивного напряжения, а, следовательно, и энергия в импульсе. В то же время увеличивается объем канала разряда, который является активным, т. е. способствует генерации акустических волн. Однако на практике это не приводит к нелинейному уменьшению приращения амплитуды виброперемещения на мембране.

В частности, при увеличении зазора на 50 % (с 8 мм до 12 мм) амплитуда виброперемещения на мембране излучателя возрастает приблизительно на 40 %.

Резюмируя полученные результаты, следует отметить, что увеличение межэлектродного зазора газоразрядного излучателя приводит к увеличению амплитуды виброперемещения в центре мембраны. Амплитуда виброперемещения практически пропорциональна энергии, запасенной в емкостном накопителе на момент пробоя газоразрядного промежутка. 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, что позволяет охарактеризовать исследуемый излучатель как достаточно мощный импульсный источник акустических колебаний.

В рамках работы также было оценено влияние объема межэлектродного промежутка на амплитуду виброперемещения мембраны излучателя. Исследование проводилось с использованием мембраны из дюралюминия диаметром 38 мм и толщиной 1 мм. Регулировка объема межэлектродного промежутка осуществлялась путем установки под мембраной подвеса из дюралюминиевых колец (рисунок 4.2, б) толщиной 1 мм, имеющих размер внутреннего и внешнего диаметров 34 и 38 мм соответственно. Таким образом, введение одного кольца увеличивает объем промежутка на 925 мм^3 и длину зазора на 1 мм. Величина межэлектродного зазора изначально составила 5 мм, диаметр канала – 2 мм, минимальный объем полости газоразрядного промежутка – около 16 мм^3 . Частота следования импульсов разряда была одинаковой для всех измерений и составила 4 Гц. С использованием лазерного виброметра зарегистрирован временной ход виброперемещения мембраны при протекании импульса тока разряда. На рисунке 4.12 приведена зависимость амплитуды виброперемещения на поверхности алюминиевой мембраны от величины объема межэлектродного промежутка газоразрядного излучателя.

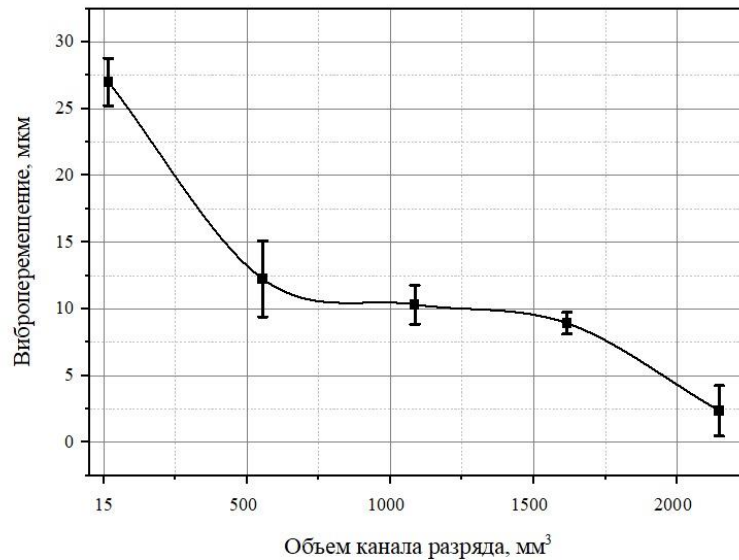


Рисунок 4.12 – Зависимость амплитуды виброперемещения центра алюминиевой мембраны от величины объема канала разряда. Толщина мембраны 1 мм.

Несмотря на то, что при увеличении зазора возрастает энергия, запасенная в накопителе, из графика на рисунке 4.12 следует, что увеличение объема канала разряда до 2500 мм³ за счет введения дополнительных колец приводит к уменьшению амплитуды виброперемещения в центре мембраны более чем в 10 раз. В частности, при минимальной величине межэлектродного зазора 5 мм (в рамках настоящего эксперимента) амплитуда виброперемещения в центре дюралюминиевой мембраны составила 26 мкм, в то время как при максимальном значении межэлектродного зазора 11,5 мм амплитуда виброперемещения составила 2,4 мкм. Из этого следует, что для эффективной передачи энергии из области плазмы разряда подходит электродная система с небольшим объемом в сравнении с объемом канала разряда. Кроме того, желательно сфокусировать ударную волну от разряда на поверхности мембраны.

4.1.5. Измерение диаграммы направленности излучателя

Излучаемые газоразрядным излучателем акустические волны распределяются в пространстве неравномерно. Для характеристики углового распределения энергии волны вводят понятие акустического поля, которое отражает зависимость амплитуды колебаний от расстояния до излучателя.

В частности, ближняя зона определяется как область, в которой наблюдается немонотонное изменение амплитуды колебаний, связанное с интерференцией волн от различных частей газоразрядного излучателя [241].

С целью определения ближней зоны газоразрядного излучателя с использованием лазерного виброметра была получена зависимость амплитуды колебаний в направлении главного луча акустической оси от расстояния до газоразрядного излучателя. Измерения проводились в воздушной среде с использованием лазерного виброметра (рисунок 4.13).

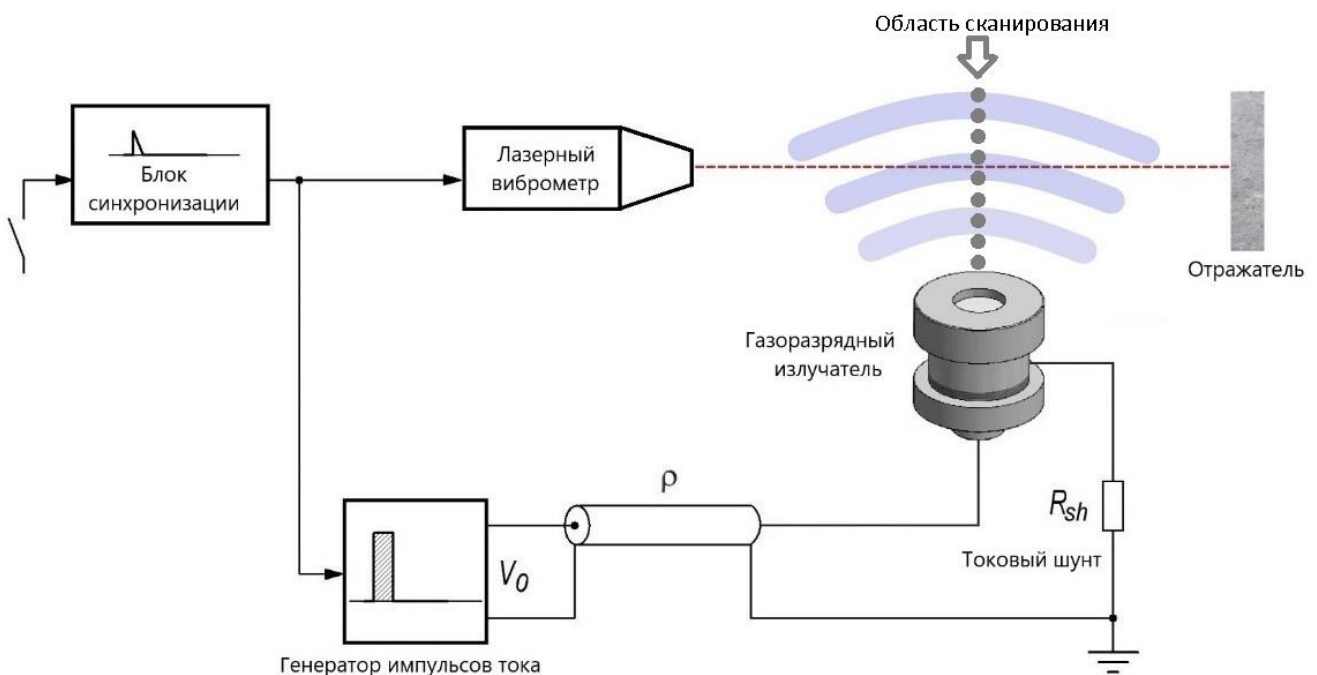


Рисунок 4.13 – Экспериментальная установка для оценки акустических полей в воздухе, создаваемых газоразрядным излучателем

Колебания давления, сопровождающие распространение акустических волн в окружающем воздухе, вызывают флуктуации показателя преломления и тем самым вариации длины оптического пути лазерного луча. Ввиду высокой чувствительности лазерный доплеровский виброметр способен оценивать и визуализировать искажения акустических полей в воздухе, возникающих при работе преобразователя.

Для анализа распространения колебаний в воздухе в направлении главного луча акустической оси проведено измерение виброскорости частиц среды на расстоянии

50÷500 мм от центральной части торца газоразрядного излучателя с шагом 1,5 мм, при частоте следования импульсов разряда 4 Гц, как показано на рисунке 4.13 (область сканирования).

Пример распределения амплитуды колебаний от расстояния до газоразрядного излучателя в воздушной среде на частоте 10,5 кГц приведен на рисунке 4.14.

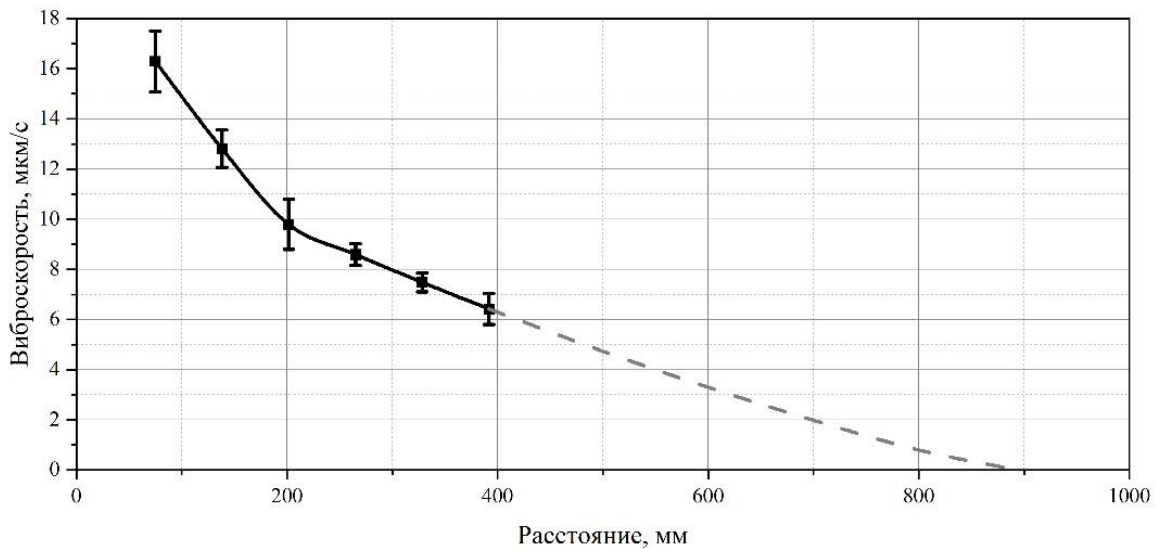


Рисунок 4.14 – Зависимость амплитуды колебаний от расстояния до газоразрядного излучателя в воздушной среде на рабочей частоте устройства 10,5 кГц

Из приведенной на рисунке 4.14 зависимости видно, что на расстоянии 70 мм от излучателя (r_{\max}) зарегистрирована амплитуда сигнала виброперемещения (A_{\max}) 16 мкм/с. Снижение амплитуды сигнала в два раза ($1/2 A_{\max}$) наблюдалось на расстоянии 250 мм от излучателя на частоте 10,5 кГц. С увеличением частоты передаваемого сигнала длина волны в воздухе уменьшается соответственно, что также сопровождается монотонным затуханием амплитуды сигнала. В частности, на частоте 20 кГц двукратное уменьшение амплитуды виброскорости было зарегистрировано на расстоянии 210 мм, а на частоте 30,5 кГц соответствующее значение составило 195 мм. Полученные результаты следует учитывать в дальнейшем для оптимизации расстояния между объектом контроля и излучателем при проведении неразрушающего контроля материалов и изделий с использованием газоразрядного излучателя.

Дальняя зона излучателя в свою очередь определяется областью, в которой от излучателя распространяется бегущая волна со сферическим (цилиндрическим) фронтом. В данном случае амплитуда волны монотонно убывает из-за расхождения лучей от излучателя и определяется для каждой рассматриваемой рабочей частоты, начиная от ближней зоны.

В дальней зоне угловое распределение амплитуды волны описывается диаграммой направленности (ДН). В области проектирования акустических преобразователей диаграмма направленности определяется для получения угловой зависимости амплитуды акустических волн преобразователя [242]. На диаграмме направленности выделяют основной лепесток, который отражает 85 % всей энергии излучения в направлении акустической оси, и боковые лепестки, на которые приходится до 15 % всей энергии излучения [234].

Текущий промышленный стандарт для измерения диаграммы направленности, генерируемой акустическими устройствами, требует использования импульсного сигнала для возбуждения устройства и его вращения на 360° [243]. Указанная методология позволяет охарактеризовать устройство только на одной частоте за одно измерение. В связи с этим, чтобы охарактеризовать устройство на нескольких частотах в пределах его рабочей полосы частот, необходимо повторять процесс измерения, что значительно увеличивает время испытаний и связанные с этим издержки.

С целью преодолеть вышеуказанное ограничение в настоящей работе предлагается использование лазерного доплеровского виброметра для измерения диаграммы направленности акустических преобразователей. Лазерная виброметрия проводится по центральной оси излучателя (расположена в центре устройства и совпадает с центральным лучом акустической волны) в режиме измерения амплитудно-частотного спектра вибраций. Указанный подход позволяет охарактеризовать устройство в заданном диапазоне частот в рамках одного измерения. На рисунке 4.15 схематично приведен принцип измерения диаграммы направленности ультразвуковых преобразователей с использованием лазерного виброметра.

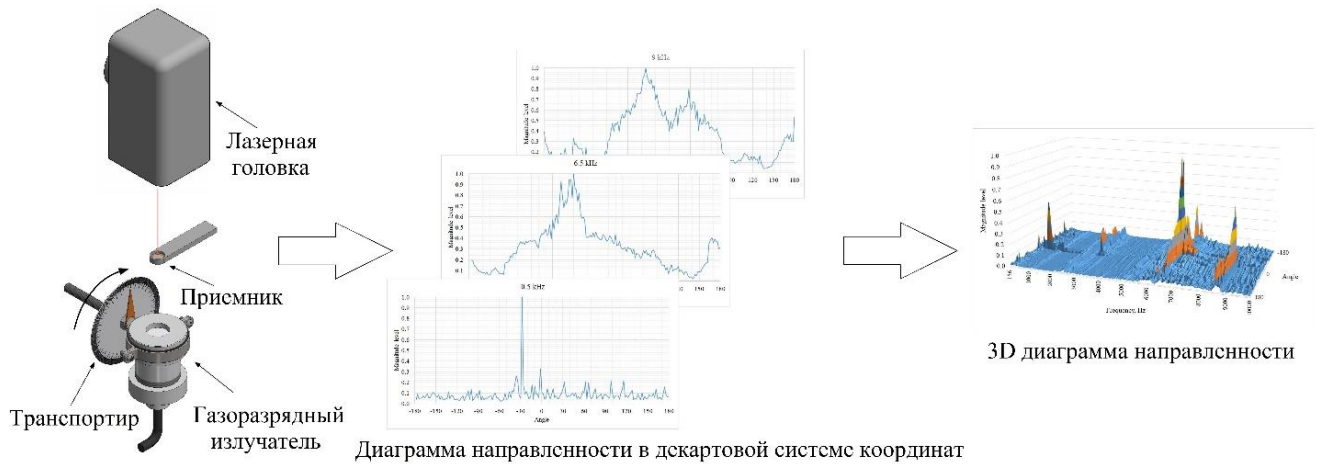


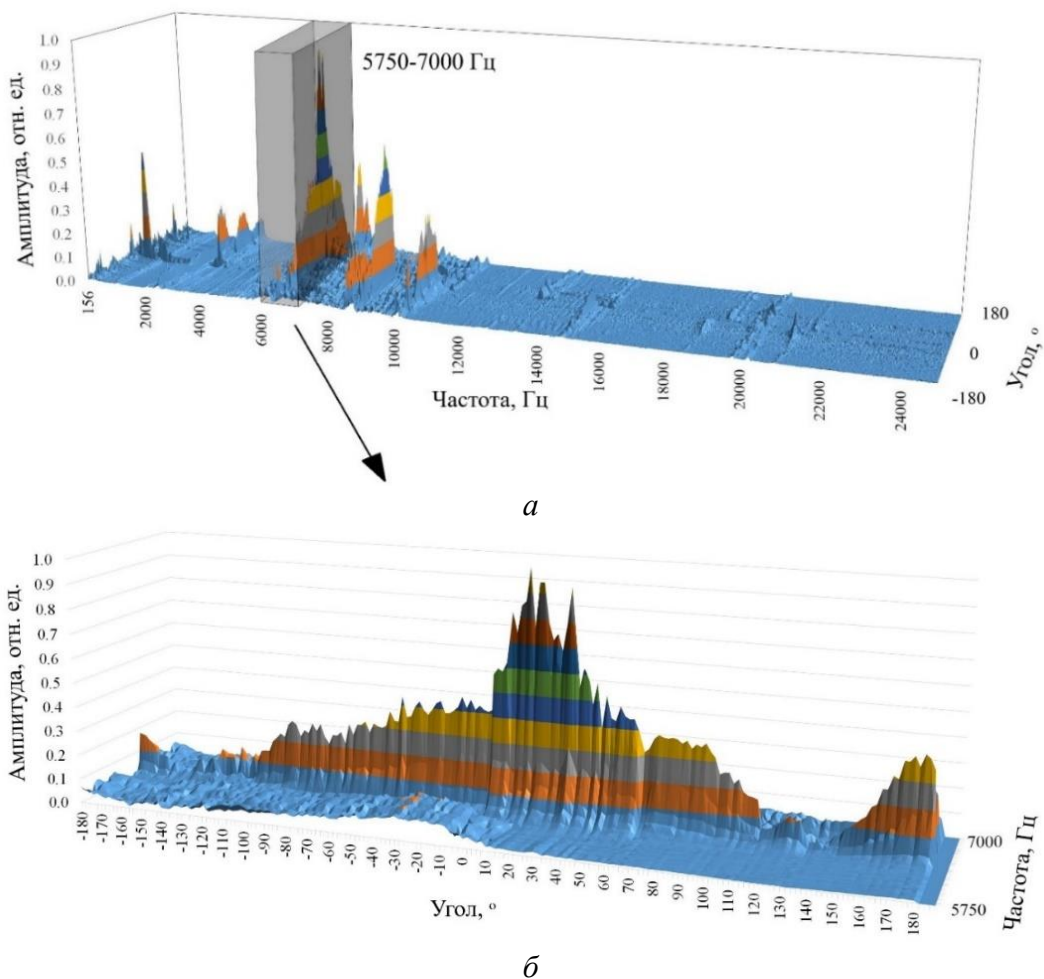
Рисунок 4.15 – Измерения диаграммы направленности акустических систем с использованием лазерного доплеровского виброметра

Установка включает в себя акустический преобразователь (в нашем случае – газоразрядный излучатель), приемник акустической волны, лазерный виброметр для измерения колебаний приемника, а также систему вращения излучателя на основе транспортера. Поворот устройства производится с точностью угла наклона 1° . Скорость вибрации на поверхности приемника измеряется с использованием лазерного виброметра в режиме быстрого преобразования Фурье в заданном диапазоне частот. Результатом лазерного сканирования является набор амплитудно-частотных спектров (рисунок 4.15), которые нормируются по амплитуде измеряемого сигнала. Далее с использованием программы Excel производится преобразование полученных спектров в пространственную диаграмму направленности, представленную в декартовой системе координат. Сечения пространственной диаграммы используются для построения диаграммы направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях с целью показать направленность излучения на конкретной частоте, а также зависимость интенсивности излучения от направления в пространстве.

В процессе измерения диаграммы направленности газоразрядного излучателя приемник акустического сигнала (латунная круглая мембрана диаметром 8 мм и толщиной 0,2 мм) был размещен на фиксированном расстоянии 220 мм от поверхности излучателя. Скорость вибрации на поверхности приемника измеряли в частотном диапазоне от 50 Гц до 60 кГц. Количество спектральных

линий составило 3200, что соответствует шагу сканирования менее 20 Гц. В процессе измерений газоразрядный излучатель вращали относительно приемника на 360° с шагом 2° с использованием транспортира, как показано на рисунке 4.15.

Далее было проведено преобразование полученных спектров в пространственную диаграмму направленности, представленную в декартовой системе координат. График распределения амплитуды сигнала в измеренном диапазоне частот в зависимости от направления излучения в пространстве приведен на рисунке 4.16.

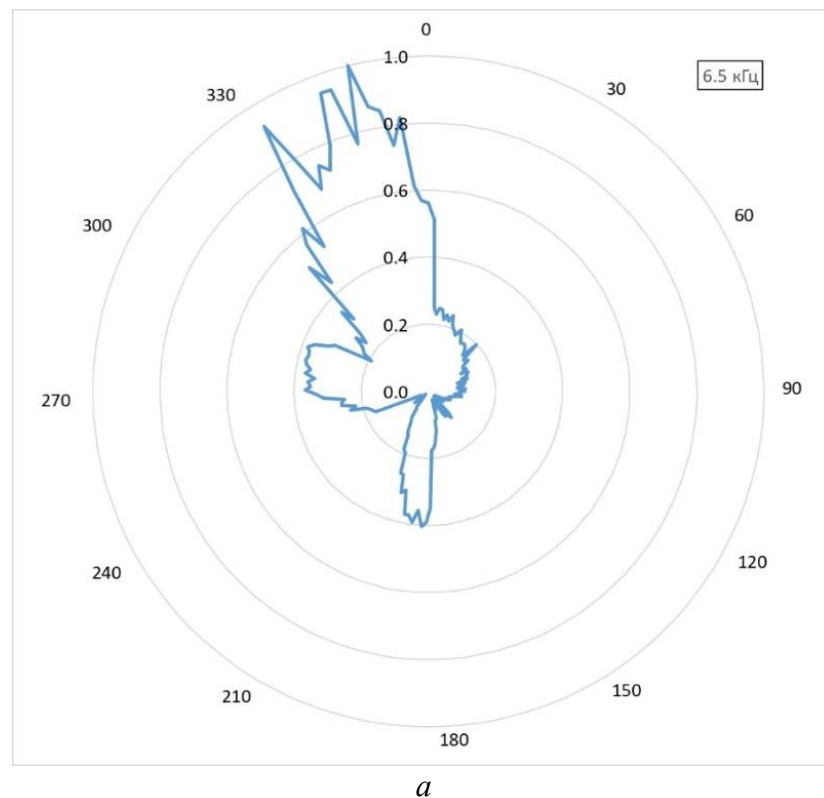


a – спектральный диапазон 50 Гц÷25 кГц, *б* – спектральный диапазон 5,5÷7,5 кГц
 Рисунок 4.16 – Пространственная диаграмма направленности газоразрядного излучателя, представленная в декартовых координатах, полученная для спектральных диапазонов 50 Гц÷25 кГц и 5,5÷7,5 кГц

В рамках анализа данных проведено нормирование измеренной амплитуды виброперемещения (точность не менее 5 измерений в каждой точке), принимая

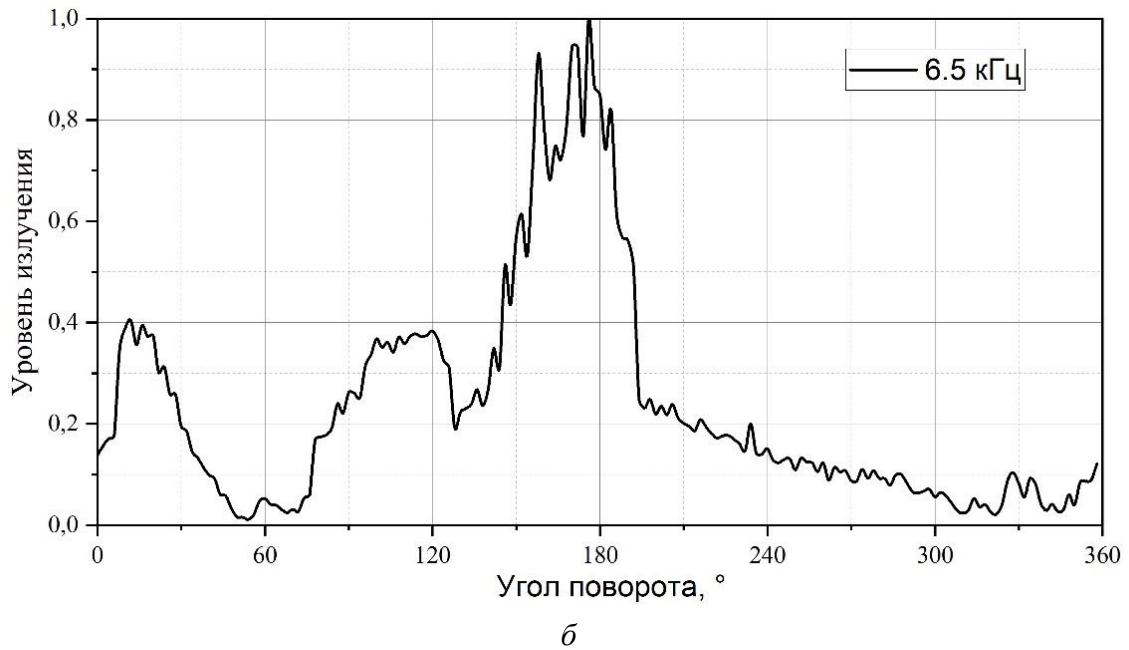
максимальный радиус-вектор равным единице. Из графика (рисунок 4.16, *а*) следует, что максимальная амплитуда сигнала зарегистрирована на частоте 6,5 кГц, что было использовано для нормирования данных. Масштабирование пространственной диаграммы направленности в диапазоне частот 5,5÷7,5 кГц приведено на рисунке 4.16, *б* и отражает распределение амплитуды излучения газоразрядного излучателя в пространстве на частоте основного резонанса излучателя.

Рассмотрим детальнее направленность излучения на частоте основного резонанса мембраны излучателя – 6,5 кГц. Сечение пространственной диаграммы направленности на указанной частоте приведено на рисунке 4.17 в полярной (рисунок 4.17, *а*) и декартовой (рисунок 4.17, *б*) системах координат.



а – диаграмма в полярной системе координат

Рисунок 4.17, *а* – Диаграмма направленности газоразрядного излучателя в полярной и декартовой системах координат на частоте 6,5 кГц



б – диаграмма в декартовой системе координат

Рисунок 4.17, *б* – диаграмма направленности газоразрядного излучателя в полярной и декартовой системах координат на частоте 6,5 кГц

Как видно из графика (рисунок 4.17, *а*, *б*), ультразвуковое поле имеет вид симметричного пучка с одиночным центральным пиком. Диаграмма направленности основного лепестка излучателя имеет узконаправленный характер с разверткой в 42 градуса (от -50° до -8° при уровне коэффициента направленного действия выше 0,5). Помимо основного лепестка, присутствуют боковой и обратный лепестки. В частности, в диапазоне от -110° до -50° наблюдается боковой лепесток, а в диапазоне от 160° до 190° (что соответствует -170° на графике) наблюдается обратный лепесток, с относительным значением амплитуды сигнала до 0,4. Согласно условиям проведения эксперимента, основной лепесток диаграммы направленности должен совпадать с направлением в 0° , однако максимум амплитуды колебаний наблюдается на -30° . Полученные данные можно объяснить пробоем плазмы вне центра мембраны излучателя, что также прослеживается в виде искажения формы колебаний мембраны излучателя на частоте основного резонанса – 5,2–8,7 кГц (таблица 4.1). Отклонение основного лепестка диаграммы направленности от центра оси x является следствием указанного эффекта и в дальнейшем может быть скомпенсировано, например,

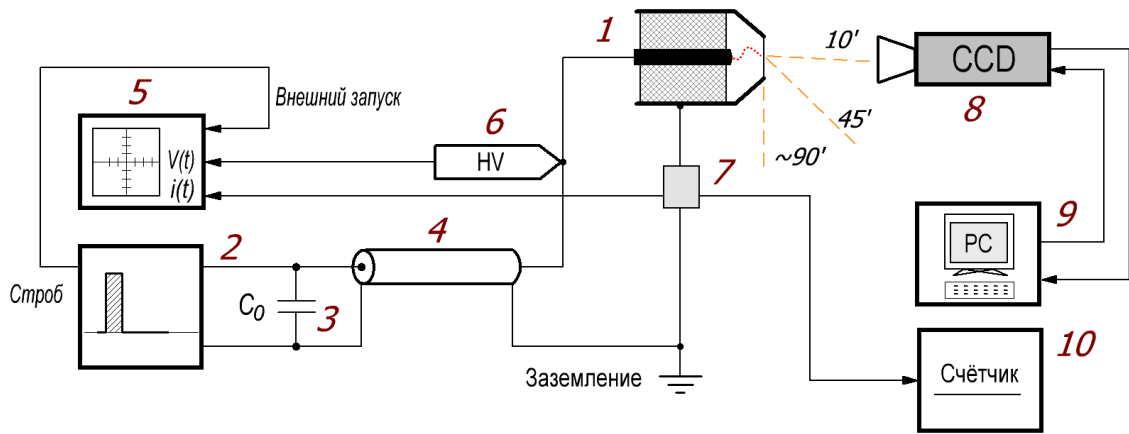
путем введения дополнительного громоотвода для центровки места пробоя плазмы. Однако на текущий момент, в связи с отклонением направленности основного лепестка, располагать излучатель по отношению к исследуемой поверхности следует под углом -30° для повышения эффективности ввода ультразвука. В целом следует заметить, что указанную особенность излучения устройства необходимо учитывать при его размещении в рамках НК материалов и изделий.

4.1.6. Оценка электроакустических характеристик газоразрядного излучателя

Эффективность проведения контроля качества материалов и изделий зависит от электрической мощности системы, эффективности преобразования электрической энергии, потребляемой оборудованием, в акустическую энергию, вводимую в объект исследования, ее электроакустического коэффициента полезного действия (КПД).

Для оценки удельного энерговклада в объем области плазмы разряда проведено исследование специфики разрядных процессов в газоразрядном излучателе акустических колебаний. Исследование заключается в фотографировании разряда с помощью CCD-камеры и одновременной регистрации тока и напряжения горения разряда, что позволяет получить информацию для расчета мощности и энергии, выделяющейся в газоразрядном промежутке.

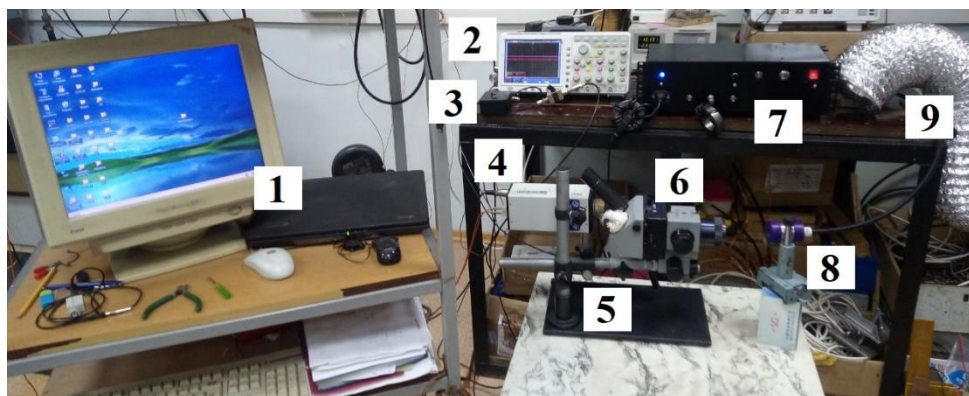
Для проведения исследований был собран лабораторный стенд, упрощенная схема лабораторной установки представлена на рисунке 4.18. В данной установке блоки 2, 3, 4 и 1 объединены в систему для генерации акустических колебаний на основе газового разряда атмосферного давления. Блоки 5, 6 и 7 необходимы для регистрации параметров разряда, блоки 8, 9 и 10 – для фотографирования разряда и фиксирования экспериментальных данных.



1 – газоразрядный излучатель, 2 – генератор импульсов тока, 3 – промежуточный емкостной накопитель, 4 – коаксиальная линия (1,5 м), 5 – осциллограф, 6 – высоковольтный пробник, 7 – датчик тока на основе пояса Роговского, 8 – быстродействующая камера, 9 – компьютер
Пунктирными линиями обозначены направления фотосъемки, углы указаны относительно оси излучателя

Рисунок 4.18 – Упрощенная схема лабораторной установки для исследования газового разряда и проведения ресурсных испытаний излучателя

После проведения тестовых экспериментов лабораторный стенд был доработан. В частности, CCD-камера снабжена микроскопом и размещена на штативе, добавлен блок синхронизации для стробирования всех устройств установки, обеспечена вытяжная вентиляция в рабочей зоне. Фотография лабораторного стенда после доработки приведена на рисунке 4.19.



1 – компьютер, 2 – осциллограф, 3 – блок синхронизации, 4 – CCD-камера, 5 – штатив, 6 – микроскоп, 7 – генератор импульсов тока, 8 – газоразрядный излучатель, 9 – вытяжная вентиляция

Рисунок 4.19 – Фотография лабораторного стенда с нумерацией основных блоков

В данной системе компьютер 1 совместно с камерой 4 и микроскопом 6, закрепленными на штативе 5, используются для фотографирования свечения разряда

в газоразрядной системе излучателя 8. Осциллограф 2 обеспечивает синфазную регистрацию тока и напряжения горения разряда. Блок синхронизации 3 обеспечивает временную синхронизацию генератора импульсов тока 7, осциллографа 2 и камеры 4. Вентиляция 9 обеспечивает вытяжку воздуха из рабочей зоны.

В ходе работы за счет регулировки временной задержки срабатывания камеры фиксировались картины свечения плазмы в газоразрядном промежутке излучателя в различные моменты времени. Одновременно с этим с помощью осциллографа регистрировались напряжения горения разряда, ток через газоразрядный промежуток и число импульсов тока разряда.

На рисунке 4.20 приведены развернутые осциллограммы напряжения горения разряда и ток через газоразрядный промежуток, соответствующие начальным стадиям зарядки емкости и искровому пробое.

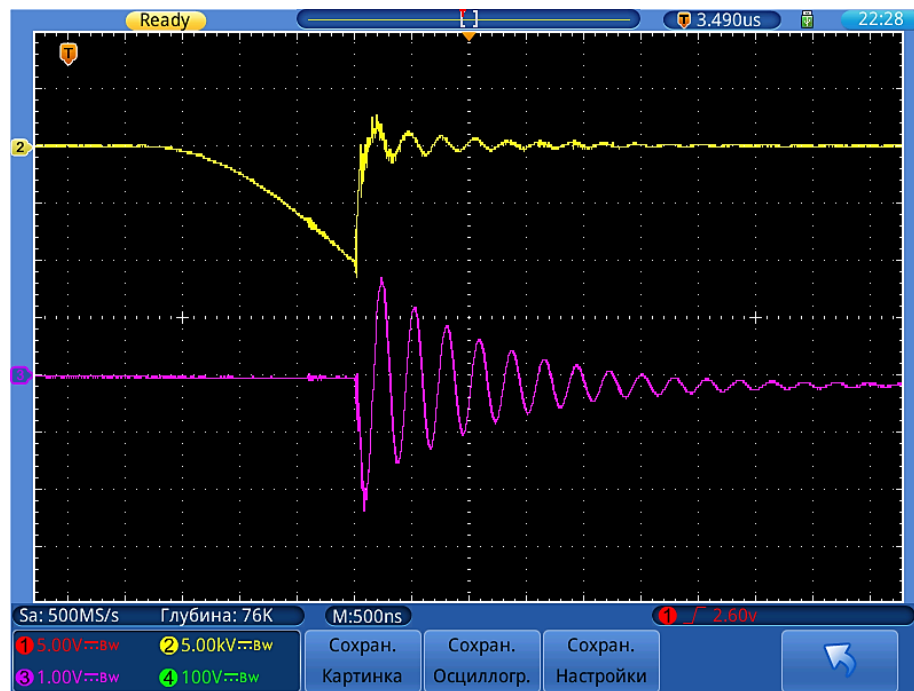


Рисунок 4.20 – Осциллограммы напряжения горения разряда (луч 2, 5 кВ/дел.) и тока через газоразрядный промежуток (луч 3, 250 А/дел.). Горизонтальная развертка 500 нс/дел

Из осциллограммы (рисунок 4.20) видно, что время заряда промежуточного емкостного накопителя составляет около 1,5 мкс. Скорость нарастания напряжения перед пробоем достигает 10 кВ/мкс. Для зазора около 5–6 мм при напряжении

на промежутке в районе 10 кВ достигается пороговая напряженность электрического поля и в системе происходит искровой пробой. Для максимальной величины зазора порядка 12 мм пробивное напряжение достигало 16–17 кВ. Ввиду того, что в электродной системе газоразрядного излучателя возникает усиление электрического поля, в области близ острия потенциального электрода возможно формирование пробоя по поверхности диэлектрика (внутренней поверхности изолятора). Пробой происходит при напряженности электрического поля в системе около 14 кВ/см.

Амплитуда тока разряда достигает приблизительно 630 А для зазора около 5–6 мм и 800 А для максимальной величины зазора 12 мм. На осциллограмме тока видно, что характерное время затухания колебаний составляет приблизительно 4 мкс, за это время происходит переход из искры в дугу. Максимальная интегральная энергия в импульсе искрового разряда оценивается около 0,4 Дж. Средняя электрическая мощность (P_{cp}), выделяемая за время длительности искрового разряда 4 мкс, составляет $P_{cp} = 0,4 \text{ Дж} / 4 \text{ мкс} = 10^4 \text{ Вт}$.

Анализ преобразования электрической мощности газоразрядного излучателя в акустическую проводили путем определения усредненной мощности, которая переносится акустической волной через поперечную площадку (S), расположенную перпендикулярно направлению ее распространения. Из литературы [183] известно, что при распространении акустической волны в среде ее частицы совершают колебательные движения, смещаясь относительно положения покоя. При этом зависимость смещения частицы (x) от времени (t) происходит соответственно закону:

$$x = A \times \sin 2\pi ft, \quad (4.5)$$

где A – максимальное смещение частиц среды,

f – частота колебаний.

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

$$v = \frac{dx}{dt} = 2\pi f A \cos 2\pi f t, \quad (4.6)$$

если $A = \text{const}$.

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

$$v_0 = 2\pi f A = \omega A. \quad (4.7)$$

Физическая величина, которая определяет количество энергии, переносимое звуковой волной через поперечную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения ультразвуковой волны, называется силой звука и определяется как:

$$I = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \frac{dP}{dS} dt, \quad (4.8)$$

где T – время усреднения,

dP – поток звуковой энергии, переносимый через площадку dS .

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

$$I = \frac{dP(t)}{dS}. \quad (4.9)$$

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

$$P = 2\pi f \rho c A = v_0 \times \rho c, \quad (4.10)$$

где ρ – плотность среды,

c – скорость распространения звука в среде.

Для плоской синусоидальной бегущей волны мгновенное значение интенсивности звука определяется выражением [244]:

$$I = \frac{P \times v_0}{2} = \frac{P_0^2}{2\rho c} = \frac{v^2 \times \rho c}{2}. \quad (4.11)$$

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

$$P_{ак} = \frac{v_{input}^2 \times \rho c}{2} \times S, \quad (4.12)$$

где ρ – плотность материала,

V_{input} – среднее значение амплитуды виброскорости колебания частиц среды в бездефектной зоне,

c – скорость распространения звука в углепластике,

S – площадь поперечного сечения площадки, расположенной перпендикулярно направлению распространения звука.

Определение акустической мощности проводили путем анализа вибраций на поверхности исследуемого материала с помощью аппаратуры сканирующей лазерной виброметрии при акустической стимуляции пластины углепластика. Измеренная амплитуда скорости вибраций на поверхности материала в бездефектной зоне составила $V_{input} = 0,101$ мм/с, в то время как средняя электрическая мощность за время длительности искрового разряда 4 мкс оценивается на уровне 10^4 Вт. Скорость распространения звука в углепластике 1133 м/с. Площадь поперечного сечения площадки пластины углепластика (S), расположенной перпендикулярно направлению распространения звука, составила $0,083 \times 10^{-3}$ м². Таким образом, акустическая мощность составила:

$$P_{ак} = \frac{1560 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \times 0,01 \times 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \times 1133 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{2} \times 0,083 \times 10^{-3} \text{ м}^2 = 0,73 \text{ мкВт}.$$

Как известно из полученных в разделе 2.3 результатов исследований, максимальная интегральная энергия в импульсе искрового разряда оценивается на уровне около 0,3–0,4 Дж. Тогда за время длительности искрового разряда 4 мкс средняя электрическая мощность составляет $0,4 \text{ Дж} / 4 \text{ мкс} = 10^4$ Вт. Следовательно, при среднем значении электрической мощности $P_{эл} = 10^4$ Вт акустическая мощность, вводимая в исследуемую пластину от газоразрядного излучателя через воздушную среду на расстоянии 10 мм, составляет $P_{ак} = 0,73$ мкВт.

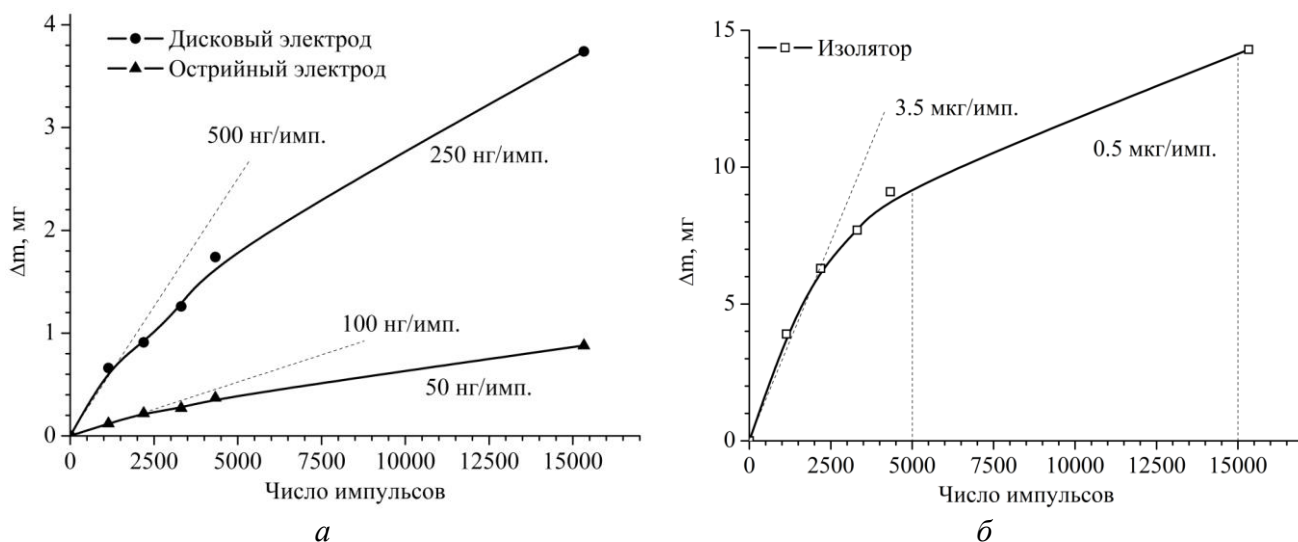
Соответствующий коэффициент преобразования электрической мощности излучателя в акустическую ($\eta_{\text{за}}$) составляет $\eta_{\text{за}} = \frac{P_{\text{ак}}}{P_{\text{эл}}} \times 100\% = 73 \times 10^{-10}$. Полученное значение вводимой акустической мощности сопоставимо с аналогичными характеристиками акустической мощности, вводимой в твердые тела от бесконтактных излучателей [64], что определяется существенным различием акустического импеданса воздушной среды и твердых тел, и, в свою очередь, приводит к снижению эффективности проникновения акустических волн в твердые тела.

4.1.7. Проведение ресурсных испытаний газоразрядного излучателя

Методика исследования эрозии электродов, коррозии материалов электродной системы в результате плазмохимического воздействия подразумевает микроскопию поверхности электродов и измерение потери массы элементов электродной системы излучателя при наработке порядка 10^3 – 10^4 импульсов. На основе полученных данных требуется сделать выводы касательно ресурса и стабильности выходных параметров газоразрядного излучателя акустических колебаний.

В ходе научно-исследовательской работы проведены эксперименты по измерению уноса массы с электродов и изолятора при наработке свыше 10^4 импульсов. Первоначально были измерены массы элементов конструкции излучателя. Для взвешивания использовались полумикровесы Госметр ВЛ-120М (Госметр).

Изначально масса дискового электрода составляла 11,4276 г, масса острейного электрода – 0,5879 г, масса изолятора – 27,2070 г. Для определения уноса массы проводились ресурсные испытания по 1000 импульсов и серия на 10000 импульсов. Затем были выполнены оценки средней и максимальной скорости потери массы электродов и изолятора. Данные, полученные в ходе ресурсных испытаний, частично представлены на рисунке 4.21 в виде графиков.



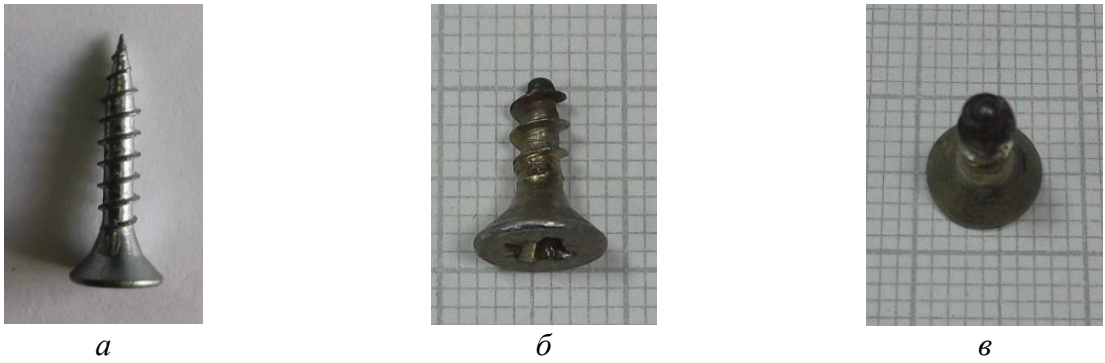
a – потери массы электрода, b – потери массы изолятора

Пунктирными линиями обозначены аппроксимации для оценки скорости потери массы

Рисунок 4.21 – Потери массы деградирующего материала электродов и изолятора совместно с оценками средней и максимальной скорости потери массы элементов конструкции газоразрядного излучателя акустических колебаний

Наименьшая скорость потери массы наблюдается для острейного электрода и составляет 50–100 нг/имп. Для дискового электрода скорость потери массы составляет 250–500 нг/имп. В рассматриваемом включении острейный электрод является катодом, дисковый – анодом. Ввиду этого можно было бы предположить, что унос массы с катода будет больше, чем с анода, в результате прикатодных явлений. Однако ввиду различия материалов электродов (холоднокатаная сталь для острей и латунь для диска) унос массы с дискового электрода приблизительно в 5 раз больше. Вероятно, это связано с меньшей температурой плавления латуни и другими различиями физических свойств сплавов, из которых изготовлены электроды.

После проведения испытаний с помощью фотографирования были зафиксированы состояния и общий вид электродов. На рисунке 4.22 приведены фотографии острейного электрода.



a – острый электрод до испытаний, *б, в* – острый электрод после испытаний
 Рисунок 4.22 – Фотографии острейного электрода до и после проведения ресурсных испытаний

На фотографии (рисунок 4.22) видно оплавление острия электрода. Было замечено, что в ходе ресурсных испытаний длина острой части несколько уменьшилась. Таким образом, в результате деградации (эрозии) острейного электрода изменяется длина межэлектродного промежутка. Для величины зазора $d = 12$ мм, принимая допустимое относительное изменение длины зазора на уровне 20 %, получим абсолютное изменение длины электрода порядка 2 мм. Принимая плотность стали $7,9 \text{ г/см}^3$ и средний диаметр острейного электрода около 2 мм, оценим ресурс газоразрядного излучателя, исходя из состояния электрода. На основе данных о скорости уноса массы (рисунок 4.21) оцениваем ресурс острейного электрода на уровне 10^6 импульсов. При частоте следования импульсов 3 Гц это соответствует приблизительно 100 часам непрерывной работы. По прошествии этого времени генерация акустических колебаний не прервется, однако их амплитуда существенно возрастет. Это объясняется тем, что с ростом длины межэлектродного промежутка увеличивается пробивное напряжение, а, следовательно, возрастает и энергия, запасенная в емкостном накопителе генератора импульсов тока.

Экстраполируя данные результаты, можно предположить, что, применяя электрод большего диаметра и экспериментируя с материалом электрода, возможно получить ресурс на уровне 10^7 импульсов (или 1000 часов наработки при максимальной частоте следования импульсов) при незначительном отклонении выходных характеристик излучателя. Кроме того, из общих соображений следует, что увеличить ресурс системы также можно, уменьшая ток и энергию в импульсе разряда.

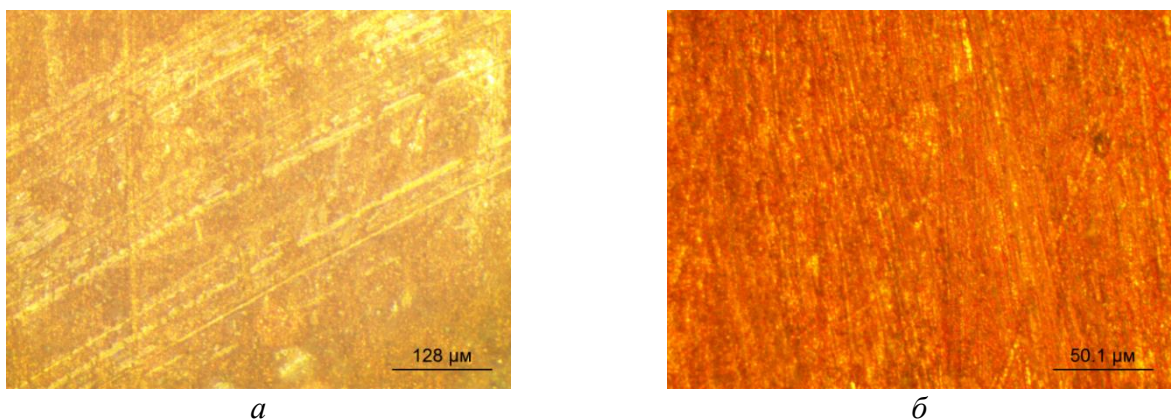
На рисунке 4.23 приведены фотографии дискового электрода.



a – внутренняя сторона электрода, *б* – фронтальная часть электрода

Рисунок 4.23 – Фотографии внутренней стороны и фронтальной части латунного дискового электрода после ресурсных испытаний

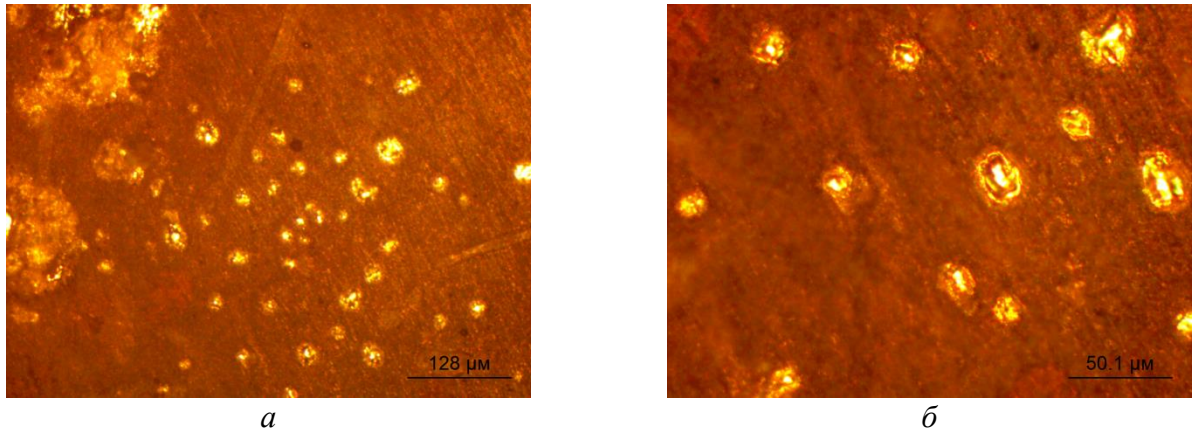
На фотографии (рисунок 4.23) видно оплавление в центре электрода и изменение материала в месте контакта дискового электрода с обратным токопроводом. В ходе работы поверхности электродов были исследованы с помощью металлографического микроскопа Альтами МЭТ1. Микрофотографии поверхности дискового электрода до проведения ресурсных испытаний приведены на рисунке 4.24.



a – микрофотография с 60-кратным увеличением (крупно),
б – микрофотография с 160-кратным увеличением (детально)

Рисунок 4.24 – Фотографии дискового электрода до проведения испытаний при различном увеличении

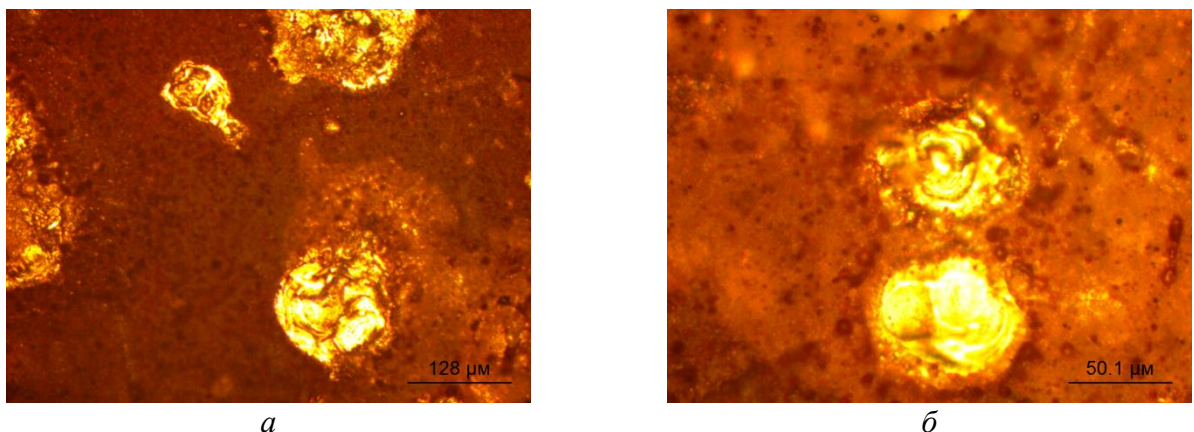
В целом поверхность электрода однородная, однако видны следы механической обработки. В зависимости от освещенности и контраста визуально несколько изменяется цвет поверхности на фотографии. Для детального исследования эрозии электродов выполнено фотографирование поверхности дискового электрода после проведения ресурсных испытаний (рисунки 4.25, 4.26).



a – микрофотография с 60-кратным увеличением (крупно),
б – микрофотография с 160-кратным увеличением (детально)

Рисунок 4.25 – Фотографии микрократеров на поверхности дискового электрода после ресурсных испытаний при различном увеличении

Были обнаружены микрократеры с характерным линейным размером (диаметром) от 10 мкм до 20 мкм. Показано, что есть вероятность пробоя на край кратера, в результате чего микрократеры сплавляются друг с другом (рисунок 4.26).



a – микрофотография с 60-кратным увеличением,
б – микрофотография с 160-кратным увеличением

Рисунок 4.26 – Фотографии больших кратеров на поверхности дискового электрода после ресурсных испытаний при различном увеличении

Поскольку края кратера являются неоднородностью на поверхности электрода, существует значительная вероятность привязки разряда на область кратера или ее край. Это приводит к тому, что микрократеры перекрываются друг с другом и формируют наплавления субмиллиметрового масштаба при большом количестве импульсов разряда. Кроме того, на поверхности дискового электрода после ресурсных испытаний наблюдаются изменения не только в результате эрозии электродов (образования кратеров), но и химической коррозии материалов электродной системы, также возможны и другие побочные процессы.

В ходе исследования были замечены как изменения поверхностей дискового электрода и обратного токопровода в области их контакта (рисунок 4.27, *а*), так и изменение формы внутренней части изолятора, находящейся в непосредственной близости с областью плазмы газового разряда (рисунок 4.27, *б*).



а – электродная система, *б* – изолятор

Рисунок 4.27 – Фотографии электродной системы и изолятора после ресурсных испытаний

Изменения поверхностей дискового электрода и обратного токопровода в области их контакта, вероятно, связаны с выделением тепла ввиду наличия контактной разности потенциалов. Для контактной разности потенциалов Al–Cu на уровне 0,3 В и тока 1 кА мощность, рассеиваемая на контакте, оказывается на уровне 300 Вт. В результате на поверхности токоведущих частей в месте контакта образуется область с большой плотностью мощности, что приводит

к изменению материалов из-за окисления, наплавления шероховатостей и других физических процессов.

В ходе работы рассмотрены потери массы деградирующего материала изолятора. Наибольшая скорость потери массы (рисунок 4.22, в) характерна для изолятора и составляет 0,5–3,5 мкг/имп после наработки порядка 10^6 импульсов. Максимальная величина соответствует начальному участку графика и, вероятно, объясняется десорбцией газов, механическим разрушением, испарением и распылением неоднородностей на поверхности с их последующим уносом из объема электродной системы газоразрядного излучателя. По мере выхода на режим скорость потери массы изолятора стабилизируется и устанавливается на уровне 500 нг/имп.

Видно, что скорость потери массы для изолятора значительно больше, чем для электродов. Если для металлических электродов потеря массы объясняется испарением и распылением, то для изолятора возникают дополнительные потери массы из-за взаимодействия с плазмой разряда. Кроме того, на металлических токоведущих частях эрозия происходит в основном в местах привязки разряда на электродах (катодные и анодные пятна), в то время как при пробое по поверхности диэлектрика возникает область контакта значительной площади, порядка нескольких мм² и более.

Для более детального рассмотрения процессов, приводящих к потере массы материала изолятора, необходимо учитывать свойства газового разряда. Таким образом, необходимо рассматривать тепловые и плазмохимические процессы под воздействием плазмы разряда. Основным моментом при этом является то, что характерные температуры областей плазмы разрядов атмосферного давления имеют порядок 10^4 К для искры и 10^3 К для дуги и тлеющего разряда. Присутствует излучение фотонов из области плазмы.

Согласно стандарту ASTM D3418, температура плавления для разных типов тефлона лежит в диапазоне от 260 °С до 327 °С. Согласно литературным данным, пиролиз политетрафторэтилена начинается при температуре выше 200 °С. Процесс медленно протекает вплоть до температуры 420 °С [42]. При температурах от 500

до 550 °С потеря веса деградирующего материала достигает 5–10 % в час в зависимости от условий среды. Продукты разложения при температурах от 300 до 360 °С – гексафторэтан и октафторциклобутан, при температуре выше 380 °С к ним добавляется октафторизобутилен, а от 500 до 550 °С – гексафторпропилен и прочие перфторолефины. Стандарт ГОСТ 10007-80 нормирует рабочий диапазон температур фторопласта до 260 °С и прямо указывает на опасность выделения летучих продуктов термоокислительной деструкции, содержащих в своем составе фтористый водород (ПДК – 0,1 мг/м³), перфторизобутилен (ПДК – 0,1 мг/м³), оксид углерода (ПДК – 20 мг/м³) и тетрафторэтилен (ПДК – 30 мг/м³). Кроме того, при деструкции политетрафторэтилена образуются высокодисперсные частицы полимера – аэрозоль фторопласта (ПДК – 10 мг/м³).

Согласно оценочным расчетам на основе данных, представленных на рисунке 4.21, б, при наработке свыше 10⁴ импульсов концентрация вредных веществ может приближаться к их ПДК в случае невентилируемого помещения площадью 40 м². Соответственно концентрации в рабочей зоне могут быть еще выше. Таким образом, для безопасной работы необходимо использовать проточную вентиляцию для удаления вредных веществ.

4.2. Исследование акустических волн в воздушной среде

4.2.1. Рефрактовиброметрия воздушной среды возле газоразрядного излучателя

Сканирующая лазерная доплеровская виброметрия является эффективным инструментом для исследования вибрационных характеристик [8, 70], определения направленности излучения и визуализации акустических волн, генерируемых различными типами ультразвуковых преобразователей [245]. В работе [246] было показано, что SLDV можно использовать для оценки изменения показателя преломления, возникающего ввиду наличия акустических течений. В настоящее время этот метод является альтернативой высокоточному методу визуализации скорости движения частиц – Particle Image Velocimetry (PIV) – благодаря тому, что

для проведения измерения скорости движения частиц в воздушной среде с использованием лазерной доплеровской виброметрии не требуются затравочные частицы [247], как в случае использования метода PIV. Кроме того, сканирующий лазерный доплеровский виброметр представляет собой оптический инструмент для бесконтактного измерения скорости вибраций, позволяющий визуализировать акустические поля в окружающей среде. Методика основана на эффекте рефрактовиброметрии [248], позволяющем обнаруживать изменения оптического показателя преломления прозрачных сред, таких как воздух, за счет наличия специфических акустических полей.

В рамках работ по настоящему проекту с использованием лазерной виброметрии исследован процесс распространения акустических волн в воздухе от разрабатываемого электроискрового излучателя. Ниже приведены теоретические основы, описывающие процедуру рефрактовиброметрии с использованием сканирующего лазерного доплеровского виброметра.

В случае если волна отражается движущимся объектом и регистрируется лазерным виброметром, измеренный сдвиг частоты (Δf_D) будет определяться отношением скорости вибраций объекта (v) к длине распространяющейся акустической волны (λ):

$$\Delta f_D = \pm 2 \times \frac{v(t,x,y,z)}{\lambda}. \quad (4.13)$$

Для определения скорости колебания объекта доплеровский сдвиг частоты должен быть измерен на известной длине волны. С этой целью в лазерном виброметре используется интерферометр. Лазерный доплеровский виброметр работает на основе явления оптической интерференции, которое заключается в суперпозиции двух когерентных световых лучей, имеющих интенсивность I_1 и I_2 соответственно. В соответствии с принципом суперпозиции, результирующая интенсивность лучей определяется с учетом разности длин оптического пути ($\Delta L = l_1 - l_2$) между двумя лучами:

$$I_{total} = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2 \cos\left[\frac{2\pi(l_1 - l_2)}{\lambda}\right]} \quad (4.14)$$

Изменяя длину оптического пути в единицу времени, можно измерить доплеровский сдвиг частоты луча. Например, определяемая частота модуляции интерферометрической картины прямо пропорциональна скорости движения образца [246]. Однако в уравнении (4.14) не учитывается влияние возмущения, вызванного рефракцией в воздушной среде. Например, такие помехи могут быть вызваны наличием звука в анализируемой области (AB) между лазерным виброметром и движущимся объектом. С учетом этого, изменение длины оптического пути вдоль измерительного луча составляет:

$$\Delta L(t) = 2 \int_A^B \Delta n(t, x, y, z) dl, \quad (4.15)$$

где n – оптический показатель преломления.

Такое возмущение может быть вызвано флуктуациями давления (p), вызванными изменением оптического показателя преломления [249]:

$$\Delta n(t, x, y, z) = \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_s \Delta p(t, x, y, z). \quad (4.16)$$

Следовательно, полный доплеровский сдвиг частоты ($\Delta f_{D\Sigma}$) будет определяться суперпозицией геометрической и рефракционной составляющих [248]:

$$\Delta f_{D\Sigma}(t, x, y, z) = \pm \frac{2}{\lambda} [v(t, x, y, z) + \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_s \int_A^B \frac{d}{dt} (\Delta p(t, x, y, z)) dl]. \quad (4.17)$$

Стоит отметить, что определенная фотоупругость воздуха приводит к изменению как длины оптического пути луча, так и частоты его модуляции с участием параметра акустического давления воздуха. В свою очередь лазерный луч испытывает преломление в зонах переменного давления воздуха. Это позволяет визуализировать акустические волны в воздухе с использованием сканирующей лазерной доплеровской виброметрии.

Сканирующий лазерный доплеровский виброметр способен оценивать и визуализировать искажения акустических полей в воздухе, возникающих при работе воздушно-связанных акустических преобразователей, за счет правильного выбора чувствительности и разрешения виброметра. В рамках настоящей работы проведено исследование вибраций диафрагмы газоразрядного излучателя и акустических волн в окружающем пространстве. Лабораторная установка включала генератор импульсов тока, линию связи и газоразрядный излучатель,

а также сканирующий лазерный виброметр PSV-500-3D-HV (Polytec, Германия). Разряд возбуждался от генератора импульсов тока при выходном напряжении $V_0 < 12$ кВ (ток короткого замыкания 1 кА, импульсная электрическая мощность 10 кВт, частота следования импульсов 4 кГц). Установка показана на рисунке 4.28.

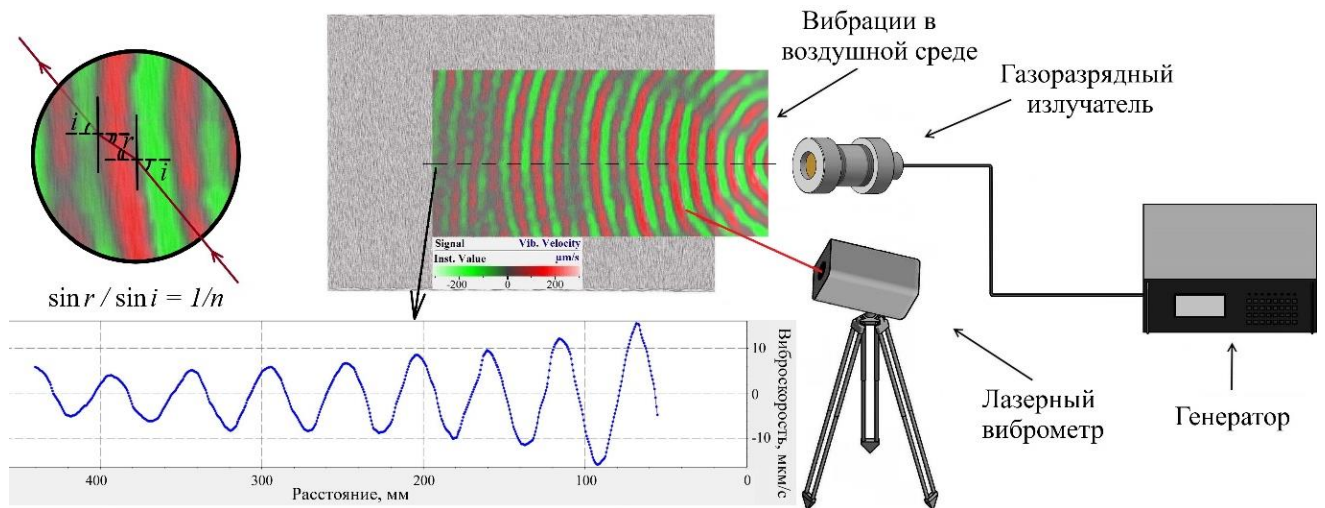


Рисунок 4.28 – Экспериментальная установка для оценки акустических полей в воздухе (вверху) и профиля виброскорости (внизу), создаваемых газоразрядным излучателем

На рисунке 4.28 показан принцип рефрактометрии, заключающийся в преломлении лазерного луча в областях колеблющегося давления в воздушном пространстве возле излучателя. В процессе анализа распространения колебаний в воздухе проводили виброизмерения воздушного пространства площадью 200×100 мм², расположенного на центральной оси излучателя (центральная ось показана пунктирной линией на рисунке 4.28) перпендикулярно поверхности излучателя, с пространственным шагом не более 1,5 мм на расстоянии от 10 мм до излучателя. С этой целью фокусировка виброметра осуществлялась при размещении отражателя на центральной оси излучателя параллельно фокальной плоскости оптической линзы виброметра. Далее отражатель отдаляли на расстояние до 3 м от центральной оси излучателя и до 5 м от фокальной плоскости линзы виброметра соответственно.

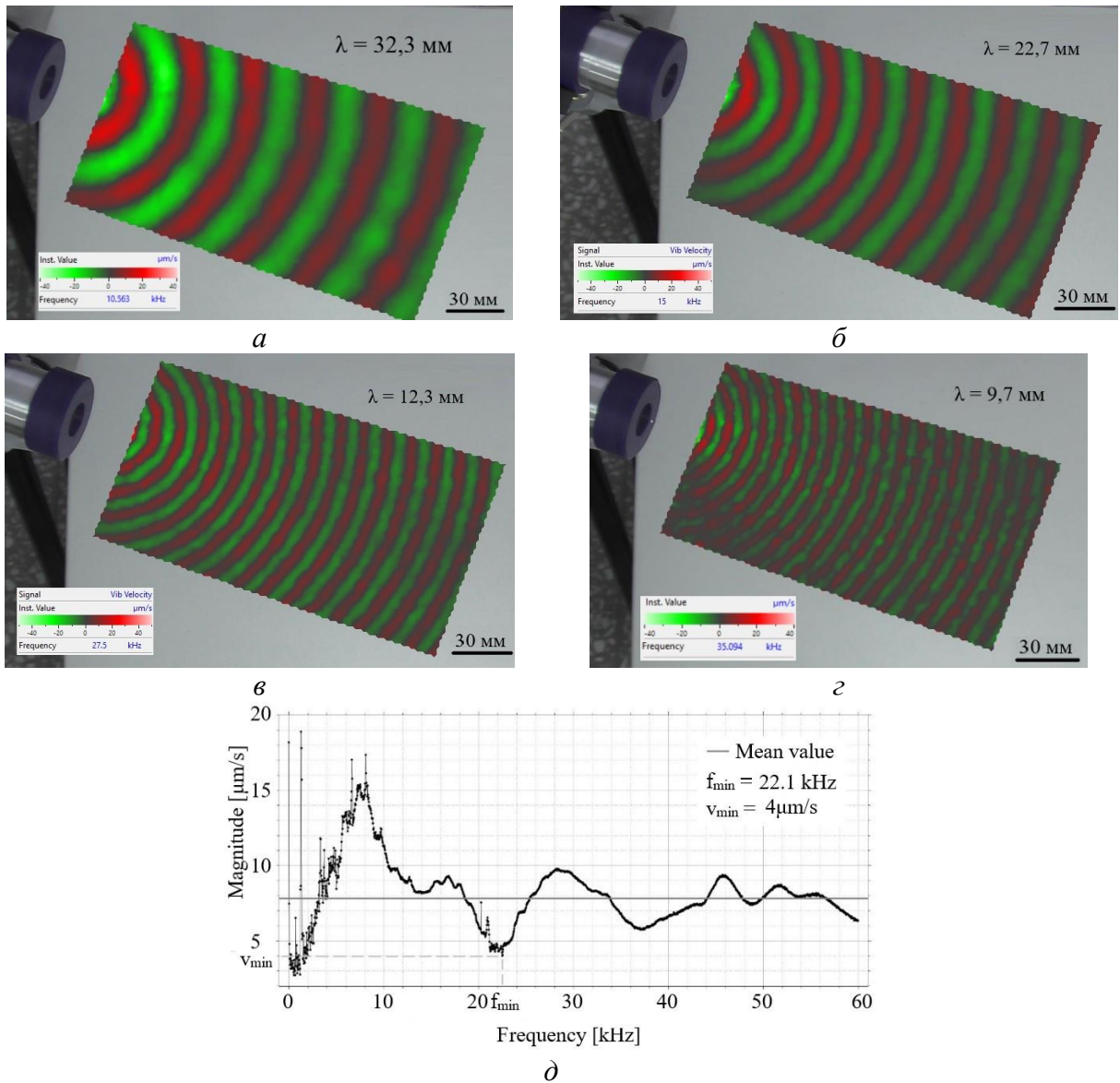
В процессе распространения ультразвука образуются области растяжения/сжатия воздушной среды, в результате чего лазерный луч преломляется. Результатом виброизмерений в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц явились виброграммы, отображающие вибрационные поля, формирующиеся в воздушной среде, а также амплитудно-частотный спектр колебаний частиц воздуха. Полученные данные позволяют определить спектральный состав акустического сигнала излучателя и фронт акустической волны, образуемой при колебании частиц воздушной среды.

Импульс электрического тока формируется в течение 100–200 нс, сопровождаясь скачком давления в окружающей среде вокруг разрядного канала. Это приводит к колебаниям элементов газоразрядного излучателя и генерации в окружающем воздухе акустических волн, вызванных искровым разрядом. В частности, проведение лазерного виброисканирования позволило визуализировать пространственное распространение акустических волн в воздушной среде. Фактически, благодаря определенной фотоупругости воздуха, как длина оптического пути луча, так и его частота модулируются в соответствии с характером акустического давления в воздухе. Зарегистрированное изменение частоты лазерного излучения распознается доплеровским виброметром как изменение скорости вибраций. Лазерный луч преломляется в зонах переменного давления воздуха (чередование зон сжатия/расширения воздуха), что позволяет визуализировать акустические волны в воздухе.

Для визуализации распространения звука необходима высокая плотность точек измерения на большой площади измерения в связи с тем, что длины волн звукового поля на более низких частотах больше, чем на более высоких частотах. В связи с этим, для визуализации акустических волн высокой частоты требуется сравнительно высокая плотность точек измерения.

В настоящем исследовании измерения были выполнены с использованием 4000 точек, занимающих поверхность общей площадью $200 \times 100 \text{ мм}^2$. На рисунке 4.29 приведены результаты измерения вибраций воздушного пространства, отражающие распределение акустических волн, излучаемых газоразрядным

излучателем на частотах 10,54 кГц (рисунок 4.29, *а*), 15 кГц (рисунок 4.29, *б*), 27,5 кГц (рисунок 4.29, *в*) и 35,1 кГц (рисунок 4.29, *г*). Измеренный спектр колебаний частиц воздуха приведен на рисунке 4.29, *д*.



Виброграммы на частотах: *а* – 10,54 кГц, *б* – 15 кГц, *в* – 27,5 кГц, *г* – 35,1 кГц;
д – амплитудно-частотный спектр колебаний в диапазоне от 50 Гц до 60 кГц

Рисунок 4.29 – Распространение акустических волн в воздушной среде возле газоразрядного излучателя

Амплитудно-частотный спектр (рисунок 4.29, *д*) показывает, что газоразрядный излучатель генерирует акустические волны в воздушной среде в диапазоне частот от 50 Гц до 60 кГц. Из полученных данных следует, что генерируемая мощность варьируется по всему спектру, но существенного

уменьшения амплитуды колебаний не наблюдается. Фактически в диапазоне частот от 21 до 25 кГц амплитуда колебаний снижается до 4 мкм/с (с минимумом на 18,7 кГц), что примерно вдвое ниже среднего значения 7,8 мкм/с. Кроме того, интенсивность некоторых низкочастотных колебаний в 2–3 раза превышает интенсивность колебаний в диапазоне частот 20–60 кГц. Вероятно, это можно объяснить демпфированием элементов эмиттера в высокочастотном диапазоне. Однако общий спектр колебаний относительно однороден, что позволяет генерировать акустические волны в воздушной среде с использованием газоразрядного излучателя и избежать появления паразитных стоячих волн между излучателем и объектом неразрушающего контроля. В свою очередь, методика рефрактовиброметрии позволяет измерять и визуализировать фазовые и частотные характеристики вибрационных сигналов в рамках одного эксперимента, бесконтактно и в широком диапазоне частот.

4.2.2. Измерение уровня акустического шума от газоразрядного излучателя

Работа бесконтактных акустических излучателей в воздушной среде неизбежно сопровождается шумами и оказывает воздействие на оператора, обслуживающего оборудование. В связи с этим перед исследованиями необходимо проводить измерения уровня шума и оценку его воздействия на человека в соответствии с действующими в законодательстве Российской Федерации регламентирующими документами (ГОСТ ISO 9612-2016. Межгосударственный стандарт. Акустика. Измерение шума для оценки его воздействия на человека. Метод измерений на рабочих местах). Нормирование допустимых уровней шума производится для различных мест пребывания населения (производство, дом, места отдыха) и основывается на ряде документов: ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности, ГОСТ 12.1.036-81 ССБТ. Шум. Допустимые уровни в жилых и общественных зданиях. Допустимые уровни постоянного шума на рабочих местах в соответствии с ГОСТ 12.1.003-83 приводятся в виде предельных спектров (ПС) уровней звукового давления или допустимых уровней звука в зависимости от вида трудовой деятельности или рабочего места.

Основными физическими параметрами, характеризующими звук, являются звуковое давление P и интенсивность звука I . Человек реагирует на величину, пропорциональную среднему квадрату звукового давления:

$$P^2 = \frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt, \quad (4.18)$$

где $P(t)$ – разность мгновенных значений полного и среднего давления в среде при отсутствии звукового поля,

T – время усреднения, которое для человеческого слуха находится в пределах 30–100 мс.

В процессе распространения звуковой волны происходит перенос энергии. Интенсивностью звука, в свою очередь, принимается количество звуковой энергии, переносимое звуковой волной в единицу времени через единичную площадь поверхности, при этом интенсивность звука прямо пропорционально зависит от звукового давления:

$$I = \frac{P^2}{\rho c}, \quad (4.19)$$

где ρ – плотность среды (кг/м³),

c – скорость звука в среде (м/с).

В соответствии с СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы, установленной характеристикой постоянного шума на рабочих местах являются уровни звукового давления в дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц. Указанные параметры определяются по формуле:

$$L = 20 \lg \frac{P}{P_0}, \quad (4.20)$$

где P – среднеквадратичная величина звукового давления (Па),

P_0 – исходное значение звукового давления в воздухе, равное 2×10^{-5} Па.

Допускается в качестве характеристики постоянного широкополосного шума на рабочих местах принимать уровень звука в дБА, измеренный на временной характеристике «медленно» шумомера, определяемый по формуле:

$$L_A = 20 \lg \frac{P_A}{P_0}, \quad (4.21)$$

где P_A – среднеквадратичная величина звукового давления с учетом коррекции «А» шумомера (Па).

С целью оценки уровня акустического шума в рабочей зоне газоразрядного излучателя проводили 1000 измерений уровня шума в помещении с использованием шумомера АТЕ-9015 (Актаком), установленного на расстоянии 30 см до излучателя, как показано на рисунке 4.30. Частоту следования импульсов разряда контролировали с использованием цифрового осциллографа Owon Smart DS5032E.

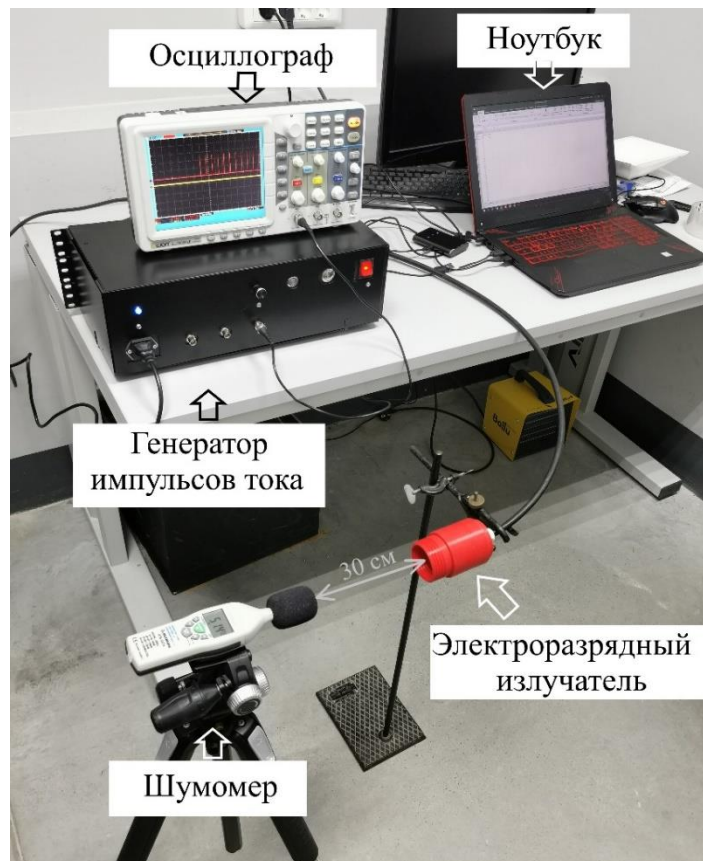


Рисунок 4.30 – Фотография лабораторной установки для измерения уровня шума в помещении при работе газоразрядного излучателя с демпфирующим кожухом

Измерения проводили при частоте следования импульсов 2 Гц. Величина межэлектродного зазора составляла 5 мм. В настоящем эксперименте исследовался излучатель с системой «закрытого» типа, мембрана выполнена из дюралюминия толщиной 1 мм.

Проведена оценка повторяемости уровня шума (L_A) на расстоянии 30 см от газоразрядного излучателя в сборке с мембраной закрытого типа. При проведении 1000 измерений получена зависимость уровня шума от количества разрядов (N), приведенная на рисунке 4.31.

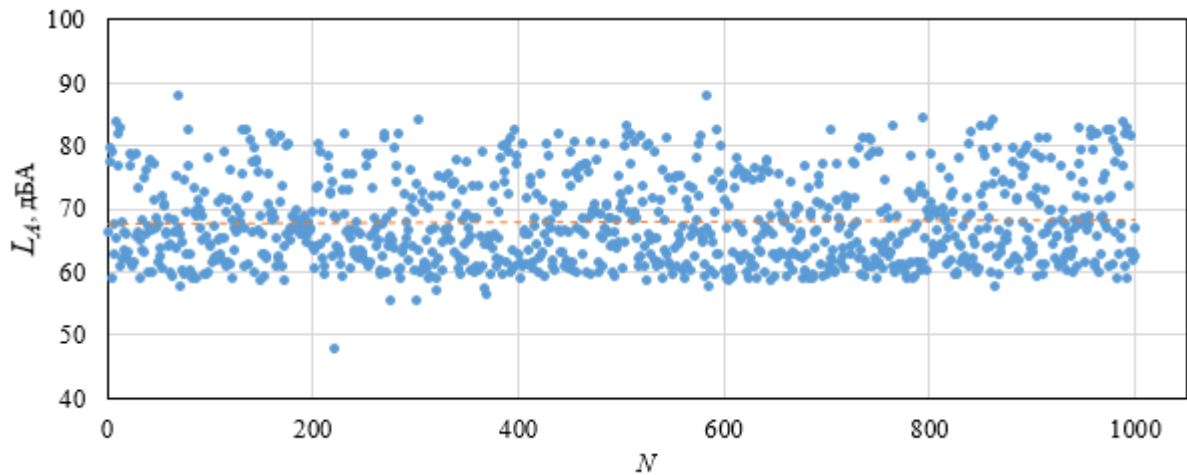
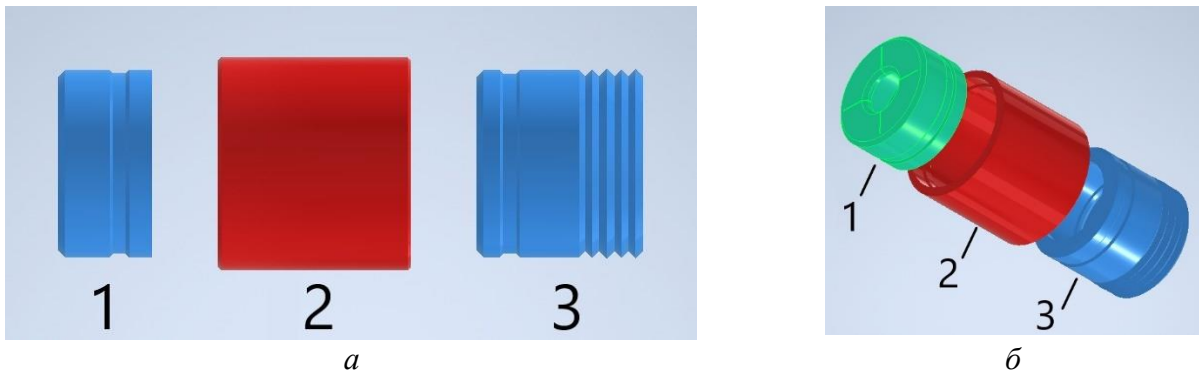


Рисунок 4.31 – Оценка повторяемости уровня шума на расстоянии 30 см от газоразрядного излучателя при проведении цикла из 1000 разрядов

Полученные значения уровня шума были измерены в диапазоне частот от 31,5 до 8000 Гц. Для оценки уровня шума в избирательных поддиапазонах частот вносят весовые коэффициенты, в соответствии с руководством по эксплуатации шумомера АТЕ-9015 (Актаком). Анализ распределения уровня шума от газоразрядного излучателя показал, что преимущественное значение уровня измеренного шума относится к диапазону от 60 до 70 дБ, что соответствует характеристике «шумно» по шкале шумов.

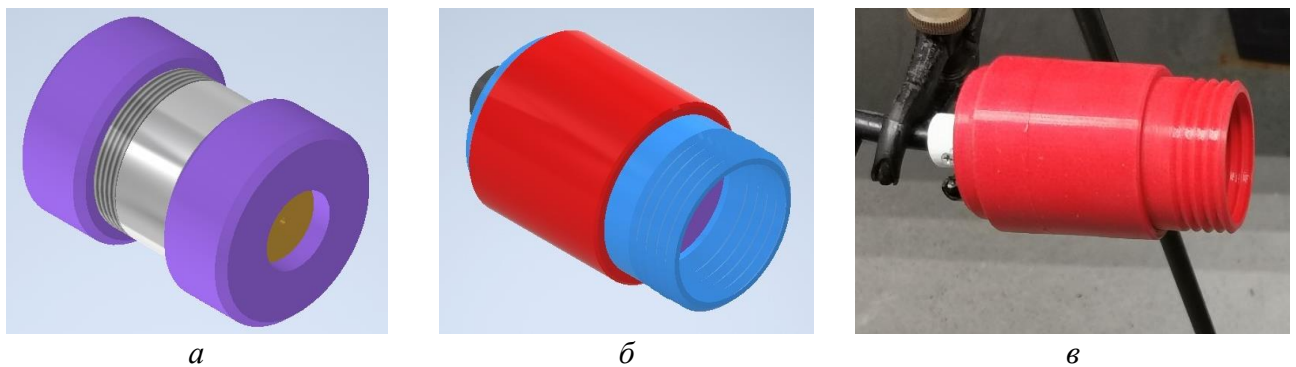
С целью уменьшения уровня акустического шума предложено демпфирование корпуса излучателя. Гофрированная система подвода акустического сигнала потенциально может обеспечить вывод акустической волны к объекту исследования, при этом уменьшить амплитуду акустической мощности, излучаемой в радиальном направлении, т. е. в помещении. Конечно-элементная модель демпфирующего кожуха и гофрированного волновода создана в программном обеспечении Autodesk Inventor и приведена на рисунке 4.32.



1 – накидной фланец, 2 – демпфер корпуса, 3 – гофрированный волновод
a – вид сбоку, *б* – изометрическая проекция

Рисунок 4.32 – Конечно-элементная модель демпфирующего кожуха электроискрового излучателя

Все элементы кожуха изготовлены методом 3D печати (FFD печать, наплавление волокон) на принтере «Flyingbear ghost 5» с использованием термопластичного полиуретана – филамента FdPlas TPU, отличающегося повышенной эластичностью (flex). На рисунке 4.33 приведены конечно-элементная модель излучателя (рисунок 4.33, *a*), сборка демпфирующего кожуха (рисунок 4.33, *б*) и фотография (рисунок 4.33, *в*) электроискрового излучателя в сборке с демпфирующим кожухом.



a – сборочный чертеж корпуса излучателя, *б* – сборочный чертеж корпуса излучателя в демпфирующем кожухе, *в* – фотография излучателя

Рисунок 4.33 – Конечно-элементная модель газоразрядного излучателя и его фотография

После сборки были проведены испытание и измерение уровня шума по вышеописанной методике. Результаты измерения уровня шума при

использовании демпфирующего кожуха показали, что демпфирование корпуса излучателя совместно с обеспечением звукоизоляции внешней среды путем подведения гофрированного вывода позволяет снизить уровень шума от газоразрядного излучателя в воздухе на 30 %.

С целью уменьшения влияния шумов предложено демпфирование корпуса излучателя путем изготовления прорезиненного кожуха и гофрированной системы подвода акустического сигнала, что позволило снизить уровень шума от газоразрядного излучателя в воздухе на 30 %.

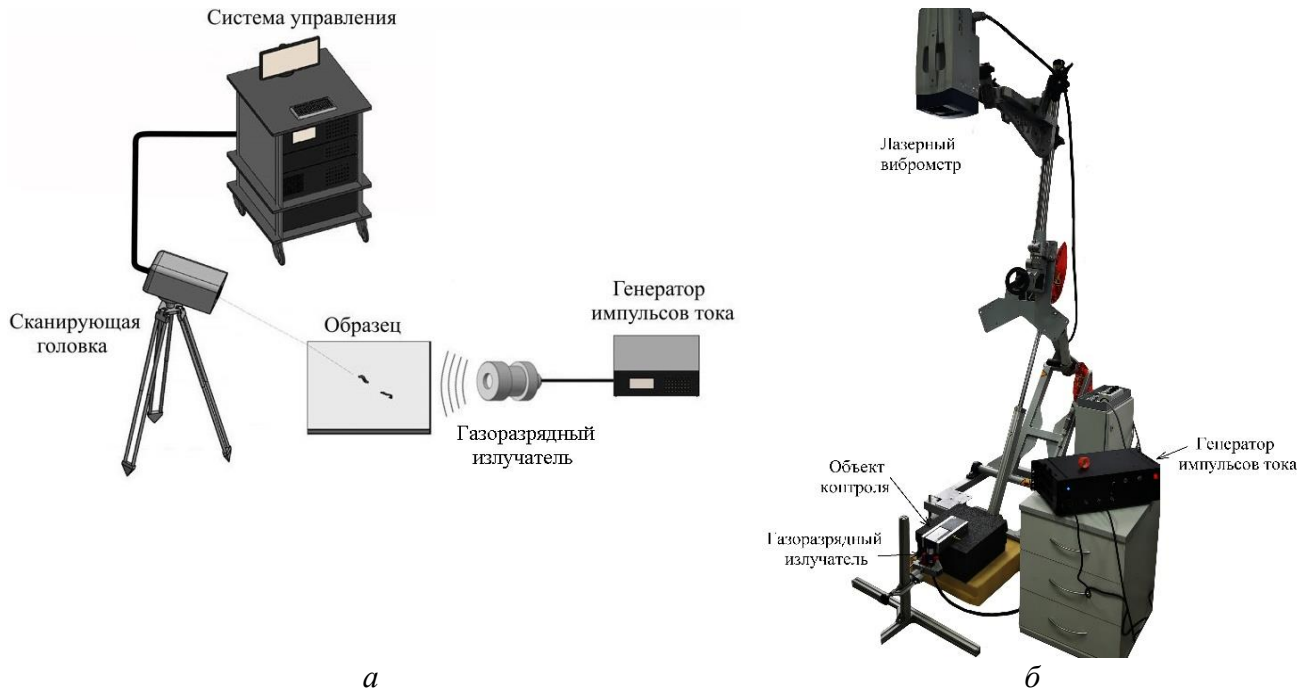
4.3. Неразрушающий лазерно-виброметрический контроль композиционных и полимерных материалов бесконтактным способом с использованием газоразрядного излучателя

4.3.1. Диагностика слабых ударных повреждений энергией до 15 Дж в углепластиковых композитах различной толщины (от 1 до 5 мм)

Лазерная доплеровская виброметрия находит все большее применение в неразрушающем контроле (НК) полимерных композиционных материалов (ПКМ) ввиду высокой точности измерения вибраций на поверхности исследуемых объектов. Использование воздушно-связанных систем для возбуждения акустических колебаний в исследуемых материалах позволяет осуществлять процедуру контроля качества бесконтактным способом. Это расширяет возможности диагностики композитов, упрощает процедуру контроля качества и минимизирует внешние воздействия на контролируемые объекты по сравнению с традиционными акустическими методами НК на основе контактных излучателей.

В рамках данного раздела исследований изучены особенности НК композитов бесконтактным способом с применением сканирующей лазерной виброметрии и газоразрядного излучателя.

Схема лабораторной установки для проведения НК композиционных материалов на основе лазерной доплеровской виброметрии с использованием воздушно-связанного газоразрядного излучателя приведена на рисунке 4.34.



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

Рисунок 4.34 – Структурная схема и изображение лабораторной установки для проведения неразрушающего контроля композиционных материалов методом лазерной виброметрии с воздушно-связанной системой возбуждения акустических колебаний на основе газоразрядного излучателя

Лабораторная установка включает в себя сканирующую лазерную головку и систему управления доплеровского виброметра PSV-500-3D-HV (Polytec), а также систему генерации акустических колебаний, состоящую из генератора импульсов тока, передающей линии и газоразрядного излучателя. Результатами лазерного вибросканирования являются амплитудно-частотный спектр вибраций в каждой точке исследуемой поверхности и виброграммы, отражающие распределение амплитуды виброперемещения или виброскорости на поверхности излучателей и контролируемого изделия. Анализ амплитудно-частотного спектра вибраций позволяет обнаружить 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.

Выполнен контроль ударного повреждения в углепластиковом композиционном материале при изменении расстояния между газоразрядным излучателем и торцевой поверхностью композита. Исследуемая пластина углепластика размером $100 \times 75 \times 1,1$ мм³ включала ударное повреждение энергией 15 Дж в центре, как показано на рисунке 4.35. Такое повреждение считается низкоэнергетическим и относится к классу слабо видимых ударных повреждений (DVIIID-Barely Visible Impact Damage). Расстояние между мембраной излучателя и торцевой поверхностью контролируемого образца варьировало от 10 до 50 мм. Физические свойства углепластикового композита: плотность $1560 \text{ кг} \times \text{м}^{-3}$, скорость звука $1133 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$ [191]. Углепластиковый композит изготовлен методом вакуумной диффузии в соответствии со следующей конфигурацией $[90/0/-90]_s$, объемная доля углеродного волокна составляла 0,60. Размер области ударного повреждения был определен с использованием теплового неразрушающего контроля и составил $7,1 \times 18,2$ мм².

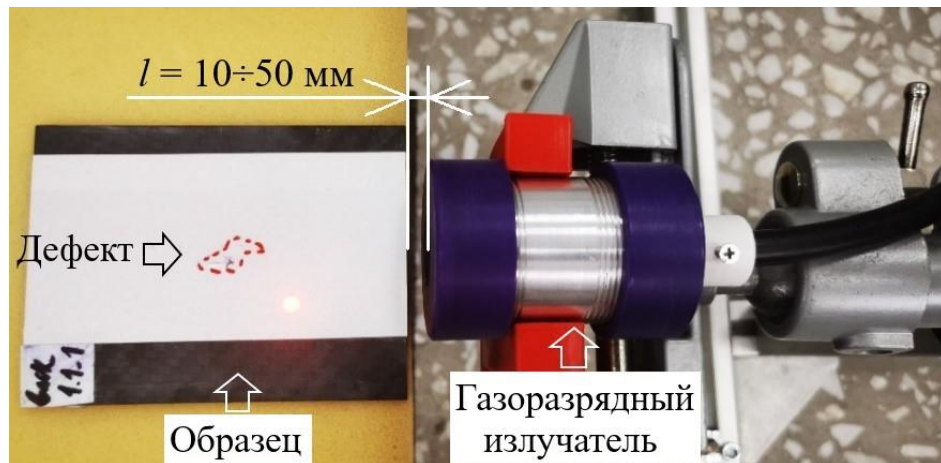


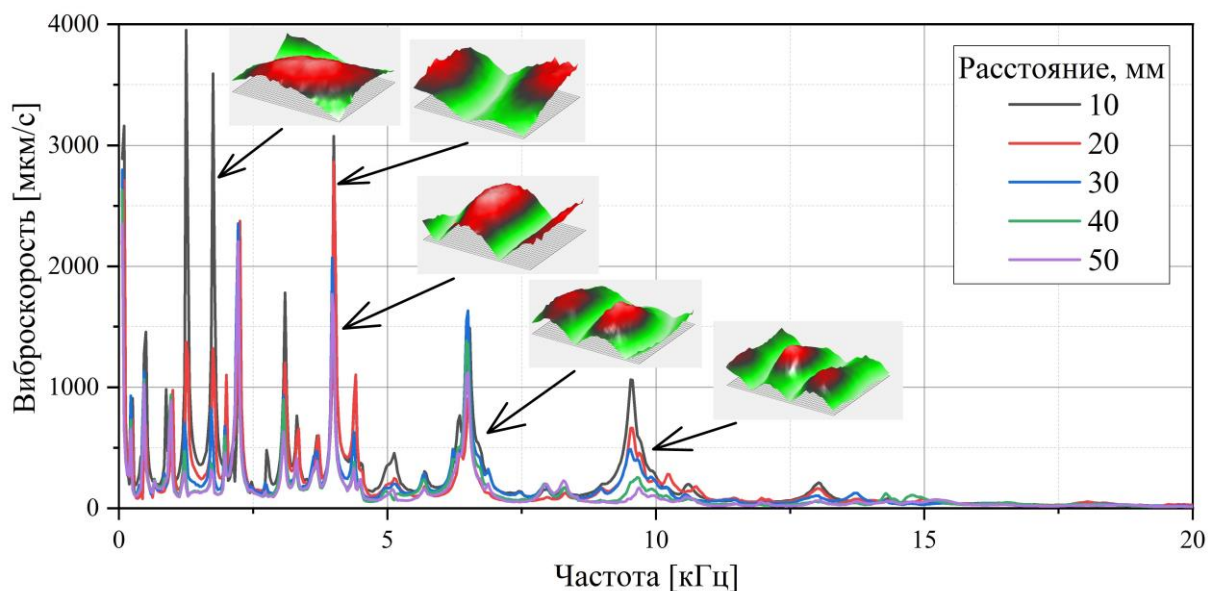
Рисунок 4.35 – Акустическая стимуляция углепластикового композита с ударным повреждением 15 Дж с использованием газоразрядного излучателя

В процессе проведения лазерной виброметрии в режиме быстрого преобразования Фурье зарегистрированы спектры колебаний на поверхности образца в каждой точке сканирования. В диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц

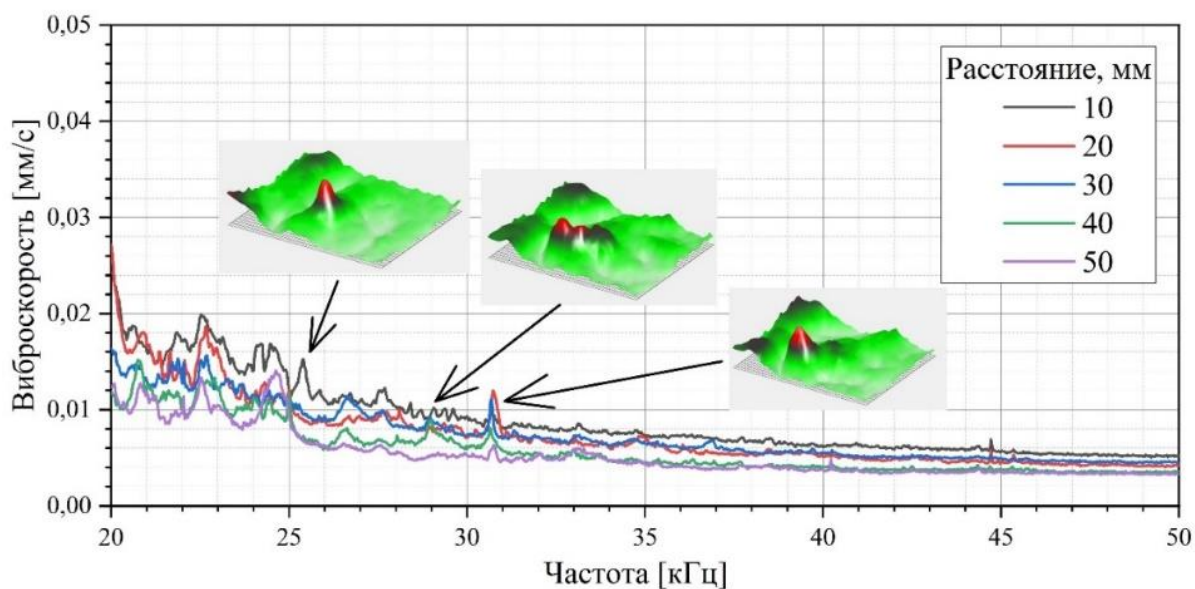
определено 3200 спектральных линий с шагом 31,25 Гц. Область сканирования составила $43,2 \times 32,2$ мм², шаг сетки сканирования 1 мм, общее время сканирования около 20 минут для вышеупомянутого разрешения по частоте. Следует отметить, что увеличение частоты импульсов разряда приведет к снижению продолжительности эксперимента, однако при этом следует тщательно контролировать температуру эмиттера.

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. Стоит 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 4.36 представлен спектр колебаний углепластиковой пластины в диапазоне от 50 Гц до 50 кГц (рисунок 4.36, а), а также масштабированный диапазон частот от 50 Гц до 20 кГц (рисунок 4.36, б). Полученные амплитудно-частотные спектры показывают распределение колебаний на поверхности композита при изменении расстояния между композитом и мембраной газоразрядного излучателя. Экспериментально оценивали амплитуду скорости резонансных колебаний (v_{max}) и минимальные значения колебаний пластины (v_{min}) на соответствующих частотах, а также определяли средние значения колебаний композита (v_{mean}) во всем измеренном диапазоне частот.

На рисунке 4.36 видно наличие в спектре характерных резонансных пиков, обусловленных как собственными резонансными частотами образца углепластика (рисунок 4.36, а), так и некоторыми локальными резонансами, возникающими в зоне ударного повреждения (рисунок 4.36, б). В частности, на рисунке 4.36, б приведены виброграммы, отображающие собственные частоты углепластиковой пластины в диапазоне 2,25–13 кГц, в то время как резонансные колебания в отдельных областях ударного повреждения зарегистрированы в диапазоне частот от 23,9 кГц до 30 кГц (рисунок 4.36, б).



а

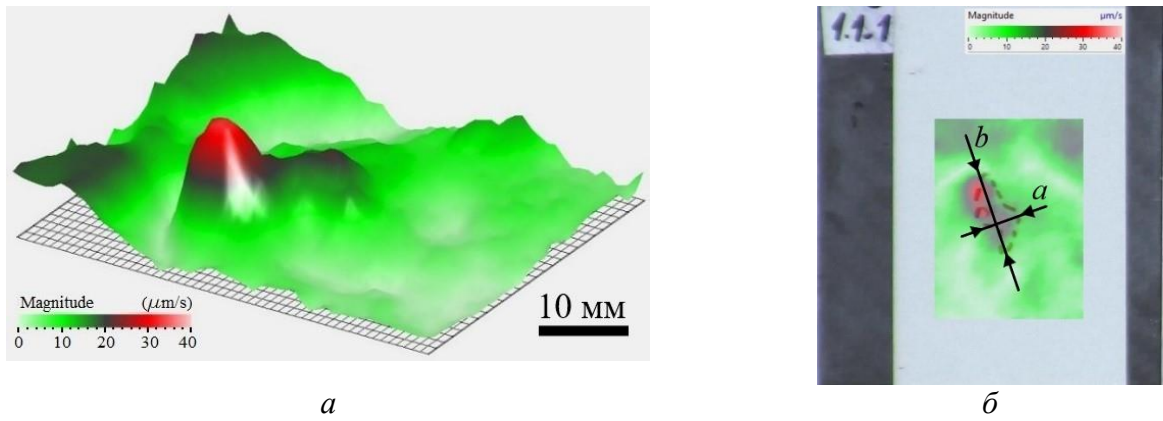


б

Диапазон частот: а – 50Гц÷20кГц, б – 20кГц÷50кГц

Рисунок 4.36 – Амплитудно-частотные спектры колебаний углепластика, расстояние излучатель–образец от 10 до 50 мм

По результатам усреднения данных, измеренных в широком диапазоне частот (от 50 Гц до 50кГц), получена результирующая виброграмма колебаний исследуемого образца (рисунок 4.37, а). На основании анализа результирующей виброграммы были определены латеральные размеры ударного повреждения ($a \times b$), как показано на рисунке 4.37, б. Результаты дефектометрии приведены в таблице 4.4.



a – виброграмма в трехмерном представлении, *б* – виброграмма в двухмерном представлении
 Рисунок 4.37 – 2D и 3D виброграммы ударного повреждения в углепластиковом композите, полученные при усреднении амплитуды колебаний в диапазоне от 50 Гц до 50 кГц

Таблица 4.4 – Вибрационные характеристики колебаний углепластикового композита с ударным повреждением при изменении расстояния от излучателя до торца 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

Зная скорость звука в углепластике ($c = 1133$ м/с), плотность материала ($\rho = 1560$ кг/м²) [191] 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: $P_{ac} = \rho \times v_{mean} \times c \times S$ [244]. Описанный подход использован для оценки акустической мощности, вводимой в контролируемый углепластиковый композит при изменении расстояния между мембраной газоразрядного излучателя и торцевой поверхностью углепластика от 10 до 50 мм. Полученные данные приведены в таблице 4.4.

Из результатов, приведенных в таблице 4.4 и на рисунке 4.37, 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. Это приводит к уменьшению вводимой акустической мощности от 0,75 мкВт до 0,2 мкВт ввиду затухания акустических волн в воздухе. Результаты оценки латеральных размеров дефектов показали снижение измеренного размера дефекта, что ухудшало эффективность НК в целом.

В целом полученные результаты продемонстрировали приемлемую эффективность использования газоразрядных излучателей для акустической стимуляции композитов, содержащих дефекты в виде ударных повреждений, в диапазоне частот 0,05–100 кГц, даже при акустической мощности порядка $0,2 \div 0,75$ мкВт.

Для оценки эффективности передачи акустического сигнала от газоразрядного излучателя в композиционные материалы различной толщины (h) по аналогичной методике проведено исследование набора образцов полимерных композитов толщиной от 1,1 до 5 мм. Результаты лазерного вибросканирования приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Амплитудно-частотные характеристики вибраций на поверхности пластин из углепластиковых композитов различной толщины размерами 100×75 мм²

h , мм	f_{min} , кГц	v_{min} , мм/с	f_{max} , кГц	v_{max} , мм/с	v_{mean} , мм/с	$P_{ак}$, мкВт
1,1	49,2	0,005	1,25	3,95	0,101	0,75
2	49,1	0,004	4	2,78	0,065	0,31
3	21,7	0,003	4	2,74	0,056	0,25
4,5	47,9	0,003	1,1	1,78	0,028	0,06
5	47,7	0,002	2,2	1,61	0,023	0,04

Из полученных данных следует, что при контроле качества углепластиковых композитов по мере увеличения толщины материала наблюдается снижение амплитудных значений вибрационного сигнала на поверхности изделия. Это также сопровождается снижением уровня акустической мощности, передаваемой от газоразрядного излучателя в контролируемый объект. В связи с этим, при проведении бесконтактного неразрушающего контроля необходимо

оптимизировать параметры акустической стимуляции, а также условия проведения процедуры контроля качества. При проведении неразрушающих испытаний композиционных материалов толщиной более 5 мм целесообразно проводить акустическую стимуляцию с использованием контактных излучателей ввиду существенного снижения уровня вводимой акустической мощности бесконтактным способом.

4.3.2. Исследование влияния угла наклона излучателя к контролируемой поверхности на эффективность ввода акустической энергии

Бесконтактная акустическая стимуляция основана на преобразовании падающей волны в продольную волну, распространяющуюся в объеме материала и взаимодействующую со структурными неоднородностями. Наклонный способ передачи акустических волн заключается в преобразовании падающих волн в пластинчатые акустические волны («волны Лэмба») в тонких пластинах, которые являются чувствительными к наличию подповерхностных дефектов (трещинам и расслоениям композитов и др.), либо в поверхностные волны Рэлея, распространяющиеся в тонком поверхностном слое (примерно одна длина волны) твердых тел [250]. В данном случае амплитуда возбуждаемых волн существенно зависит от угла падения возбуждающей волны. В связи с этим, оптимизация угла падения увеличивает сигнал–шум при проведении неразрушающих испытаний.

Нами исследовано влияние угла наклона излучателя к поверхности контролируемого материала на эффективность ввода акустической энергии при использовании газоразрядного излучателя. Использован закон Снеллиуса, который гласит, что отношение синуса угла между нормалью к поверхности раздела сред и направлением волны к скорости соответствующей волны является постоянной величиной. Таким образом, в случае возбуждения направленной акустической волны (в условиях данных экспериментов – волны Лэмба) можно определить резонансный угол падения (θ_0), при котором будет наблюдаться совпадение волновых фронтов воздействующей и возбуждаемой (направленной) в объекте

контроля волн, оценив отношение скоростей их распространения следующим образом: $\sin\theta_0 = \frac{v_{\text{возд.}}}{v_{\text{направл.}}}$. Схема лабораторной установки, отражающей процедуру направленной резонансной бесконтактной стимуляции, приведена на рисунке 4.38.

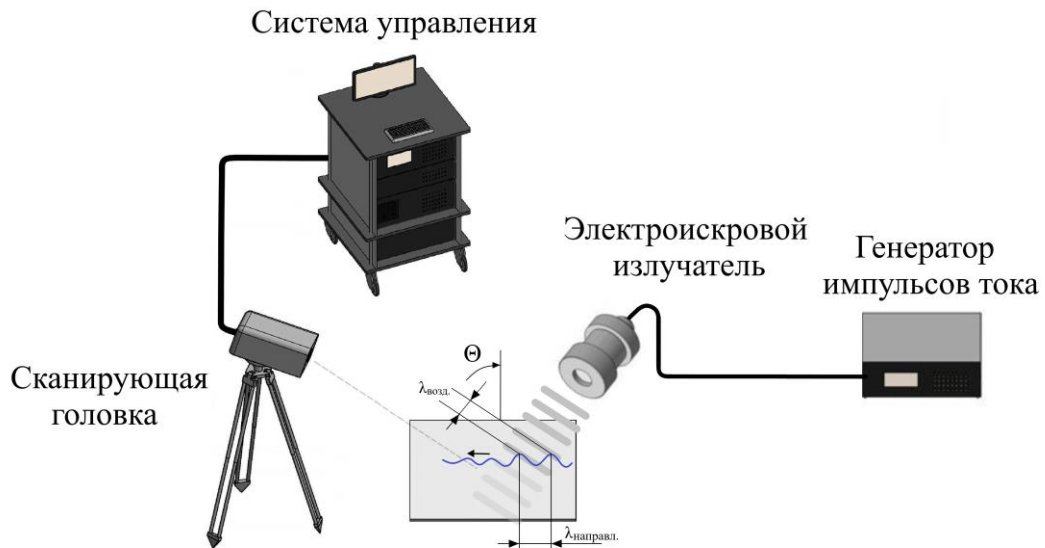


Рисунок 4.38 – Структурная схема лабораторной установки для исследования угла влияния наклона газоразрядного излучателя к поверхности тестируемого изделия при проведении лазерной виброметрии

Эффективность преобразования падающей волны в поперечные объемные волны в углепластиковом композите оценивали путем измерения среднего значения амплитуды скорости колебаний частиц среды на поверхности пластины, измеренной в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц, при изменении угла наклона излучателя к контролируемой поверхности от 0 до 90°, где угол ввода 0° соответствует перпендикулярному расположению излучателя относительно поверхности пластины. Расстояние от мембраны излучателя до поверхности пластины составило 50 мм.

Полученные данные (рисунок 4.39) показали, что наклонный режим передачи акустического сигнала позволяет повысить эффективность преобразования падающей волны в поперечные объемные волны, обеспечивая максимальную амплитуду прошедшей волны. В частности, в диапазоне от 58° до 80° амплитуда виброскорости была не менее 8 мкм/с. Максимальное значение

амплитуды виброскорости было 10,3 мкм/с при резонансном угле падения (θ_0) 70° , что в свою очередь примерно в три раза выше амплитуды колебаний, измеренной при нормальном способе ввода ультразвука ($v = 3,57$ мкм/с при $\theta_0 = 0^\circ$), и более чем в два раза выше амплитуды колебаний, измеренной при торцевом способе ввода акустического сигнала ультразвука ($v = 5,02$ мкм/с при $\theta_0 = 90^\circ$).

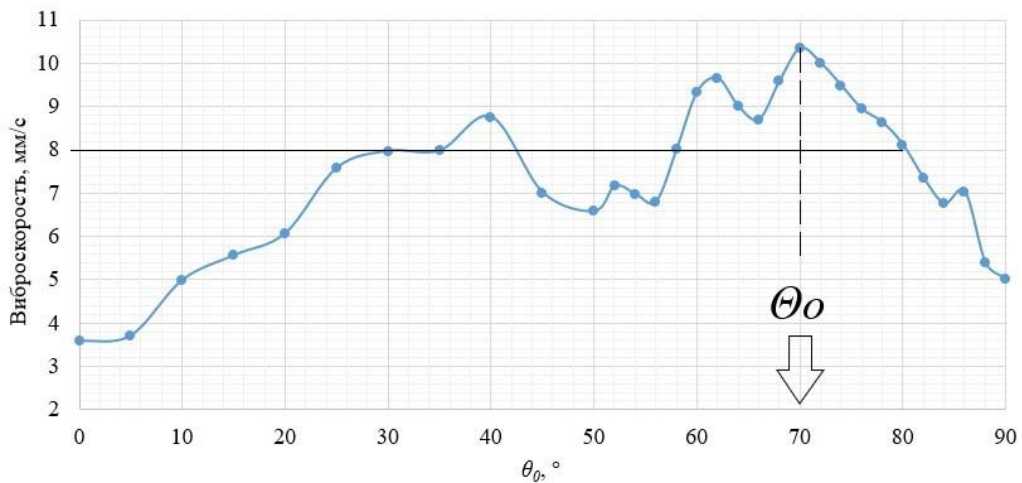


Рисунок 4.39 – Зависимость среднего значения амплитуды виброскорости на поверхности стеклопластикового композита от угла падения акустических волн

Из полученных данных следует, что регулировка угла наклона излучателя к поверхности позволяет повысить эффективность преобразования падающей волны в поперечные объемные волны за счет вклада пространственного резонанса примерно в три раза по сравнению с нормальным способом ввода ультразвука и более чем в два раза по сравнению с торцевым способом ввода акустического сигнала.

Для проверки полученных результатов был проведен анализ эффективности обнаружения дефекта в гомогенном материале на примере контроля несквозного отверстия прямоугольной формы $30 \times 7 \times 1$ мм³ в пластине полиметилметакрилата (оргстекло) размерами $150 \times 150 \times 6$ мм³. Как известно из [251], наличие неоднородностей в структуре материала вызывает локальное снижение жесткости изделия. В связи с этим, в области дефекта наблюдается локальное увеличение амплитуды колебаний (v_{def}) по сравнению с амплитудой колебаний в бездефектной

зоне (v_{nd}), что свидетельствует о возникновении резонансных явлений в указанной зоне.

На рисунке 4.40 показана зависимость коэффициента усиления колебаний в области дефекта ($k = v_{def}/v_{nd}$) от расстояния между излучателем и исследуемой пластиной.

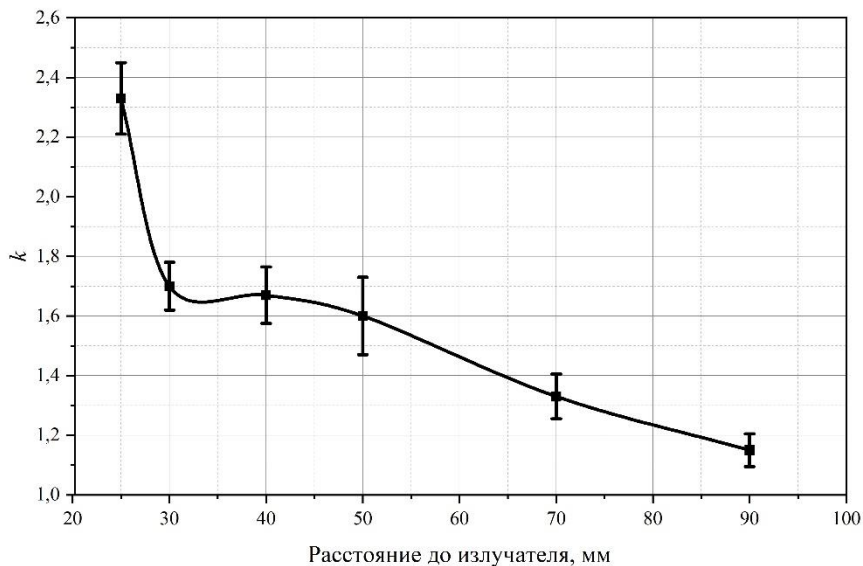
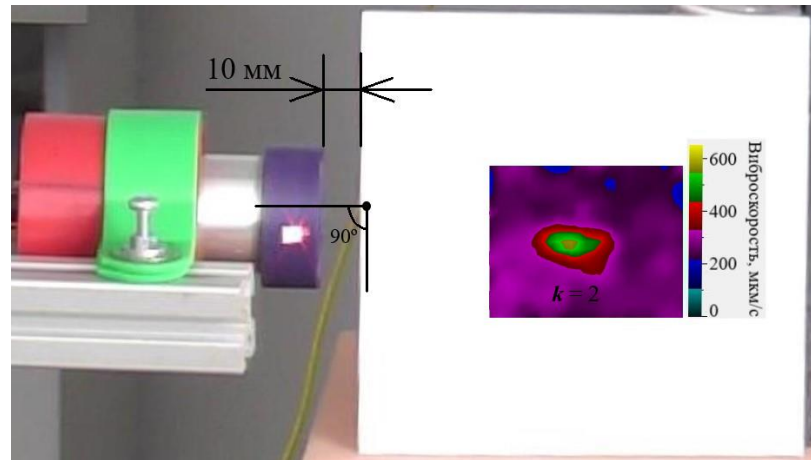


Рисунок 4.40 – Изменение амплитуды скорости колебаний дефекта от расстояния между излучателем и исследуемой пластиной

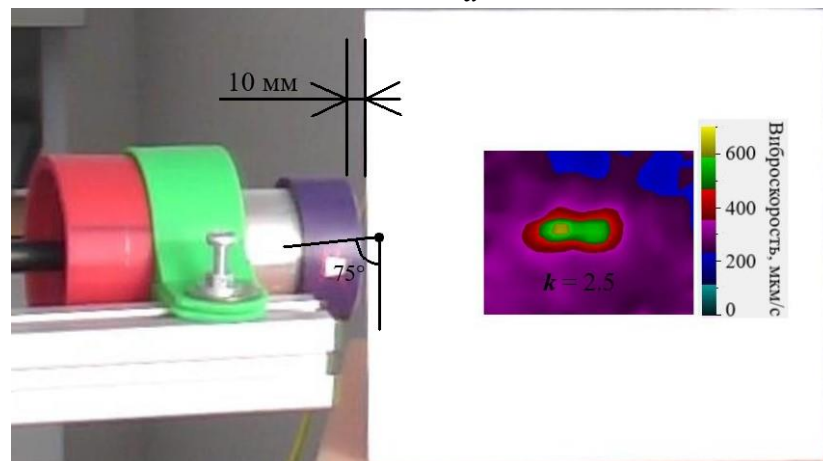
Из графика на рисунке 4.40 следует, что для достижения максимально эффективного режима акустической стимуляции материалов следует размещать излучатель максимально близко к поверхности исследуемого материала. С увеличением расстояния между излучателем и объектом контроля коэффициент усиления колебаний в области дефекта снижается ввиду затухания акустического сигнала в воздушной среде.

Согласно полученным данным (рисунок 4.41), максимальное усиление вибраций в области дефекта по отношению к бездефектной зоне наблюдается при резонансном угле наклона излучателя к контролируемой поверхности (рисунок 4.39) и минимальном расстоянии между излучателем и исследуемой пластиной. В частности, наклонный режим передачи акустического сигнала позволяет повысить эффективность преобразования падающей волны

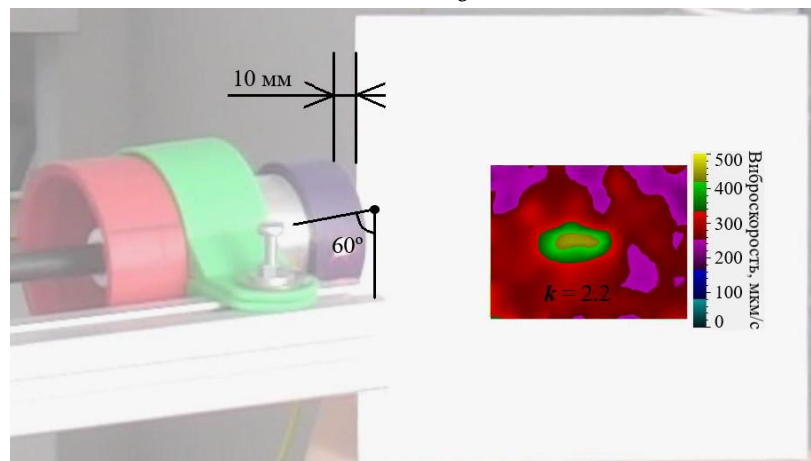
в поперечные объемные волны за счет вклада пространственного резонанса, обеспечивая максимальную амплитуду прошедшей волны.



a



б



в

Угол ввода акустического сигнала: *a* – 90°, *б* – 75°, *в* – 60°

Рисунок 4.41 – Виброграммы, иллюстрирующие зависимость средней величины амплитуды колебаний оргстекла с несквозным отверстием в диапазоне частот от 50 Гц до 50 кГц от угла ввода акустического сигнала

4.3.3. Контроль качества тонких, хрупких и гидрофильных композитов

Одним из важных преимуществ бесконтактных акустических излучателей является возможность проведения неразрушающих испытаний тонких, хрупких и гидрофильных материалов. Были испытаны тонкие сотовые панели, изготовленные путем комбинирования ячеистых структур со стеклопластиковой обшивкой. Для указанных материалов типовыми дефектами являются отслоения обшивки от сотовых ячеек. Был изготовлен образец сотовой панели размерами $100 \times 100 \times 10$ мм³ (толщина стеклопластиковой обшивки 0,5 мм), показанный на рисунке 4.42.



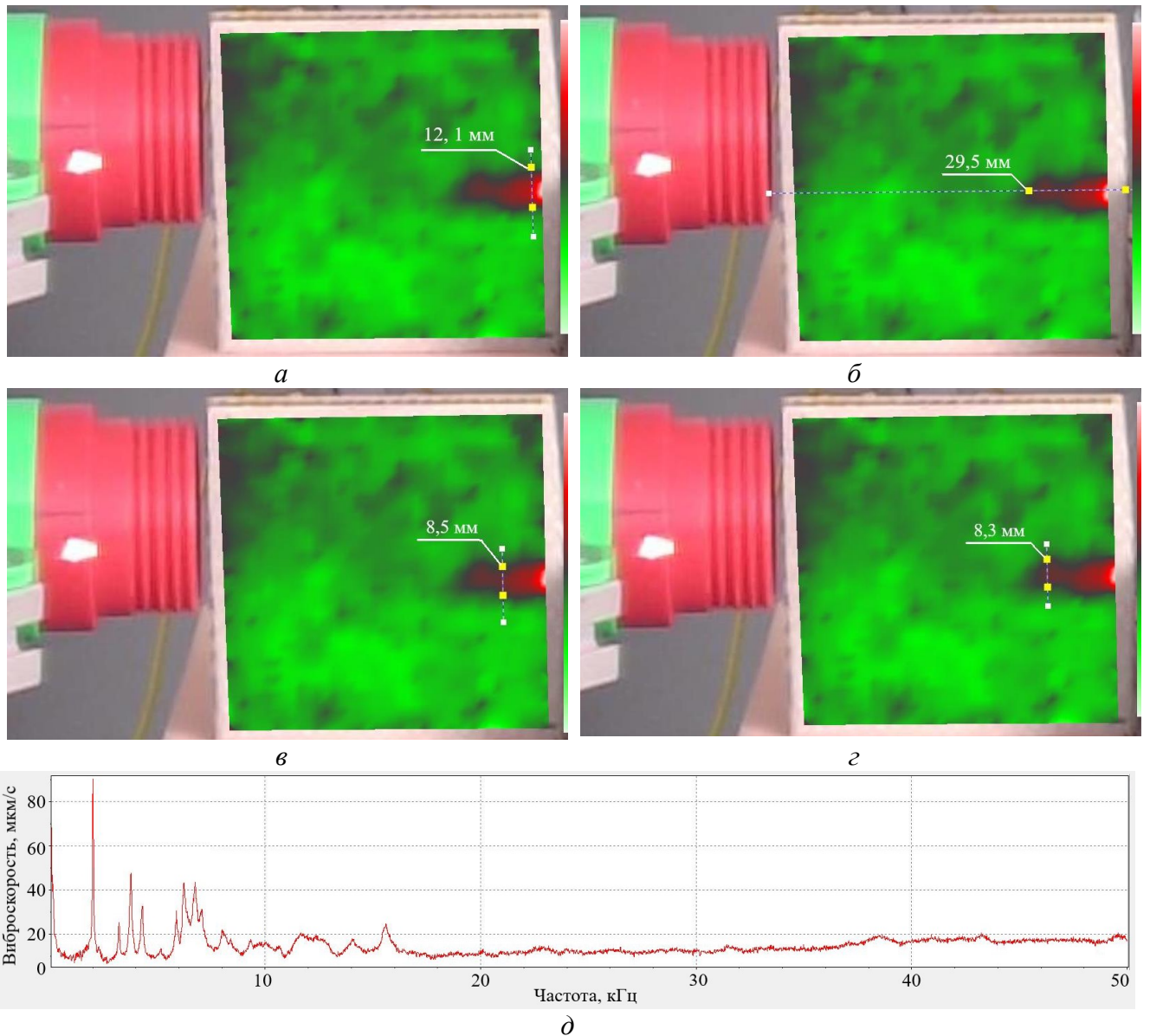
a – диметрическая проекция, *б* – вид сверху

Рисунок 4.42 – Сотовая панель размерами $100 \times 100 \times 10$ мм³ со стеклопластиковой обшивкой толщиной 0,5 мм

В процессе бесконтактной акустической стимуляции проводили лазерное вибросканирование поверхности контролируемой панели. Область сканирования включала 60×50 точек общей площадью 95×95 мм² с шагом сканирования 1,5 мм. Измерение вибраций проводили в диапазоне частот от 50 Гц до 50 кГц в режиме быстрого преобразования Фурье. Частота дискретизации составляла 31,25 Гц. Результаты лазерной виброметрии приведены на рисунке 4.43.

Лазерное вибросканирование стеклопластиковой сотовой панели продемонстрировало наличие центральной неоднородности с поперечными размерами $29,5 \times 12,1$ мм² (рисунок 4.43). В данной зоне коэффициент усиления виброскорости возрастал приблизительно в 3 раза по сравнению с бездефектной

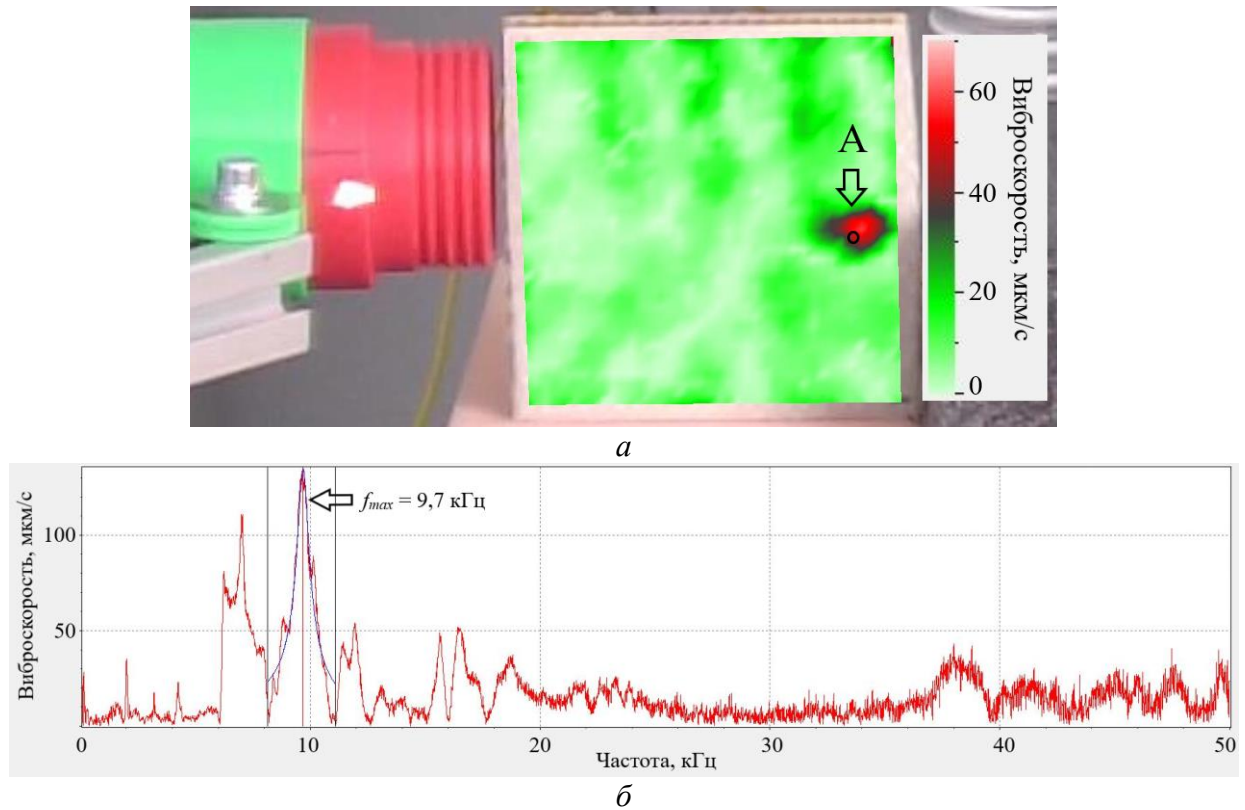
зоной. Из анализа амплитудно-частотного спектра колебаний пластины определены собственные частоты колебаний композита, отличающиеся характерными резонансными пиками (рисунок 4.43, *д*).



a–г – виброграммы сотовой панели, *д* – амплитудно-частотный спектр колебаний сотовой панели
 Рисунок 4.43 – Виброграммы и амплитудно-частотный спектр колебаний сотовой панели из стеклопластика при усреднении амплитуды колебаний в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц (определение поперечных размеров отслоения)

Для более детального анализа резонансных колебаний дефекта проведен анализ отдельных участков расслоения, представленных соответствующими амплитудно-частотными характеристиками. На рисунке 4.44, *a–б* показан пример

амплитудно-частотного спектра колебаний стеклопластиковой панели в точке А (рисунок 4.44, б), а также виброграммы, отражающей резонансные колебания в области отслоения обшивки стеклопластиковой панели в диапазоне частот от 8,2 кГц до 11,1 кГц.



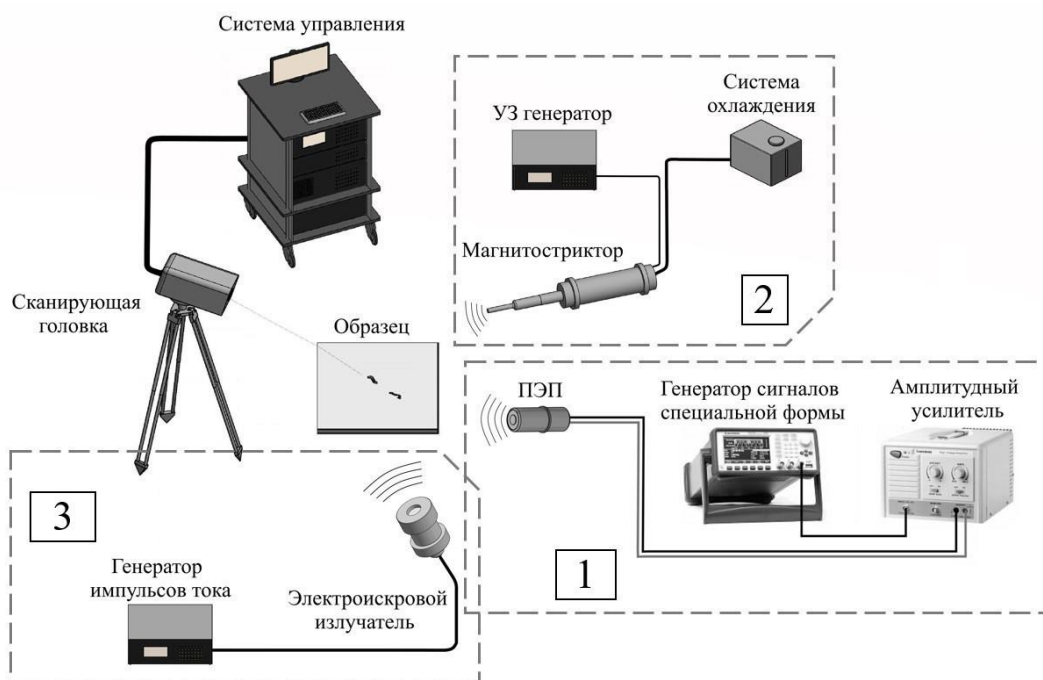
а – виброграмма на частоте 9,7 кГц, б – амплитудно-частотный спектр колебаний
 Рисунок 4.44 – Усредненная виброграмма и амплитудно-частотный спектр колебаний выбранной точки сканирования А в области отслоения стеклопластиковой обшивки сот в диапазоне частот от 8,2 до 11,1 кГц

Получено, что к основной частотной области резонанса дефекта следует отнести диапазон от 8,2 до 11,1 кГц, который также характеризуется коэффициентом демпфирования 0,026 и добротностью 19,44 (рисунок 4.44). В указанном диапазоне также можно выделить частоту локального резонанса дефекта $f_{max} = 9,7$ кГц, на которой амплитуда колебаний в области отслоения была максимальной и составила $v = 133,4$ мкм/с. Измеренное значение виброскорости более чем в 6 раз превосходит среднюю величину амплитуды виброскорости (20 мкм/сек), что свидетельствует о наличии локального резонанса в области

дефекта. Несмотря на отсутствие резонансного пика на усредненном спектре колебаний пластины (рисунок 4.43) в указанном диапазоне частот, вклад резонанса дефекта (определенный по спектру на рисунке 4.44) для локальной области проявляется в виде областей с повышенной амплитудой сигнала колебаний на усредненной виброграмме колебаний пластины (рисунок 4.43, *a–z*), что позволяет локализовать структурные неоднородности. Следует отметить, что область дефекта имеет удлиненную форму, а его отдельные участки участвуют в резонансных колебаниях на различных частотах. Наличие мультисоставного резонансного отклика в области отслоения связано как со слоистой структурой обшивки панели, так и с наличием наполнителя в виде ячеек. В связи с этим, проведение спектрального анализа колебаний многослойных композитов в широком диапазоне частот имеет важное значение для повышения достоверности результатов исследований.

4.4. Сравнительный анализ результатов акустической стимуляции композитов с использованием воздушно-связанных преобразователей

Независимо от типа системы возбуждения, лазерно-виброметрический неразрушающий контроль заключается в регистрации и дальнейшем анализе вибраций на поверхности исследуемого материала, возникающих в процессе акустической стимуляции. Использование воздушно-связанных систем для возбуждения акустических колебаний при лазерной виброметрии позволяет осуществлять процедуру контроля качества бесконтактным способом, исключая вероятность повреждения материала в месте ввода акустического сигнала и минимизировать внешние воздействия на контролируемые объекты по сравнению с контактными излучателями. На рисунке 4.45 приведена схема лабораторной установки для проведения неразрушающего контроля композиционных материалов на основе лазерной доплеровской виброметрии с использованием различных воздушно-связанных ультразвуковых преобразователей.



1 – установка с пьезоэлектрическим преобразователем, 2 – установка с магнитострикционным излучателем, 3 – установка с газоразрядным излучателем

Рисунок 4.45 – Лабораторная установка для неразрушающего контроля композиционных материалов методом лазерной виброметрии с тремя типами воздушно-связанных излучателей акустических колебаний

Лабораторная установка включает в себя сканирующую лазерную головку и систему управления доплеровского виброметра PSV-500-3D-NV (Polytec). Результатами сканирования являются амплитудно-частотный спектр вибраций в каждой точке исследуемой поверхности и виброграммы, отражающие распределение амплитуды виброперемещения или виброскорости на поверхности излучателей и контролируемого изделия. 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 [8, 251].

Эксперименты выполняли с различными системами бесконтактной акустической стимуляции на основе ультразвуковых излучателей и генераторов электрических сигналов специальной формы. Контроль качества полимерных композитов осуществляли путем анализа колебаний на поверхности изделий,

возникающих в результате их акустической стимуляции. Измерение вибраций проводили в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц в режиме быстрого преобразования Фурье. Количество спектральных линий составило 3200, что позволило измерить амплитудно-частотный спектр вибраций в каждой точке сканирования с шагом по частоте 31 Гц и определить резонансные частоты и формы колебаний объектов контроля. Шаг сканирования области, включавшей 150×150 точек, был равен 2 мм.

В состав Блока 1 входили воздушно-связанный пьезокерамический излучатель (Ultran ACU, США, собственная резонансная частота 110 кГц) и генератор сигналов специальной формы AWG-4163 с усилителем AWA-1810 (Актаком, Россия). В ходе эксперимента для возбуждения пьезоэлемента использовали сигнал синусоидальной формы. Амплитуда напряжения на пьезоэлементе не превышала 150 В и была ограничена тепловым режимом работы излучателя.

Блок 2, показанный на рисунке 4.45, представлял собой воздушно-связанную систему возбуждения на основе магнитострикционного преобразователя. В состав системы входили магнитостриктор (резонансная частота $22 \pm 1,65$ кГц, номинальная мощность $0,63 \pm 10\%$ кВт) с цилиндрическим ступенчатым волноводом, ультразвуковой генератор USG-2-22-MS-1 с функцией автоматической подстройки частоты (диапазон рабочих частот 14–48 кГц, выходная мощность до 2 кВт) и специализированная система охлаждения установки.

Блок 3 представляет собой оригинальную систему генерации акустических колебаний, состоящую из генератора импульсов тока, передающей линии и газоразрядного излучателя, функционирующего на основе искрового разряда в воздухе. Принцип действия системы заключается в использовании скачка давления в газоразрядном промежутке, возникающего при резком нагреве и расширении области плазмы разряда вследствие протекания импульса электрического тока. Конструктивная особенность излучателя состоит в том, что объем газоразрядного промежутка отделен от окружающей среды посредством упругой мембраны, которая, с одной стороны, является частью обратного токопровода, а с другой – выполняет функцию излучающей поверхности.

В данной работе использованы электрод из стали диаметром 1 мм и мембрана, представляющая собой алюминиевый диск диаметром 30 мм и толщиной 1 мм. Разряд возбуждали от специализированного генератора, создававшего выходное напряжение $V_0 < 12$ кВ и ток короткого замыкания на уровне 800 А при частоте следования импульсов до 4 Гц.

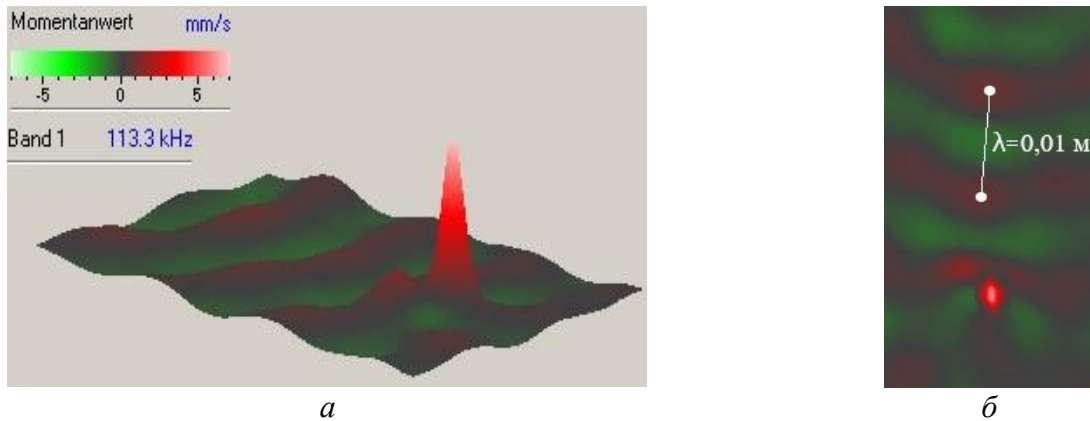
4.4.1. Лазерная виброметрия с использованием воздушно-связанного пьезоэлектрического преобразователя

На рисунке 4.46 показаны образец из полимерного углепластикового композита с ударным повреждением и воздушно-связанная система для акустической стимуляции на основе пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП), входившая в состав Блока 1 лабораторной установки (рисунок 4.45.). Для возбуждения ПЭП использован гармонический сигнал. Мощность сигнала в ходе работы регулировали путем изменения амплитуды выходного напряжения генератора. Для исследования частотных характеристик излучателя был выполнен эксперимент с варьированием частоты выходного сигнала при постоянной амплитуде выходного напряжения. В ходе работы определено амплитудное значение виброперемещения на торце излучателя, которое составило 10 мкм при входном напряжении генератора $U = 70$ В и частоте переменного тока $f = 113$ кГц.



Рисунок 4.46 – Акустическая стимуляция углепластикового композита с использованием воздушно-связанной системы на основе пьезоэлектрического преобразователя (расстояние от излучателя до дефекта 10 мм, размеры образца $270 \times 40 \times 1,2$ мм³)

В результате лазерного сканирования углепластикового композита с ударным повреждением были получены виброграммы, приведенные на рисунке 4.47.



a – виброграмма в трехмерном представлении, *б* – виброграмма в двухмерном представлении
Рисунок 4.47 – Виброграммы углепластикового композита на частоте резонанса дефекта 113,3 кГц

Приведенные виброграммы отображают вибрации на поверхности углепластикового композита, возникающие на частоте резонанса дефекта (ударного повреждения) 113,3 кГц. Амплитуда скорости вибраций в области ударного повреждения составила $V_D = 6,19$ мм/с, что более чем в 7 раз превосходит амплитуду скорости вибраций $V_0 = 0,87$ мм/с в бездефектной зоне. Длина распространяющейся в образце акустической волны составляла приблизительно $\lambda = 0,01$ м, что соответствовало скорости распространения ультразвука в композите $c = \lambda \times f = 1133$ м/с.

С учетом плотности углепластика $\rho = 1560$ кг/м³ была оценена акустическая мощность, переносимая звуковой волной через поперечную площадку ($S = 0,048 \times 10^{-3}$ м²), расположенную перпендикулярно направлению распространения звука [246]: $P_{ac} = \frac{\rho \times V_0^2 \times c \times S}{2} = 31$ мкВт. Аналогичным образом была рассчитана акустическая мощность излучателя при изменении уровня напряжения от 10 до 70 В. На основе полученных данных выявлена зависимость амплитуды виброскорости в области дефекта и в бездефектной зоне от уровня акустической мощности воздушно-связанного пьезоэлектрического преобразователя

при постоянной частоте стимулирующего сигнала (рисунок 4.48). Частота 113,3 кГц соответствовала резонансу воздушно-связанной системы, образованной излучателем, окружающей средой, исследуемым образцом и дефектом на его поверхности.

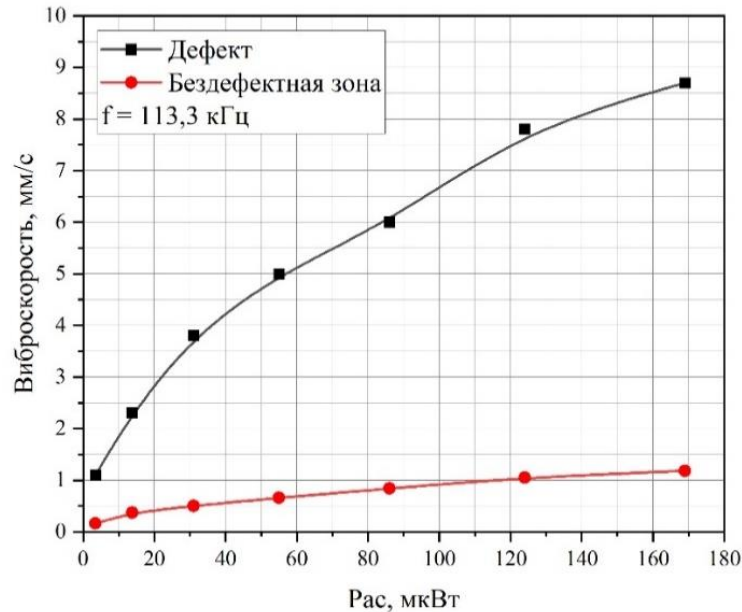


Рисунок 4.48 – Зависимость амплитуды виброскорости в области дефекта и в бездефектной зоне от уровня акустической мощности воздушно-связанного пьезоэлектрического преобразователя

Как видно из рисунка 4.48, при увеличении акустической мощности до 170 мкВт амплитуда колебаний в области ударного повреждения возрастала от 1,1 мм/с до 8,7 мм/с. В бездефектной области также наблюдалось увеличение амплитуды сигнала от 0,2 до 1,2 мм/с соответственно. Чувствительность системы диагностики характеризуют отношением V_D/V_0 , где V_D и V_0 – амплитуды виброскорости в дефектной и бездефектной областях соответственно. При изменении акустической мощности от 30 до 170 мкВт данный критерий равен $V_D/V_0 \approx 7$. Следовательно, если достигаются механические резонансы в дефектной области, то чувствительность системы позволяет надежно регистрировать резонансные пики амплитудно-частотного спектра, связанные с наличием дефекта.

Важно отметить, что отклонение частоты передаваемого в материал акустического сигнала также оказывает существенное влияние на величину V_D/V_0 (рисунок 4.49). В настоящем исследовании частоту сигнала возбуждения f

варьировали при постоянной амплитуде выходного напряжения генератора U , в результате чего была получена частотная характеристика чувствительности системы.

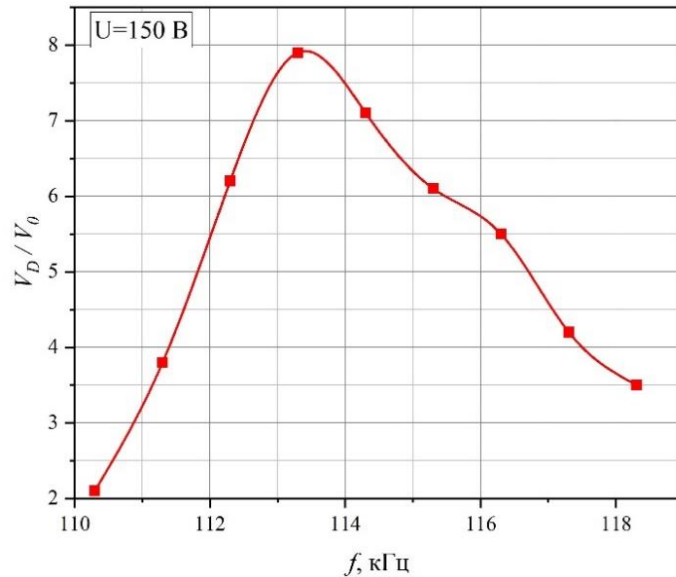


Рисунок 4.49 – Частотная характеристика чувствительности системы неразрушающего контроля в области резонансного режима работы воздушно-связанной системы пьезоэлектрического преобразователя (амплитуда напряжения на выходе генератора $U = 150$ В)

Из рисунка 4.49 видно, что при согласовании частоты стимулирующих акустических волн с частотой резонанса ударного повреждения 113,3 кГц наблюдается увеличение относительной амплитуды вибраций в области дефекта до $V_D/V_0 \approx 8$, однако при относительном отклонении частоты на уровне нескольких процентов амплитуда полезного сигнала резко падает.

Таким образом, показана возможность обнаружения дефектов при вводимой акустической мощности на уровне десятков мкВт, однако это возможно только при условии, что в области структурных неоднородностей достигаются локальные резонансы. Резонансная ультразвуковая стимуляция с использованием воздушно-связанных ПЭП позволяет обнаруживать дефекты в виде ударных повреждений в полимерных композитах, однако необходимость точного согласования частоты стимулирующих акустических волн с частотой резонанса дефекта существенно ограничивает их применение.

4.4.2. Лазерная виброметрия с использованием воздушно-связанного магнестрикционного излучателя

Недавние исследования воздушно-связанных излучателей на основе магнестрикционных ультразвуковых преобразователей продемонстрировали возможность их применения в НК, но это было достигнуто преимущественно за счет значительной мощности используемых устройств [252]. Модернизация конструкции волноводов для магнестрикционных излучателей повысила эффективность передачи акустической энергии в исследуемый образец. В частности, использование бесконтактного магнестрикционного излучателя позволило обнаружить ударное повреждение в углепластиковом композите и идентифицировать избыточное содержание клея и наличие воды в сотовых авиационных панелях [69].

В продолжение вышеупомянутых работ исследована возможность использования воздушно-связанных излучателей на основе ультразвуковых преобразователей магнестрикционного типа для обнаружения ударных повреждений в тонком углепластиковом композите. Схема эксперимента приведена на рисунке 4.45. Фотография блока 2 экспериментальной установки приведена на рисунке 4.50.



Рисунок 4.50 – Установка для неразрушающего контроля углепластикового композита с использованием воздушно-связанного магнестрикционного излучателя

Система возбуждения на основе магнестрикционного излучателя обеспечивала бесконтактную ультразвуковую стимуляцию на частоте 22 кГц, создавая области разрежения и сжатия в воздушной среде между объектом контроля и торцом излучателя. Более подробно процедура измерения вибраций в воздухе с использованием лазерного виброметра описана в работе [71]. Амплитуда виброперемещения на торце волновода составляла 30 мкм. Виброграмма, отражающая процесс распространения ультразвуковой волны в воздухе от магнестрикционного излучателя, приведена на рисунке 4.51.

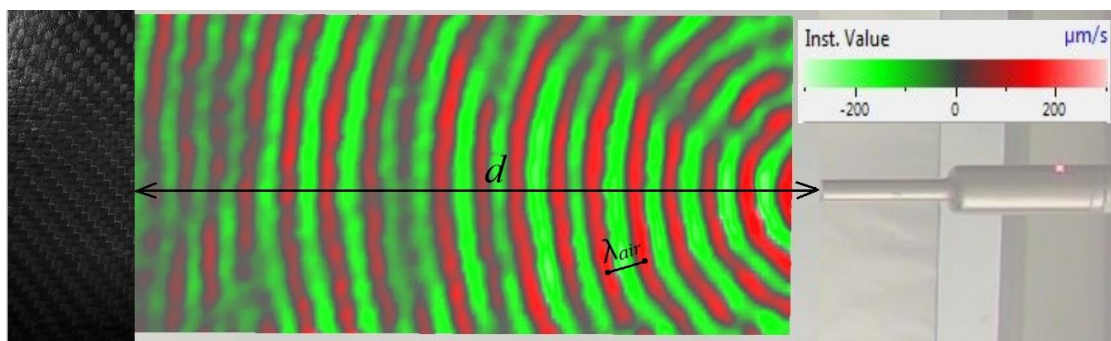


Рисунок 4.51 – Виброграмма распространения в воздухе ультразвуковой волны, генерируемой магнестрикционным преобразователем

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 ее снижению [186]. Как было отмечено в разделе 3.5, регулирование воздушного зазора (d) между излучателем и исследуемым материалом существенно влияет на эффективность передачи ультразвука. Подобные явления в принципе характерны для воздушно-связанных систем возбуждения непрерывного действия. Например, на рисунке 4.51 приведен график распределения амплитуды вибраций, возникающих в воздушной среде между торцом волновода магнестрикционного излучателя и объектом в форме пластины.

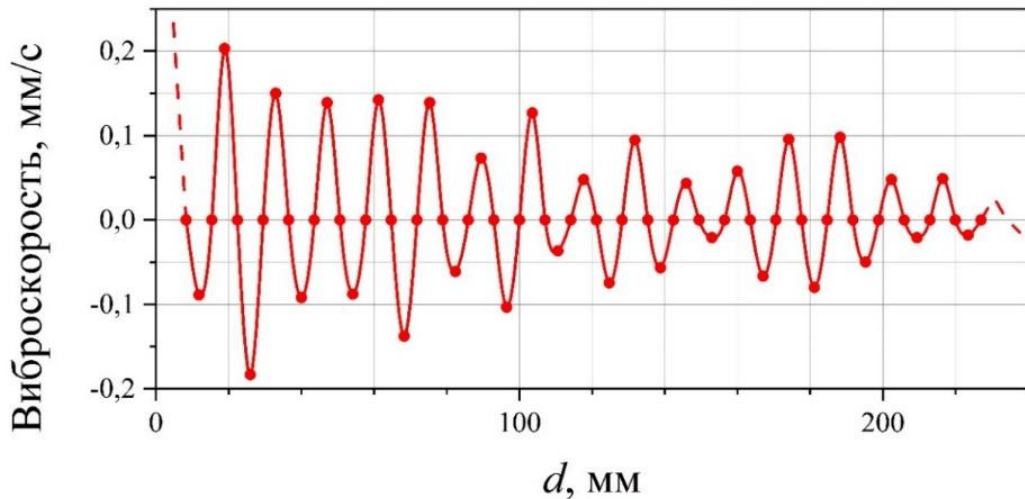
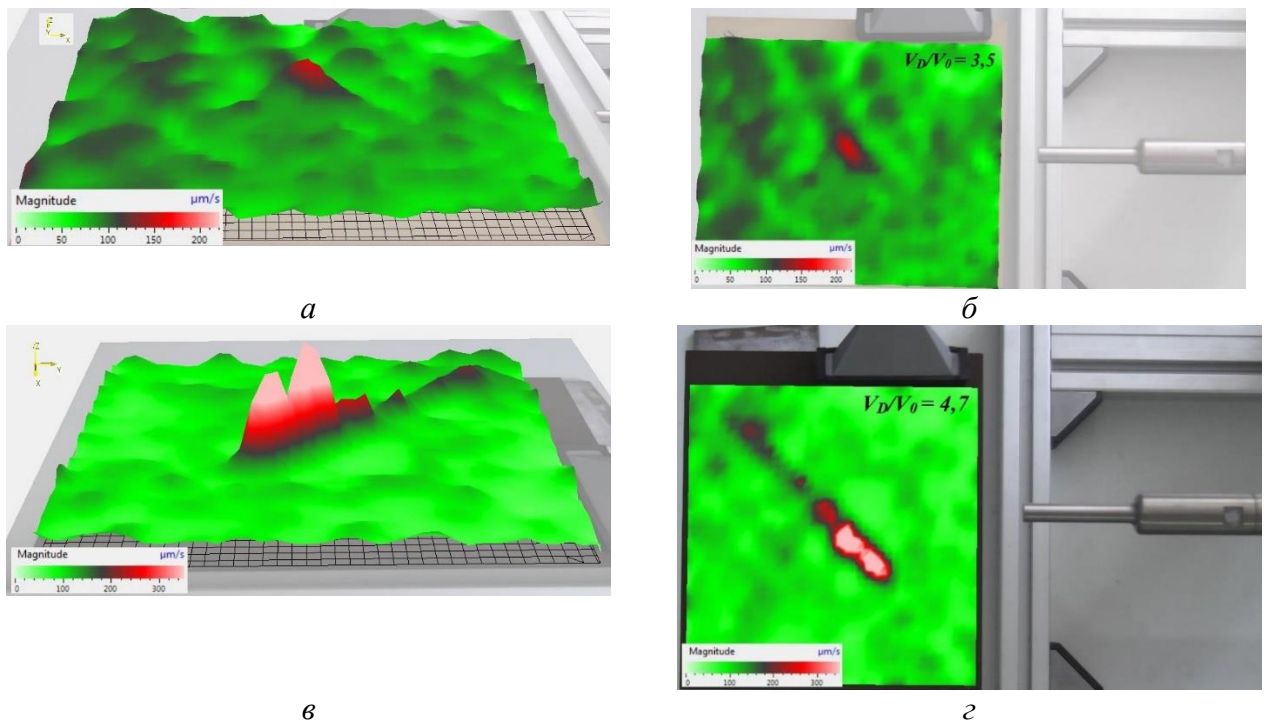


Рисунок 4.52 – Распределение амплитуды виброскорости в воздушной среде на различных расстояниях d между излучателем и исследуемым объектом (частота 23 кГц, длина волны 14,3 мм)

Из рисунка 4.52 видно, что амплитуда виброскорости ультразвуковой волны в воздухе спадает неравномерно, поскольку именно интерференция падающей и отраженной волн определяет амплитуду результирующего сигнала. 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 4.52 видно, что при частоте сигнала возбуждения 23 кГц длина волны составляет 14,3 мм, и пучности (локальные максимумы амплитуды виброскорости) располагаются на расстояниях, кратных половине длины волны от торца волновода.

Из вышесказанного 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. Важно отметить, что указанные особенности являются общими при работе всех типов резонансных излучателей, как магнитострикционных, так и пьезоэлектрических [253–255].

С помощью метода лазерной виброметрии были измерены вибрации, возникающие на поверхности углепластикового композита в процессе ультразвуковой стимуляции с использованием магнитострикционного преобразователя. Для обеспечения фазовой синхронизации величину воздушного зазора между объектом контроля и излучателем в конкретном эксперименте выбирали равной 21 мм, что соответствовало $3\lambda_{air}/2$. На рисунке 4.53 показаны виброграммы, полученные при сканировании на фронтальной (рисунок 4.53, а, б) и тыльной (рисунок 4.53, в, г) поверхностях образца из углепластика с ударным повреждением.



а, б – виброграммы на фронтальной поверхности образца,
в, г – виброграммы на тыльной поверхности образца

Рисунок 4.53 – Виброграммы на фронтальной и тыльной поверхностях образца из углепластика, полученные при акустической стимуляции с использованием воздушно-связанного магнитострикционного излучателя (размер образцов $155 \times 175 \times 1,5$ мм³, ударное повреждение с энергией 18 Дж – в центре образца)

В результате анализа данных, полученных с помощью лазерной виброметрии, оценена площадь зоны повреждения. На фронтальной стороне исследуемого образца площадь дефектной зоны составила 950 мм², что ниже

оценки, полученной при сканировании тыльной поверхности (1550 мм²). Относительная амплитуда сигнала в области дефекта, измеренная по виброграмме на фронтальной стороне, составила $V_D/V_0 \approx 4$, в то время как на тыльной поверхности $V_D/V_0 \approx 5$. Такое различие, по-видимому, связано с пирамидальной структурой ударного повреждения в слоистом композите, то есть возрастанием площади повреждения по мере увеличения глубины залегания дефекта (детально структура такого дефекта была рассмотрена в [256]).

Экспериментально было показано, что использование воздушно-связанного магнестрикционного излучателя для бесконтактной акустической стимуляции позволяет обнаружить дефекты в полимерных композитах даже без предварительного анализа резонансных частот объекта. В частности, полученный результат был достигнут путем использования мощных преобразователей, работающих на постоянной частоте ультразвука. Однако применение мощных излучателей ограничивается из-за возможности повреждения элементов исследуемого изделия вследствие локального резонанса или ультразвукового нагрева. Помимо этого, использование ультразвука с высокой плотностью мощности предъявляет дополнительные требования к оборудованию рабочего места и квалификации операторов.

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, что может затруднять диагностику.

4.4.3. Лазерная виброметрия с использованием воздушно-связанного газоразрядного излучателя

На рисунке 4.54 показан внешний вид воздушно-связанной системы для акустической стимуляции. В конкретных исследованиях данная система была использована для НК гибридного образца ПКМ «лен–углерод», разработанного в Университете Аквилы (Италия).

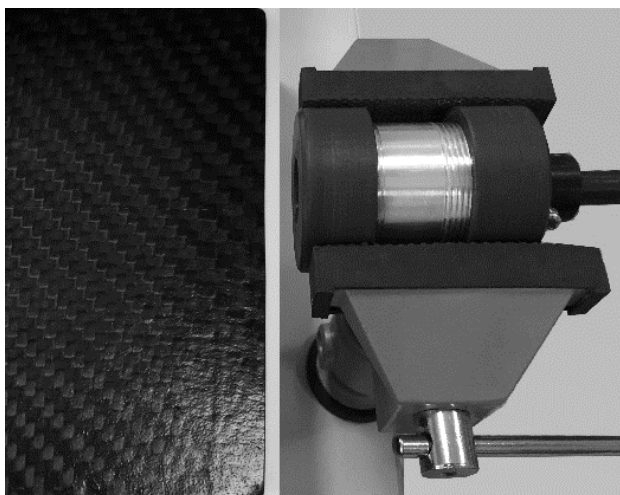


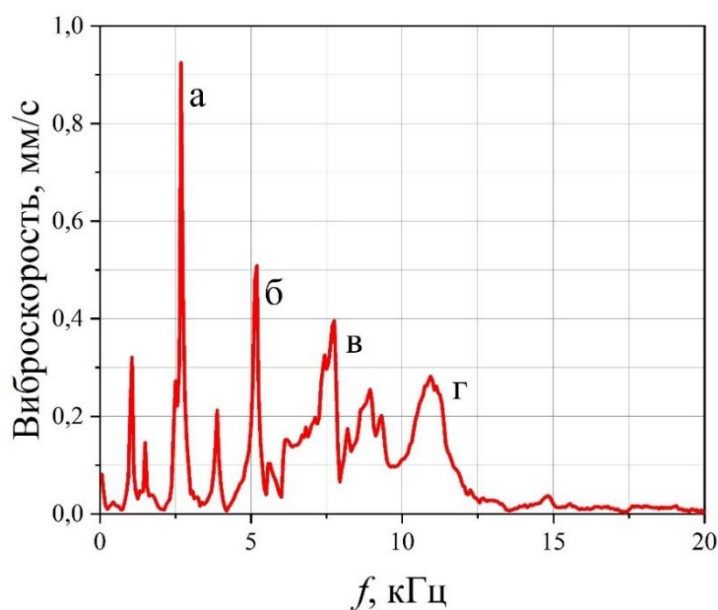
Рисунок 4.54 – Акустическая стимуляция гибридного образца «лен–углерод» с ударным повреждением с помощью воздушно-связанной системы на базе газоразрядного излучателя (размер образца $150 \times 100 \times 4$ мм³, ударное повреждение с энергией 40 Дж – в центре образца)

Система для генерации акустических колебаний в воздушной среде (Блок 3 на рисунке 4.45) включала в себя газоразрядный излучатель, передающую линию и генератор импульсов тока. В отличие от систем возбуждения, рассмотренных выше, газоразрядный излучатель работает в импульсном режиме, поэтому в воздушно-связанной системе между излучателем и объектом контроля не формируется устойчивая стоячая волна. Следовательно, при данном способе возбуждения нет необходимости обеспечивать согласование акустических колебаний по фазе.

В ходе предварительных экспериментов с использованием лазерной виброметрии была измерена амплитуда виброперемещения в центре мембраны газоразрядного излучателя. При величине межэлектродного промежутка 7 мм и выходном напряжении генератора импульсов тока до $V_0 < 12$ кВ амплитуда виброперемещения поверхности мембраны достигала 27 мкм, что сопоставимо по порядку величины с виброперемещением излучающих поверхностей систем на основе магнитострикционного и пьезоэлектрического преобразователей. Ввиду различных факторов, связанных с особенностями протекания разряда в излучателе, амплитуда излучаемой мощности нестабильна от импульса к импульсу.

Относительный разброс амплитуд виброперемещения поверхности мембраны достигал 20 %, однако это не приводило к значительным искажениям виброграммы при лазерном сканировании.

При проведении неразрушающего контроля гибридного полимерного композиционного материала «лен–углепластик» газоразрядный излучатель размещали на расстоянии 20 мм от торцевой стороны композита. В результате лазерного вибросканирования был получен амплитудно-частотный спектр вибраций пластины, приведенный на рисунке 4.55.

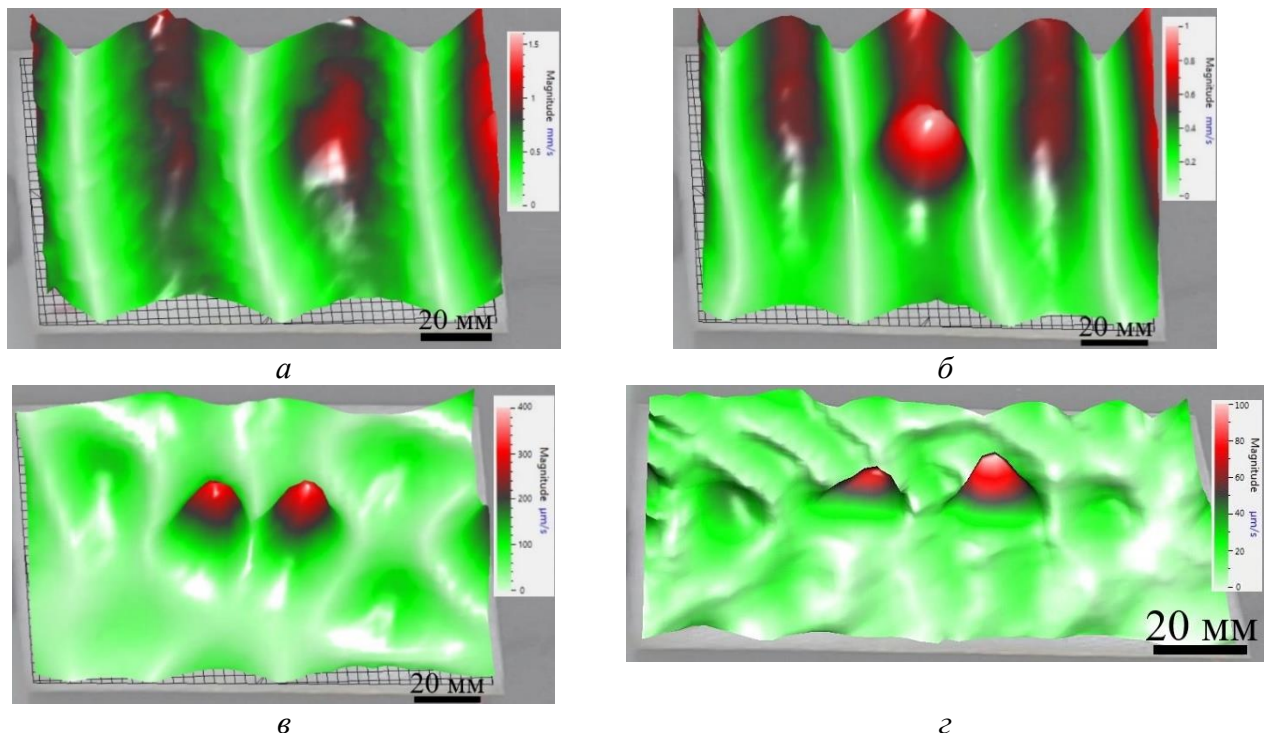


Резонансные частоты: а – 2,69 кГц, б – 5,19 кГц, в – 7,69 кГц, г – 11,56 кГц

Рисунок 4.55 – Спектр вибрационного сигнала в области ударного повреждения гибридного полимерного композиционного материала «лен–углепластик»

Амплитудно-частотный спектр отображает вибрации на поверхности гибридного композита в области ударного повреждения. В диапазоне частот от 50 Гц до 12 кГц в амплитудно-частотном спектре были обнаружены пики, часть из которых относилась к собственным частотам композита (рисунок 4.55, а, б), а другие соответствовали резонансным частотам дефекта в области ударного повреждения (рисунок 4.55, в, г). Виброграммы, отображающие вибрации поверхности гибридного композита на характерных резонансных частотах, приведены на рисунке 4.56.

Рисунок 4.56, *а* показывает пример виброграммы на собственной частоте гибридного композита (4,56 кГц), не содержащей дефектную отметку. При соответствии частоты передаваемого в материал акустического сигнала частоте резонанса дефекта в области неоднородности возникают интенсивные локальные вибрации. На частотах 7,69 кГц (рисунок 4.56, *в*) и 11,56 кГц (рисунок 4.56, *г*) обнаружены резонансные вибрации в области двух частей ударного повреждения, по форме напоминающих «крылья бабочки». Вовлечение в процесс колебаний большей области дефекта объясняется увеличением длины упругой волны, распространяющейся в композите в вышеуказанном диапазоне частот. Мелкие участки неоднородностей в свою очередь проявляются на более высокой частоте стимулирующих акустических волн. В связи с этим, размер области дефекта определен в результате анализа виброграммы, полученной при усреднении амплитуды вибраций в диапазоне частот от 50 Гц до 20 кГц (рисунок 4.56, *а*).

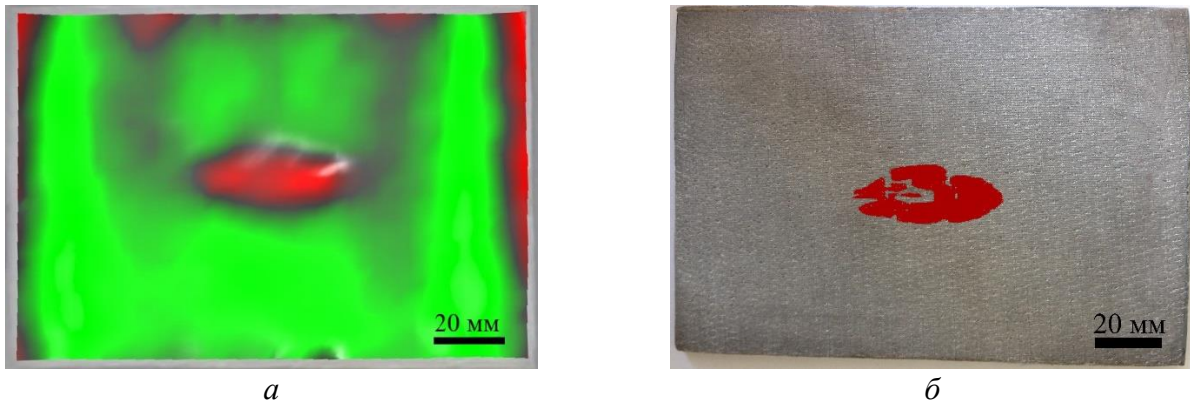


Резонансные частоты: *а* – 2,69 кГц, *б* – 5,19 кГц, *в* – 7,69 кГц, *г* – 11,56 кГц

Рисунок 4.56 – Оценка ударного повреждения энергией 40 Дж в гибридном композите «лен–углепластик» путем анализа собственных частот образца и резонансных частот дефекта

Важно отметить, что к особенностям воздушно-связанной системы на основе газоразрядного излучателя следует отнести импульсный режим работы, при котором в воздушном пространстве между излучателем и объектом контроля не формируется стоячая волна. Таким образом, при данном способе возбуждения нет необходимости обеспечивать согласование акустических колебаний по фазе, что является одним из важных преимуществ газоразрядного излучателя по сравнению с другими типами ультразвуковых преобразователей.

Для подтверждения результатов лазерной виброметрии в качестве альтернативного метода НК было проведено ультразвуковое С-сканирование с использованием роботизированного дефектоскопа Ideal System 3D (Германия) [256]. Для возбуждения колебаний на частоте 15 МГц использовали специализированный пьезопреобразователь диаметром 16 мм. Результаты ультразвукового сканирования с шагом 1 мм были наложены на фотографию исследуемого гибридного композита (рисунок 4.57, б). Определенная по результатам виброметрии площадь дефекта составила около 800 мм², или 95 % от соответствующего значения, полученного по результатам С-сканирования.



а – виброграмма, *б* – фотография с наложением результатов ультразвукового С-сканирования
 Рисунок 4.57 – Сравнительный анализ оценки размеров ударного повреждения в гибридном композите «лен–углепластик» с использованием лазерной виброметрии и ультразвукового С-сканирования

Резюмируя вышеизложенное, следует отметить, что использование бесконтактного режима ввода и регистрации акустического сигнала расширяет

возможности диагностики полимерных композиционных материалов и минимизирует внешние воздействия на контролируемые объекты по сравнению с традиционными акустическими методами неразрушающего контроля на основе контактных преобразователей. Вместе с тем использование бесконтактных излучателей имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при проведении неразрушающего контроля.

4.5. Выводы по главе 4

Разработаны методика и оборудование для генерации акустических волн в воздушной среде на основе газового разряда при проведении лазерно-виброметрического неразрушающего контроля, исследованы электроакустические эффекты, возникающие при протекании тока в газоразрядном излучателе. Показано, что амплитуда виброперемещения на мембране газоразрядного излучателя определяется напряжением источника заряда и при напряжении 10÷12 кВ сопоставима 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.

Исследование электродной системы газоразрядного излучателя показало, что амплитуда виброперемещения на мембране излучателя приблизительно пропорциональна энергии, запасенной в емкостном накопителе на момент пробоя газоразрядного промежутка. 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 в 2–3 раза приводит к снижению амплитуды колебательного смещения мембраны более, чем на порядок. В связи с этим, для эффективной передачи энергии из области плазмы разряда

электродная система должна иметь небольшой объем в сравнении с объемом канала разряда.

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. Модификация размера, конфигурации и состава элементов электродной системы позволяет регулировать диапазон рабочих частот газоразрядного излучателя в соответствии с поставленными задачами бесконтактного НК.

Проведение неразрушающих испытаний полимерных композитов показало, что импульсный режим работы газоразрядного излучателя обеспечивает широкополосную акустическую стимуляцию в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц, при котором в воздушном пространстве между излучателем и объектом контроля не формируется стоячая волна. При данном способе возбуждения нет необходимости обеспечивать согласование акустических колебаний по фазе, что является одним из важных преимуществ газоразрядного излучателя по сравнению с пьезоэлектрическими и магнитострикционными бесконтактными излучателями. Также важно отметить, что широкополосная импульсная стимуляция приводит к возникновению мультисоставного резонансного отклика в области дефектов в многослойных композитах, что повышает достоверность результатов контроля при использовании лазерного вибростимулирования.

Резюмируя вышеизложенное, следует отметить, что использование бесконтактного режима ввода и регистрации акустического сигнала расширяет возможности диагностики композитов, тонких, хрупких и гидрофильных материалов, а также минимизирует внешние воздействия на контролируемые объекты. Однако при проведении неразрушающих испытаний необходимо учитывать особенности работы бесконтактных излучателей.

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 учетом 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, минимизировать внешнее воздействие на контролируемые объекты, проводить контроль тонких, хрупких и гидрофильных материалов.

Основные итоги выполненного исследования:

1. Сформулированы теоретические основы метода лазерно-виброметрического неразрушающего контроля полимерных и композиционных материалов при резонансной стимуляции их 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 трем 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, 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 бесконтактного ввода ультразвука и неразрушающего контроля в целом. Экспериментально 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 в данном случае необходимо учитывать условия фазовой синхронизации падающей и отраженной волн, а также резонансного угла ввода ультразвука, для повышения эффективности бесконтактного ввода ультразвука и неразрушающего контроля в целом. 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 для неразрушающего контроля, позволяющий осуществлять широкополосную акустическую стимуляцию бесконтактным способом с получением мультисигнального 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 проведения модальных испытаний материалов и изделий бесконтактным способом. Особую значимость бесконтактный способ импульсной акустической стимуляции имеет в области контроля изделий с тонкими покрытиями, пленками и другими защитными слоями. Указанные материалы особенно подвержены повреждениям и не могут быть исследованы контактными методами неразрушающих испытаний. Таким образом, разработанный газоразрядный излучатель может быть использован для неразрушающих испытаний материалов, 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 nano-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 практические исследования в области совершенствования лазерно-виброметрического неразрушающего контроля позволят расширить области практического применения разработанного метода для контроля качества современных конструкционных материалов и изделий.

Автор выражает благодарность научному консультанту доктору технических наук, профессору Вавилову Владимиру Платоновичу за поддержку и помощь, оказанные при подготовке диссертационной работы и при проведении научно-

исследовательских работ. Также автор благодарит коллектив Центра промышленной томографии Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Томского политехнического университета, Нехорошева В. О. (Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск), Дружинина Н.В. (Институт физики прочности и материаловедения СО РАН), коллектив Лаборатории контроля качества материалов и конструкций Института физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск), профессора Ксинванга Г. (Институт авионавтики г. Пекина, Китай), профессора Чиаварелла М. (Политехнический университет г. Бари, Италия) за высокий профессионализм и плодотворное сотрудничество, а также предоставленное научно-техническое оборудование. Искреннюю благодарность автор выражает профессору Солодову Игорю Юрьевичу из Института полимерных технологий Штутгартского университета за предоставленную возможность получения опыта обширных теоретических и прикладных навыков работы на оборудовании сканирующей лазерной виброметрии в рамках прохождения научной стажировки в 2014 году, а также продуктивные результаты совместных научных исследований.

Автор благодарит за финансовую поддержку настоящей диссертационной работы Совет по грантам Президента Российской Федерации (МК-1221.2021.4), Российский фонд фундаментальных исследований (проекты № 16-32-00138, № 18-41-703002, № 19-29-13004), Российский научный фонд (проекты № 23-79-10107, № 18-79-00029, № 21-79-00169, № 22-19-00103, № 17-19-01047), фонд Европейского союза, выделивший автору индивидуальный грант в рамках программы «Erasmus+» по обмену студентами и преподавателями для проведения научных исследований и чтения лекций в Политехническом университете г. Бари (Италия).

Список сокращений

БПФ – быстрое преобразование Фурье

ИК – инфракрасный

ЛДА – лазерная доплеровская анемометрия

ЛДВ – лазерная доплеровская виброметрия

НК – неразрушающий контроль

ПКМ – полимерные композиционные материалы

ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь

СЛДВ – сканирующий лазерный доплеровский виброметр

УЗ – ультразвук

CFRP – carbon fiber reinforced plastic (углепластиковый композиционный материал)

LDR – local defect resonance (локальный резонанс дефекта)

MSA – micro system analyzers

SNR – signal to noise ratio (отношение сигнала/шум)

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 (IUS31): abstract book*. Washington, D.C., USA, September 06–09, 2017. – [S. 1.]: IEEE, UFFC, 2017. – Article number P2-A3-8. – 1 p. – URL: <https://ewh.ieee.org/conf/ius/2017/press/2017abstractbook.pdf> (access data: 03.04.2023).
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. Balageas D., Maldague X., Burleigh D., Vavilov V.P., Oswald-Tranta B., Roche J.-M., Pradere C., Carlomagno G.M. Thermal (IR) and Other NDT Techniques for Improved Material Inspection // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2016. – Vol. 35, is. 1. – Article number 18. – 17 p. – URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10921-015-0331-7.pdf?pdf=button> (access data: 03.04.2023).
5. Ciampa F., Scarselli G., Meo M. On the generation of nonlinear damage resonance intermodulation for elastic wave spectroscopy // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 2017. – Vol. 141, is. 4. – P. 2364–2374.
6. Solodov I. Resonant defects: A new approach to highly-sensitive defect-selective ultrasonic imaging // *Emerging Technologies in Non-Destructive Testing VI (ETNDT 2016): Proceedings of the 6th International Conference*. Brussels, Belgium, May 27–29, 2015. – London: CRC Press, 2016. – P. 13–21.
7. Solodov I., Döring D., Busse G. Air-coupled laser vibrometry: Analysis and applications // *Applied Optics*. – 2009. – Vol. 48, is. 7. – P. C33–C37.

8. Solodov I., Dillenz A., Kreutzbruck M. A new mode of acoustic NDT via Resonant Air-Coupled Emission // *Journal of Applied Physics*. – 2017. – Vol. 121, is. 24. – Article number 245101. – 9 p. – URL: https://pubs.aip.org/jap/article-pdf/doi/10.1063/1.4985286/15196431/245101_1_online.pdf (access data: 03.04.2023).

9. Solodov I., Döring D., Busse G. Air-coupled vibrometry for measurements in classical and nonclassical nonlinear acoustics // *Meetings on Acoustics : Proceedings of the 14th International Conference on Nonlinear Elasticity in Materials*. Lisbon, Portugal, June 01–05, 2009. – NY: American Institute of Physics, 2009. – Vol. 7, is. 1. – Article number 045001. – 10 p. – URL: <https://pubs.aip.org/asa/poma/article/7/1/045001/981865/Air-coupled-vibrometry-for-measurements-in> (access data: 03.04.2023).

10. Дубинский С.В., Фейгенбаум Ю.М., Сенник В.Я. Определение критериев прочности по условиям визуальной контролепригодности ударных повреждений в композитных авиационных конструкциях // *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*. – 2019. – Т. 22, № 6. – С. 86–99.

11. Смотров А.В., Смотров С.А. Оперативное определение динамических характеристик тел вращения однокомпонентным лазерным виброметром // III Отраслевая конференция по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов (КИМИЛА 2018): материалы конференции. Жуковский, 05–06 июня 2018 г. – Жуковский: ФГУП «ЦАГИ», 2018. – С. 274–282.

12. Смотров С.А., Смотров А.В., Иванов В.И. Сравнение выявляемости малозаметных ударных повреждений по результатам выполнения ультразвукового неразрушающего контроля и оптической профилометрии поверхности образцов полимерных композиционных материалов // *Конструкции из композиционных материалов*. – 2021. – № 4 (164). – С. 43–50.

13. Салихов З.Г., Будадин О.Н., Ишметьев Е.Н., Щетинин А.П., Троицкий-Марков Т.Е., Абрамова Е.В. Инженерные основы теплового контроля. Опыт промышленного применения. – М.: Издательский дом МИСиС, 2008. – 476 с.

14. Ключев В.В., Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Пичугин А.Н., Козельская С.О. Тепловой контроль композитных конструкций в условиях силового и ударного нагружения. – М.: Спектр, 2017. – 200 с.

15. Будадин О.Н., Кульков А.А., Козельская С.О., Каледин В.О., Крюкова Я.С. Неразрушающий контроль конструкций из углеродных материалов на основе регистрации поля точечных источников тока // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 1. – С. 46–52.

16. Крюкова Я.С., Каледин В.О., Будадин О.Н., Козельская С.О. Методика диагностики качества сплошности электропроводящих композитных материалов // Дефектоскопия. – 2017. – № 2. – С. 31–37.

17. Андреев В.Г., Вдовин В.А., Карабутов А.А. Термоакустический метод регистрации мощных СВЧ импульсов // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2003. – Т. XLVI, № 8–9. – С. 787–793.

18. Sokolovskaya Yu.G., Podymova N.B., Karabutov A.A. Detecting Violations in Stacking of Fiber Layers in CFRPs Using Broadband Acoustic Spectroscopy // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2022. – Vol. 58, № 10. – P. 882–890.

19. Gusev V.E., Karabutov A.A. Laser Optoacoustics. – NY: AIP Press, 1993. – 304 p.

20. Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Варелджан М.В. Сравнительный анализ эффективности программной реализации полуаналитических методов расчета волновых полей в многослойных анизотропных композитах // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 56–69.

21. Glushkov E.V., Glushkova N.V., Miakisheva O.A. Backward waves and energy fluxes excited in acoustic medium with an immersed plate // Ultrasonics. – 2019. – Vol. 94. – P. 158–168.

22. Glushkov E., Glushkova N., Lammering R., Eremin A., Neumann M.N. Lamb wave excitation and propagation in elastic plates with surface obstacles: proper choice of central frequencies // Smart Materials and Structures. – 2011. – Vol. 20, is. 1. – Article number 015020. – 11 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/20/1/015020> (access data: 03.04.2023).

23. Евдокимов А.А. Возбуждение и распространение упругих волн в протяженных смарт-структурах с активными пьезосенсорами: дис. ... канд. физ.-

мат. наук: 01.02.04 / Евдокимов Александр Александрович. – Краснодар, 2018. – 146 с.

24. Еремин А.А. Динамические задачи для слоистых упругих волноводов с неоднородностями: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.04 / Еремин Артем Александрович. – Краснодар, 2011. – 130 с.

25. Pye C., Adams R. A vibration method for the determination of stress intensity factors // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1982. – Vol. 16, is. 3. – P. 433–445.

26. Pye C.J., Adams R.D. Detection of damage in fibre reinforced plastics using thermal fields generated during resonant vibration // *NDT International*. – 1981. – Vol. 14, is. 3. – P. 111–118.

27. Изосимова М.Ю. Дистанционная диагностика материалов с микро- и наномасштабными дефектами методом сканирующей лазерной виброметрии: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.06 / Изосимова Мария Юрьевна. – М., 2009. – 179 с.

28. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику: звуковые и ультразвуковые волны большой интенсивности. – М.: Наука, 1966. – 520 с.

29. Красильников В.А. Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и в твердых телах. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматгиз, 1960. – 560 с.

30. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику : учебное пособие. – М.: Наука, 1984. – 403 с.

31. Морозов А.В. Развитие методов акустической голографии и лазерной виброметрии для исследования колебаний ультразвуковых излучателей в жидкостях: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.06 / Морозов Андрей Викторович. – М., 2006. – 123 с.

32. Самойлов А.Н. Лазерный доплеровский виброметр для дистанционного контроля изделий и объектов: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Самойлов Анатолий Николаевич. – Нижний Новгород, 2013. – 186 с.

33. 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.

34. Yarovoi L., Gnatovskii A., Medved N. Correction and correlation formation of probing field in fiber laser Doppler anemometers and vibrometers // *Optics and Lasers in Engineering*. – 1999. – Vol. 32, is. 6. – P. 593–604.

35. 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. – URL: <https://www.mdpi.com/2504-477X/6/3/93/pdf?version=1647874905> (access data: 03.04.2023).

36. 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. – URL: https://pubs.aip.org/jap/article-pdf/15110632/223512_1_online.pdf (access data: 03.04.2023).

37. 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. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327020307469?via%3Dihub> (access data: 03.04.2023).

38. 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.

39. 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.

40. 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.

41. Shepard S.M., Ahmed T., Lhota J. Experimental Considerations in Vibrothermography // *Proceedings of SPIE*. – 2004. – Vol. 5405: Thermosence XXVI.

International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications. Orlando, USA, April 12–16, 2004. – P. 332–335.

42. Gleiter A., Riegert G., Zweschper Th., Busse G. Ultrasound Lock-In Thermography for Advanced Depth Resolved Defect Selective Imaging // *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. – 2007. – Vol. 49, № 5. – P. 272–274.

43. Favro L.D., Han X., Ouyang Z., Sun G., Sui H., Thomas R.L. IR Imaging of Cracks Excited by an Ultrasonic Pulse // *Proceedings of SPIE*. – 2000. – Vol. 4020: Thermosense XXII. Orlando, USA, March 30, 2000. – P. 182–185.

44. Han X., Li W., Zeng Z., Favro L.D., Thomas R.L. Acoustic Chaos and Sonic Infrared Imaging // *Applied Physics Letters*. – 2002. – Vol. 81, is. 17. – P. 3188–3190.

45. Rizi A.S., Hedayatrasa S., Maldague X., Vukhanh T. FEM Modelling of Ultrasonic Vibrothermography of Damaged Plate and Qualitative Study of Heating Mechanisms // *Infrared Physics and Technology*. – 2013. – Vol. 61. – P. 101–110.

46. 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. – URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10921-016-0364-6.pdf?pdf=button> (access data: 03.04.2023).

47. Kersemans M., De Baere I., Degrieck J., Van Den Abeele K., Pyl L., Zastavnik F., Sol H., Van Paepegem W. Nondestructive damage assessment in fiber reinforced composites with the pulsed ultrasonic polar scan // *Polymer Testing*. – 2014. – Vol. 34. – P. 85–96.

48. Klepka A., Pieczonka L., Staszewski W.J., Aymerich F. Impact damage detection in laminated composites by non-linear vibro-acoustic wave modulations // *Composites. Part B: Engineering*. – 2014. – Vol. 65. – P. 99–108.

49. Le Bas P.-Y., Remillieux M.C., Pieczonka L., Ten Cate J.A., Anderson B.E., Ulrich T.J. Damage imaging in a laminated composite plate using an air-coupled time reversal mirror // *Applied Physics Letters*. – 2015. – Vol. 107, is. 18. – Article number 184102. – 4 p. – URL: https://pubs.aip.org/aip/apl/article-pdf/doi/10.1063/1.4935210/14474016/184102_1_online.pdf (access data: 03.04.2023).

50. 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, is. 1: International Scientific Conference on Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials (RTEP 2014). Tomsk, Russia, November 03–08, 2014. – Article number 012084. – 7 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/81/1/012084/pdf> (access data: 03.04.2023). P. 251–260.

51. Дерусова Д.А., Вавилов В.П., Ксингванг Г., Дружинин Н.В. Сравнительная эффективность ультразвуковой инфракрасной термографии при мощной и резонансной стимуляции ударных повреждений в углепластиковом композите // Дефектоскопия. – 2018. – № 5. – С. 33–40.

переводная версия: 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.

52. 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.

53. 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.

54. Ультразвук. Маленькая энциклопедия ; гл. ред. И. П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.

55. Ayrault C., Bequin P., Baudin S. Characteristics of spark discharge as an adjustable acoustic source for scale model measurements // Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference. Nantes, France, April 23–27, 2012. – Nantes: [s. n], 2014. – P. 3555–3559.

56. Кошелев Н.В., Лукьянов Н.П., Яковлев Н.М. Электроискровой излучатель сейсмических сигналов. Авторское свидетельство 1099296 СССР, МПК

G 01 V 1/157. Заявитель: Волжское отделение Института геологии и разработки горючих ископаемых. – Заявка № 3591825/25, заявл. 18.05.1983, опубл. 20.04.1995. – 6 с.

57. 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.

58. Шоле Ж., Дюбуа Ж. К. (Франция). Искровой генератор для подводных сейсмических исследований. Патент № 322899 СССР, МПК G 01 V 1/04. Заявитель: Иностранная фирма «Инститю Франсэ дю Петроль де Карбюрэн э Любрифьян (Франция). – Заявка № 1170024/26-25, заявл. 05.07.1967, опубл. 30.11.1971, Бюл. № 36. – 3 с.

59. 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.

60. 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.

61. Дерусова Д.А., Вавилов В.П., Xingwang G., Шпильной В.Ю., Данилин Н.С. Инфракрасный термографический контроль гибридных материалов с использованием мощной ультразвуковой стимуляции // Дефектоскопия. – 2018. – № 10. – С. 64–70.

переводная версия: 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.

62. 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. –

URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/23/9056/pdf?version=1669281081> (access data: 03.04.2023).

63. 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. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/20/7176/pdf?version=1666666936> (access data: 03.04.2023).

64. 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.

65. 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. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941820322418/pdf?md5=56c54c8af57caf815214eddb79e3ff68&pid=1-s2.0-S0142941820322418-main.pdf> (access data: 03.04.2023).

66. Дерусова Д.А., Вавилов В.П., Нехорошев В.О., Шпильной В.Ю., Дружинин Н.В. Особенности лазерно-виброметрического неразрушающего контроля полимерных композиционных материалов с использованием воздушно-связанных ультразвуковых преобразователей // *Дефектоскопия*. – 2021. – № 12. – С. 26–38.

переводная версия: 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.

67. Шпильной В.Ю., Вавилов В.П., Дерусова Д.А., Дружинин Н.В., Ямановская А.Ю. Особенности проведения неразрушающего контроля полимерных и композиционных материалов с использованием бесконтактной

ультразвуковой стимуляции и лазерного вибространирования // Дефектоскопия. – 2021. – № 8. – С. 14–23.

переводная версия: 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.

68. 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.

69. 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.

70. 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. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096386951930194X?via%3Dihub> (access data: 03.04.2023).

71. 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.

72. 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.

73. Дерусова Д.А., Вавилов В.П., Дружинин Н.В., Казакова О.И., Нехорошев В.О., Федоров В.В., Тарасов С.Ю., Шпильной В.Ю., Колубаев Е.А.

Неразрушающий контроль корпуса CubSat спутника с использованием лазерной виброметрии // Дефектоскопия. – 2019. – № 5. – С. 57–64.

переводная версия: 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.

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

переводная версия: 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.

75. 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. – URL: https://pubs.aip.org/acp/article-pdf/doi/10.1063/1.5132046/14102156/020179_1_online.pdf (access data: 03.04.2023).

76. 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. – URL: <https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/57632/1/conf-nw-28139.pdf> (access data: 03.04.2023).

77. 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. – URL: <https://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.2262423?SSO=1> (access data: 03.04.2023).

78. 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 (AMHS 17). Tomsk, Russia, October 09–13, 2017. – Article number 020101. – 4 p. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/1909/1/020101/833890/Modeling-acoustic-wave-propagation-in-isotropic?redirectedFrom=fulltext> (access data: 03.04.2023).

79. 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. – URL: <https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/36552/1/dx.doi.org-10.1088-1757-899X-156-1-012005.pdf> (access data: 03.04.2023).

80. Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A., Pan Y. Thermal NDT research at Tomsk Polytechnic University // Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2016. – Vol. 13, is. 2. – P. 128–143.

81. 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. Baltimor, USA, April 17–21, 2016. – Article number 98610F. – 9 p. – URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9861/1/Evaluating-impact-damage-in-graphite-epoxy-composite-by-using-low/10.1117/12.2222987.short> (access data: 03.04.2023).

82. Solodov I., Derusova D., Rahammer M. Thermosonic Chladni figures for defect-selective imaging // *Ultrasonics*. – 2015. – Vol. 60. – P. 1–5.

83. 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.

84. 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.

85. 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. – URL: <https://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.2049810> (access data: 03.04.2023).

86. 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.

87. Świdorski 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.

88. 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.

89. 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 (EFRE 2022). 22nd International Symposium on High Current Electronics: Abstracts. Tomsk, Russia, October 02–08, 2022. – Tomsk: TPU Publishing House, 2022. – P. 92.

90. 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 // Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций: материалы Международного междисциплинарного симпозиума. Тезисы докладов International Workshop «Multiscale Biomechanics and Tribology of Inorganic and Organic Systems», Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» и VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа», посвященной 50-летию основания Института химии нефти. Томск, 01–05 октября 2019 г. – Томск: Издательский Дом ТГУ, 2019. – С. 485.

91. 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, посвященной 90-летию со дня рождения основателя и первого директора ИФПМ СО РАН академика В. Е. Панина в рамках Международного междисциплинарного симпозиума «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций». Томск, 05–09 октября 2020 г. – Томск: Изд-во ТГУ, 2020. – С. 300.

92. Дерусова Д.А., Вавилов В.П. Резонансная ультразвуковая лазерная виброметрия разнородных дефектов в стеклопластике // Контроль. Диагностика. – 2019. – № 12 (258). – С. 24–28.

93. Шпильной В.Ю., Дерусова Д.А., Вавилов В.П. Дефектометрия и синтез данных лазерной виброметрии и теплового контроля // Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения): тезисы докладов XXXIII Уральской конференции ФМНК с международным участием. Екатеринбург, 19–20 апреля 2022 г. – 2 с. – URL: http://defectoskopiya.ru/public/files/XXXIIIUralConf/abstracts/2.3_ShpilnoyVJu.pdf (дата обращения: 03.04.2023).

94. 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. – URL: <https://www.ndt.net/article/since2019/papers/34-OR-06-8041.pdf> (access data: 03.04.2023).

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

96. 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 вибрметра // «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.

97. 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.

98. 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.

99. 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.

100. Заббаров А.А., Карельских Е.А., Шафигуллин Л.Н. Применение углепластиков в машиностроении / Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы (ИМТОМ 2017): сборник трудов VIII Международной научно-технической конференции. Казань, 06–08 декабря 2017 г. – Казань: Фолиант, 2017. – Ч. 1. – С. 65–67.

101. Молчанов Б.И., Гудинов М.М. Свойства углепластиков и области их применения // Авиационная промышленность. – 1997. – № 3–4. – С. 58–60.

102. Зеленский Э.С., Куперман А.М., Горбаткина Ю.А., Иванова-Мумжиева В.Г., Берлин А.А. Армированные пластики – современные конструкционные материалы // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). – 2001. – Т. XLV, № 2. – С. 56–74.

103. Климакова Л.А., Половый А.О., Маркин В.О. Применение термокомпенсационных углепластиковых профилей для обеспечения точностных характеристик космического телескопа / Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов. Корпоративные нано- и CALS-технологии в наукоемких отраслях промышленности (ТПКММ): сборник трудов 4-й Московской Международной конференции. Москва, 26–29 апреля 2005 г. – М.: Знание, 2006. – С. 748–754.

104. Мурашов В.В., Мишуrow К.С. Оценка прочностных характеристик углепластиков акустическим методом // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 1 (34). – С. 81–85.

105. Коган Д.И., Душин М.И., Борщев А.В., Вешкин Е.А., Абрамов П.А., Макрушин К.В. Свойства конструкционных углепластиков, изготовленных пропиткой под вакуумом // Известия Самарского научного центра Российской Академии Наук. – 2012. – Т. 14, № 4 (2). – С. 762–766.

106. Tariq F., Shifa M., Baloch R.A. Mechanical and Thermal Properties of Multi-scale Carbon Nanotubes-Carbon Fiber-Epoxy Composite // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2018. – Vol. 43, is. 11. – P. 5937–5948.

107. Хозяшев К.Е., Осипенко М.А. Аналитическое решение контактной задачи об изгибе двухлистового упругого элемента с внутренним шарниром: приложение к исследованию протеза стопы // Master's Journal. – 2015. – № 2. – С. 216–228.

108. Хмелев В.Н., Хмелев С.С., Абраменко Д.С., Цыганок С.Н. Применение ультразвуковых колебаний для ускорения процессов при производстве полимерных материалов // Прикладные аспекты химической технологии полимерных материалов и наносистем (Полимер-2009): сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Бийск, 29–30 мая 2009 г. – Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2009. – С. 151–154.

109. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Разработка и исследование аппретирующих составов для термопластичных углепластиков // Труды ВИАМ. – 2016. – № 12 (48). – С. 65–73.

110. Sarasini F., Tirillò J., D'Altilia S., Valente T., Santulli C., Touchard F., Chocinski-Arnault L., Mellier D., Lampani L., Gaudenzi P. Damage tolerance of carbon/flax hybrid composites subjected to low velocity impact // Composites. Part B: Engineering. – 2016. – Vol. 91. – P. 144–153.

111. Umar M.Z., Vavilov V.P., Abdullah H., Ariffinc A.K. Detecting Low-Energy Impact Damages in Carbon-Carbon Composites by Ultrasonic Infrared Thermography // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2017. – Vol. 53, № 7. – P. 530–538.

112. Zare Y., Rhee K.Y. Evaluation and Development of Expanded Equations Based on Takayanagi Model for Tensile Modulus of Polymer Nanocomposites Assuming

the Formation of Percolating Networks // *Physical Mesomechanics*. – 2018. – Vol. 21, № 4. – P. 351–357.

113. Dolmatov D., Zhvyrblya V., Filippov G., Salchak Y., Sedanova E. Advanced ultrasonic testing of complex shaped composite structures // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 135: VIII International Scientific Conference on Issues of Physics and Technology in Science, Industry and Medicine. Tomsk, Russia, June 01–03, 2016. – Article number 012010. – 6 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/135/1/012010/pdf> (access data: 03.04.2023).

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

115. Кузнецова Е.В., Романюк В.Н. Применение ультразвуковых методов неразрушающего контроля конструкций из полимерных композитных материалов // *Роль и место информационных технологий в современной науке: сборник статей Международной научно-практической конференции*. Самара, 17 января 2019 г. – Уфа: Omega Science, 2019. – Ч. 3. – С. 82–84.

116. Вавилов В.П. Тепловой неразрушающий контроль материалов и изделий (обзор) // *Дефектоскопия*. – 2017. – № 10. – С. 34–57.

117. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – 2-е изд. – М.: Спектр, 2013. – 542 с.

118. Vavilov V., Burleigh D. *Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing*. – Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020. – 598 p.

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

120. Горшков В.А., Кузелев Н.Р., Маклашевский В.Я., Юмашев В.М. Трансмиссионная радиационная томография и томография на обратно рассеянном излучении // *Контроль. Диагностика*. – 2014. – № 3. – С. 41–43.

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

122. Ключев В.В., Соснин Ф.С., Ковалев А.В., Филинов В.Н., Аертс В. [и др.]. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник ; под ред. В.В. Ключева. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.

123. Канаевский И.Н., Сальникова Е.Н. Неразрушающие методы контроля: учебное пособие. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.

124. Система неразрушающего контроля. Виды (методы) и технология неразрушающего контроля. Термины и определения: справочное пособие / отв. сост.-разраб. Бирюкова Н.П., Вавилов В.П., Воронков В.А., Глазков Ю.А., Евлампиев А.И. [и др.]. – М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003. – 392 с. – (Серия 28: Неразрушающий контроль. Вып. 4).

125. Burleigh D. A portable, combined thermography/shearography NDT system for inspecting large composite structures // SPIE. – 2002. – Vol. 4710: Thermosense XXIV. Orlando, USA, April 01–02; 2002. – P. 578–587.

126. Вавилов В.П., Ширяев В.В., Хорев В.С. Обработка результатов активного теплового контроля методом вейвлет-анализа // Дефектоскопия. – 2011. – № 4. – С. 70–79.

127. Tao N., Anisimov A.G., Groves R.M. Shearography non-destructive testing of thick GFRP laminates: Numerical and experimental study on defect detection with thermal loading // Composite Structures. – 2022. – Vol. 282. – Article number 115008. – 12 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822321014318/pdf?md5=0b90d0dc67f41519eca10db56f5147e2&pid=1-s2.0-S0263822321014318-main.pdf> (access data: 03.04.2023).

128. Liu Z., Gao J., Xie H., Wallace P. NDT capability of digital shearography for different materials // Optics and Lasers in Engineering. – 2011. – Vol. 49, is. 12. – P. 1462–1469.

129. Tao N., Anisimov A.G., Groves R.M. Towards safe shearography inspection of thick composites with controlled surface temperature heating // *NDT and E International*. – 2023. – Vol. 139. – Article number 102907. – 11 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869523001226> (access data: 03.04.2023).
130. Gros X.E., Bousigue J., Takahashi K. NDT data fusion at pixel level // *NDT and E International*. – 1999. – Vol. 32, is. 5. – P. 283–292.
131. Wang J., Xu T., Zhang L., Chang T., Zhang J., Yan Sh., Cui H.-L. Nondestructive damage evaluation of composites based on terahertz and X-ray image fusion // *NDT and E International*. – 2022. – Vol. 127, is. 4. – Article number 102616. – 11 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963869522000159?via%3Dihub> (access data: 03.04.2023).
132. Bi W., Zhao Y., Shen R., Li B., Hu Sh., Ge Sh. Multi-frequency GPR data fusion and its application in NDT // *NDT and E International*. – 2020. – Vol. 115, is. 1. – Article number 102289. – 10 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963869520303133?via%3Dihub> (access data: 03.04.2023).
133. Hettler J., Tabatabaeipour M., Delrue S., Abeele K.V.D. Detection and Characterization of Local Defect Resonances Arising from Delaminations and Flat Bottom Holes // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2017. – Vol. 36, is. 1. – Article number 2. – 10 p. – URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10921-016-0380-6.pdf?pdf=button> (access data: 03.04.2023).
134. Spytek J., Ambrozinski L., Pelivanov I. Non-contact detection of ultrasound with light – Review of recent progress // *Photoacoustics*, – 2023. – Vol. 29. – Article number 100440. – 25 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213597922001057/pdf?md5=2cf095b363f73ba15544bdac9abd8166&pid=1-s2.0-S2213597922001057-main.pdf> (access data: 03.04.2023).
135. Li Y., Dieussaert E., Baets R. Miniaturization of Laser Doppler Vibrometers – A Review // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, is. 13. – Article number 4735. – 25 p. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/13/4735/pdf?version=1655976507> (access data: 03.04.2023).

136. Van Den Abeele K.E.-A., Carmeliet J., Ten Cate J.A., Johnson P.A. Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage, Part II: Single-Mode Nonlinear Resonance Acoustic Spectroscopy // Research in Nondestructive Evaluation. – 2000. – Vol. 12, is. 1. – P. 31–42.

137. Montanini R., Freni F. Investigation of heat generation sources in sonic infrared thermography using laser Doppler vibrometry // NDTnet. The Largest Open Access Portal of Nondestructive Testing ; 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT 2012): E-book Proceedings. Naples, Italy, June 11–14, 2012. – Article number 177. – 6 p. – Mayen: NDTnet, 2012. – URL: <http://qirt.org/archives/qirt2012doi/papers/QIRT-2012-177.pdf> (access data: 03.04.2023).

138. Sarens B., Verstraeten B., Glorieux C., Kalogiannakis G., Van Hemelrijck D. Investigation of contact acoustic nonlinearity in delaminations by shearographic imaging, laser Doppler vibrometric scanning and finite difference modeling // IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 2010. – Vol. 57, is. 6. – P. 1383–1395.

139. Fierro G.P.M., Ginzburg D., Ciampa F., Meo M. Imaging of Barely Visible Impact Damage on a Complex Composite Stiffened Panel Using a Nonlinear Ultrasound Stimulated Thermography Approach // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2017. – Vol. 36. – Article number 69. – 21 p. – URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10921-017-0449-x.pdf?pdf=button> (access data: 03.04.2023).

140. Fierro G.P.M., Ciampa F., Ginzburg D., Onder E., Meo M. Nonlinear Ultrasound Modelling and Validation of Fatigue Damage // Journal of Sound and Vibrations. – 2015. – Vol. 343, is. 8. – P. 121–130.

141. Su Z., Ye L. Selective generation of Lamb wave modes and their propagation characteristics in defective composite laminates // Institute of Mechanical Engineers / Proceedings. Part L: Journal Materials Design Application. – 2016. – Vol. 218, is. 2. – P. 95–110.

142. Li Y., Zhu J., Duperron M., O'Brien P., Schüler R., Aasmul S., de Melis M., Kersemans M., Baets R. Six-beam homodyne laser Doppler vibrometry based on silicon

photonics technology // Optic Express. – 2018. – Vol. 26, № 3. – Article number 3638. – 8 p. – URL: <https://opg.optica.org/oe/viewmedia.cfm?uri=oe-26-3-3638&seq=0> (access data: 03.04.2023).

143. Maio D.D., Castellini P., Martarelli M., Rothberg S., Allen M.S., Zhu W.D., Ewins D.J. Continuous Scanning Laser Vibrometry: A raison d'être and applications to vibration measurements // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. – Vol. 156. – Article number 107573. – 32 p. – URL: <https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/251100053/DiMaio2021continuous.pdf> (access data: 03.04.2023).

144. Polytec: официальный сайт / Компания Polytec. – Электрон. дан. – 2023. – URL: <https://www.polytec.com/> (дата обращения: 03.04.2023).

145. Stanbridge A.B., Ewins D.J. Modal testing using a scanning laser Doppler vibrometer // Mechanical Systems and Signal Processing. – 1999. – Vol. 13, is. 2. – P. 255–270.

146. Stanbridge A.B., Khan A.Z., Ewins D.J. Modal testing using impact excitation and a scanning LDV // Shock and Vibration. – 2000. – Vol. 7, is. 2. – P. 91–100.

147. Allen M.S., Sracic M.W. A New Method for Processing Impact Excited Continuous-Scan Laser Doppler Vibrometer Measurements // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2010. – Vol. 24, is. – P. 721–735.

148. Vanlanduit S., Guillaume P., Schoukens J. Broadband vibration measurements using a continuously scanning laser vibrometer // Measurement Science and Technology. – 2002. – Vol. 13, № 10. – P. 1574–1582.

149. Di Maio D., Ewins D.J. Continuous Scan, a method for performing modal testing using meaningful measurement parameters // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2011. – Vol. 25, is. 8. – P. 3027–3042.

150. Модальный анализ: теория и испытания: пер. с англ. / В. Хейлен, С. Ламменс, П. Сас. – М.: ООО «Новотест», 2010. – 319 с.

151. Dresel T., Hausler G., Venzke H. Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar // Applied Optics. – 1992. – Vol. 31, is. 7. – P. 919–925.

152. De Groot P., Deck L. Three-dimensional imaging by sub-Nyquist sampling of white-light interferograms // Optics Letters. – 1993. – Vol. 18, is. 17. – P. 1462–1464.

153. De Groot P., De Lega X.C. Valve cone measurement using white light interference microscopy in a spherical measurement geometry // *Optical Engineering*. – 2003. – Vol. 42, is. 5. – P 1232–1237.

154. Viotti M.R., Albertazzi A., Dal Pont A., Fantin A.V. Evaluation of a novel algorithm to align and stitch adjacent measurements of long inner cylindrical surfaces with white light interferometry // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2007. – Vol. 45, is. 8. – P. 852–859.

155. Rothberg S.J., Allen M.S., Castellini P., Di Maio D., Dirckx J.J.J., Ewins D.J., Halkon B.J., Muyschondt P., Paone N., Ryan T., Steger H., Tomasini E.P., Vanlanduit S., Vignola J.F. An international review of laser Doppler vibrometry: making light work of vibration measurement // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2017. – Vol. 99. – P. 11–22.

156. Segers J., Kersemans M., Hedayatrasa S., Calderon J., Paepegem W.V. Towards in-plane local defect resonance for non-destructive testing of polymers and composites // *NDT and E International*. – 2018. – Vol. 98. – P. 130–133.

157. Segers J., Hedayatrasa S., Verboven E., Poelman G., Paepegem W.V., Kersemans M. In-plane local defect resonances for efficient vibrothermography of impacted carbon fiber-reinforced polymers (CFRP) // *NDT and E International*. – 2019. – Vol. 102. – P. 218–225.

158. Weekes B., Ewins D. Multi-frequency, 3D ODS measurement by continuous scan laser Doppler vibrometry // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2015. – Vol. 58–59. – P. 325–339.

159. Карпман В.И. Нелинейные волны в диспергирующих средах. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1973. – 175 с.

160. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Физматгиз, 1958. – 410 с.

161. Стокер Дж. Нелинейные колебания в механических и электрических системах: пер. с англ. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1952. – 256 с.

162. Остроумов Г.А. Основы нелинейной акустики. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1967. – 132 с.
163. Руденко О.В., Солюян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики. – М.: Наука, 1975. – 287 с.
164. Петрухин В.В., Петрухин С.В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации: учебное пособие. – М.: Инфра-Инженерия, 2010. – 176 с.
165. Ostrovsky L.A., Johnson P.A. Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials // *Rivista del Nuovo Cimento*. – 2001. – Vol. 24, is. 7. – P. 1–46.
166. Bjørnø L. Introduction to Nonlinear Acoustics // *Physics Procedia*. – 2010. – Vol. 3, is. 1. – P. 5–16.
167. Solodov I., Kornely M., Philipp J., Stammen E., Dilger K., Kreutzbruck M. Linear vs nonlinear ultrasonic testing of kissing bonds in adhesive joints // *Ultrasonics*. – 2023. – Vol. 132, is. 1–8. – Article number 106967. – 8 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0041624X23000434> (access data: 03.04.2023).
168. Solodov I., Bai J., Bekgulyan S., Busse G. A local defect resonance to enhance acoustic wave-defect interaction in ultrasonic nondestructive evaluation // *Applied Physics Letters*. – 2011. – Vol. 99, is. 21. – Article number 211911. – 3 p. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/99/21/211911/150973/A-local-defect-resonance-to-enhance-acoustic-wave?redirectedFrom=fulltext> (access data: 03.04.2023).
169. Roy S., Bose T. Efficient determination of local defect resonance frequencies from bicoherence plots using double excitations // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2019. – Vol. 127. – P. 595–609.
170. Segers J., Hedayatrasa S., Poelman G., Van Paeppegem W., Kersemans M. Self Reference Broadband Local Wavenumber Estimation (SRB-LWE) for Defect Assessment in Composites // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2022. – Vol. 163. – Article number 108142. – 25 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327021005227> (access data: 03.04.2023).
171. Busse G., Bernd-H. Kruplin, Wittel F. K. Damage and its Evolution in Fiber – Composite Materials: Simulation and Non-Destructive Evaluation. – Stuttgart: ISD Verlag, 2006. – 548 p.

172. Rogovsky A. J. Development and application of ultrasonic dry-contact and air-contact C-scan systems for nondestructive evaluation of aerospace composites // *Materials Evaluation*. – 1991. – Vol. 50. – P. 1491–1497.

173. Podymova N.B., Karabutov A.A. Transformation of laser-induced broadband pulses of longitudinal ultrasonic waves into pulses of shear waves in an isotropic solid plate immersed in a liquid // *Ultrasonics*. – 2021. – Vol. 116. – Article number 106517. – 9 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0041624X21001463> (access data: 03.04.2023).

174. Scruby C.B., Drain L.E. *Laser ultrasonics: techniques and applications*. – NY; Abingdon: Taylor and Francis Group, 1990. – 447 p.

175. Thompson R.B. *Physical Principles of Measurements with EMAT Transducers* // *Ultrasonic measurement methods*; ed. by R.N. Thurston, A.D. Pierce. – Boston, London: Academic Press, 1990. – Ch. 4. – P. 157–200. – (Physical Acoustics. Vol. 19).

176. Grandia W.A., Fortunko S.M. NDE applications of air-coupled ultrasonic transducers // *1995 IEEE International Ultrasonics Symposium: Proceedings*. Seattle, USA, November 07–10, 1995. – [S. l.]: IEEE, 1995. – Vol. 1. – P. 697–709.

177. Hillger W., Meier R., Henrich R. Inspection of CFRP components by ultrasonic imaging with air Coupling // *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. – 2004. – Vol. 46, № 3. – P. 147–150.

178. Wang J., Xu B., Shen Z., Ni X., Lu J. Influence of transparent coating thickness on thermoelastic force source and laser-generated ultrasound waves // *Applied Surface Science*. – 2009. – Vol. 255. – P. 7172–7178.

179. Nad' M. Ultrasonic horn design for ultrasonic machining technologies // *Applied and Computational Mechanics*. – 2010. – Vol. 4. – P. 79–88.

180. Shuyu L. Equivalent circuits and directivity patterns of air-coupled ultrasonic transducers // *The Journal of the Acoustical Society of America*. – 2001. – Vol. 109, is. 3. – P. 949–957.

181. Solodov I., Kreutzbruck M. Single-sided access remote imaging via resonant airborne activation of damage // *NDT and E International*. – 2019. – Vol. 107, is. 1. –

Article number 102146. – 7 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963869519301860?via%3Dihub> (access data: 03.04.2023).

182. Shahzad A., Jia G., Guiqiang L. Review on design of hybrid longitudinal-torsional ultrasonic vibration horn for rotary ultrasonic machining (RUM) processes // *Procedia CIRP*. – 2023. – Vol. 119: Proceedings of the 33rd CIRP Design Conference. Sydney, Australi, May 17–19, 2023. – P. 608–613. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827123005851/pdf?md5=ce975537d62eb3fd9964955c5702390a&pid=1-s2.0-S2212827123005851-main.pdf> (access data: 03.04.2023).

183. Jagadish, Amitava R. Design and performance analysis of ultrasonic horn with a longitudinally changing rectangular cross section for USM using finite element analysis // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2018. – Vol. 40. – Article number 359. – 11 p. – URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40430-018-1281-7.pdf?pdf=button> (access data: 03.04.2023).

184. Solodov I., Döring D., Busse G. Air-Coupled Lamb and Rayleigh Waves for Remote NDE of Defects and Material Elastic Properties // *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*. – 2010. – Vol. 56, is. 9. – P. 557–564

185. Pan L., Shen Z., Kan W., Liu X. Determination of each layer thickness of thin bilayer using laser-based multiple zero-group velocity Lamb waves // *Optics and Laser Technology*. – 2023. – Vol. 165. – Article number 109580. – 6 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399223004735> (access data: 03.04.2023).

186. Timoshenko S.P., Young D. H., Weaver W. *Vibration Problems in Engineering*. – 4th ed. – NY: D. Van Nostrand Company, 1974. – 538 p.

187. Диментберг Ф.М., Шаталов К.Т., Гусаров А.А. *Колебания машин*. – М.: Машиностроение, 1964. – 308 с.

188. Uchino K. *Piezoelectric Ceramics* // *Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing and Properties*; eds. Somiya S., Aldinger F., Spriggs R. M., Uchino K., Koumoto K., Kaneno M. – 2003. – Vol. II: Processing and their Applications. – Ch. 4, 4.1. – P. 107–159.

189. Hanuman N.S.V.N., Roy S., Bose T. Detection of local defect resonance intermodulation peaks using bicoherence analysis // International Journal of Mechanical Sciences. – 2019. – Vol. 163. – Article number 105092. – 12 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002074031932538X> (access data: 03.04.2023).

190. 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.

191. Композиционные материалы на основе углерода: сборник научных трудов НИИГрафита; гл. ред. Костиков В.И. – М.: ЦНИИцветмет экономики и информации, 1991. – 158 с.

192. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: в 10 т. – Т. VII: Теория упругости: учебное пособие. – 4-е изд., испр. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 248 с.

193. База данных свойств материалов // Массачусетский технологический институт: офиц. сайт. – URL: <http://www.mit.edu/~6.777/matprops/pmma.htm> (дата обращения: 05.02.2020).

194. Chladni E.F.F. Entdeckungen über die Theorie des Klanges. – Leipzig: bey Weidmanns Erben und Reich, 1787. – 77 s.

195. Introduction to Eigenfrequency Analysis // COMSOL Multiphysics: official website. – URL: <https://www.comsol.com/multiphysics/eigenfrequency-analysis> (access data: 06.10.2022).

196. Solodov I., Rahammer M., Kreutzbruck M. Analytical evaluation of resonance frequencies for planar defects: Effect of a defect shape // NDT and E International. – 2019. – Vol. 102. – P. 274–280.

197. 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. – URL: <https://www.ndt.net/article/ewshm2018/papers/0055-Aranguren.pdf> (access data: 03.04.2023).

198. Hedayatrasa S., Poelman G., Segers J., Van Paepegem W., Kersemans M. Phase Inversion in (vibro-)thermal wave imaging of materials: Extracting the AC component and filtering nonlinearity // *Structural Control and Health Monitoring*. – 2022. – Vol. 29, is. 4. – Article number e2906. – 28 p. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/stc.2906> (access data: 01.05.2023).

199. Pickering K.L., Aruan Efendy M.G., Le T.M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance // *Composites. Part A: Applied Science Manufacturing*. – 2015. – Vol. 83. – P. 98–112.

200. Fiore V., Valenza A., Di Bella G. Mechanical behavior of carbon/flax hybrid composites for structural applications // *Journal of Composite Materials*. – 2012. – Vol. 46, is. 17. – P. 2089–2096.

201. Duc F., Bourban P.E., Plummer C.J.G., Manson J.-A.E. Damping of thermoset and thermoplastic flax fibre composites // *Composites. Part A: Applied Science Manufacturing*. – 2014. – Vol. 64. – P. 115–123.

202. Assarar M., Zouari W., Sabhi H., Ayad R., Berthelot J.-M. Evaluation of the damping of hybrid carbon–flax reinforced composites // *Composite Structures*. – 2015. – Vol. 132. – P. 148–154.

203. Le Guen M.J., Newman R.H., Fernyhough A., Emms G.W., Staiger M.P. The damping–modulus relationship in flax–carbon fibre hybrid composites // *Composites. Part B: Engineering*. – 2016. – Vol. 89. – P. 27–33.

204. Swolfs Y., Gorbatikh L., Verpoest I. Fibre hybridisation in polymer composites: A review // *Composites. Part A: Applied Science Manufacturing*. – 2014. – Vol. 67. – P. 181–200.

205. Bartelds G., Heida J.H., McFeat J., Boller C., Staszewski W.J. [et al.] *Health Monitoring of Aerospace Structures*; ed. by Staszewski W.J., Boller C., Tomlinson G.R. – Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2003. – 288 p.

206. Aymerich F., Staszewski W.J. Impact damage detection in composite laminates using nonlinear acoustics // *Composites. Part A: Applied Science Manufacturing*. – 2010. – Vol. 41, is. 9. – P. 1084–1092.

207. Kavouras P., Dragatogiannis D.A., Batsouli D.I., Charitidis C.A. Effect of local microstructure on the indentation induced damage of a fiber reinforced composite // *Polymer Testing*. – 2017. – Vol. 61. – P. 197–204.

208. Meola C., Carlomagno G.M. Impact damage in GFRP: New insights with infrared thermography // *Composites. Part A: Applied Science Manufacturing*. – 2010. – Vol. 41, is. 12. – P. 1839–1847.

209. Belovickis J., Samulionis V., Banys J., Silibin M., Solnyshkin A., Shilyaeva Yu., Nekludov K., Gavrilov S., Rubanik Jr. V., Rubanik V., Shvartsman V.V. Ultrasonic spectroscopy of copolymer based P(VDF-TrFE) composites with fillers on lead zirconate titanate basis // *Polymer Testing*. – 2016. – Vol. 53. – P. 211–216.

210. Alciatore D.G., Hestand M.B. *Introduction to Mechatronics and Measurement Systems*. – Third ed. – [S. l]: McGraw Hill, 2007. – 509 p.

211. Goh G.D., Agarwala S., Goh G.L., Dikshit V., Sing S.L., Yeong W.Y. Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential // *Aerospace Science and Technology*. – 2017. – Vol. 63. – P. 140–151.

212. Cranston B., AlGhofaily M., Palazotto A. Design and structural analysis of unique structures under an internal vacuum // *Aerospace Science and Technology*. – 2017. – Vol. 68. – P. 68–76.

213. Rego I.S., Marcos T.V.C., Pinto D.R., Vilela R.G.S., Galvão V.A.B., Pivetta A., Camilo G.P., Silva J.R.T., Lima B.C., Carvalhal A.K., Cardoso R.L., Martos J.F.A., Santos A.M., Oliveira A.C., Toro P.G.P. Ground experimentation with 3D printed scramjet inlet models at hypervelocities // *Aerospace Science and Technology*. – 2016. – Vol. 55. – P. 307–313.

214. Wang P., Tan X., He C., Nai M.L.S., Huang R., Tor S.B., Wei J. Scanning optical microscopy for porosity quantification of additively manufactured components // *Additive Manufacturing*. – 2018. – Vol. 21. – P. 350–358.

215. Simonetti F., Satow I.L., Brath A.J., Wells K.C., Porter J., Hayes B., Davis K. Cryo-Ultrasonic NDE: Ice–Cold Ultrasonic Waves for the Detection of Damage in Complex–Shaped Engineering Components // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. – 2018. – Vol. 65. – P. 638–647.

216. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров. – М: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.

217. 3D-печать и космос: самое важное // 3dpulse.ru: информационно-справочный портал. – Электрон. дан. – М., 2014–2023. – URL: <https://www.3dpulse.ru/news/kosmos/3d-pechat-i-kosmos-samoe-vazhnoe/> (дата обращения: 28.08.2021).

218. Blachowicz T., Pająk K., Recha P., Ehrmann A. 3D printing for microsatellites-material requirements and recent developments // AIMS Materials Science. – 2020. – Vol. 7, is. 6. – P. 926–938.

219. Российские космонавты напечатали первую рабочую деталь на 3D-принтере на МКС // Известия.iz: информационно-справочный портал. – URL: <https://iz.ru/1459520/2023-01-25/rossiiskie-kosmonavty-napechatali-pervuiu-rabochuiu-detal-na-3d-printere-na-mks> (дата обращения 26.04.2023).

220. Боженков В. В., Шахлевич Г. М. Расчеты и проектирование оборудования для электрофизической обработки: практикум: в 2 ч. – Минск: БГУИР, 2009. – Ч. 1: Оборудование для ультразвуковой и лазерной обработки. – 51 с.

221. Ko Y.H., Kim K.J., Ko J.-H. High-pressure Sound Velocity of PMMA Studied by Using Brillouin Spectroscopy // Journal of the Korean Physical Society. – 2013. – Vol. 63, № 12. – P. 2358–2361.

222. Blum R. Verfahren zur Erkennung von Spaltern in Span- und MDF-Platten und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens. – DE Patent 19519669C1, Germany. 1997.

223. Pieczonka Ł., Ambroziński Ł., Staszewski W.J., Barnoncel B., Pérès P. Damage detection in composite panels based on mode-converted Lamb waves sensed using 3D laser scanning vibrometer // Optics and Lasers in Engineering. – 2017. – Vol. 99. – P. 80–87.

224. Schiller S., Hsieh C.-K., Chou C.-H., Khuri-Yakub B.T. Novel High Frequency Air Transducers // Review of Progress in Quantitative Nondestructive

Evaluation; eds. by Thompson D.O., Chimenti D.E. – Boston: Springer, 1990. – Vol. 9. – P. 795–798.

225. Hutchins D.A., Schindel D.W. Advances in non-contact and air-coupled transducers [US materials inspection] // 1994 Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium. Cannes, France, October 31 –November 03, 1994. – [S. l.]: IEEE, 1994. – Vol. 2. – P. 1245–1254.

226. Chen J., Wang X., Yang X., Zhang L., Wu H. Application of Air-Coupled Ultrasonic Nondestructive Testing in the Measurement of Elastic Modulus of Materials // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, is. 19. – Article number 9240. – 11 p. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/19/9240/pdf?version=1633756376> (access data: 03.04.2023).

227. Adelegan O.J., Coutant Z.A., Wu X., Yamaner F.Y., Oralkan O. Design and fabrication of wideband air-coupled capacitive micromachined ultrasonic transducers with varying width annular-ring and spiral cell structures // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 2021. – Vol. 68, is. 8. – P. 2749–2759.

228. Bernhardt Y., Kreutzbruck M. Integrated defect sensor for the inspection of fiber-reinforced plastics using air-coupled ultrasound // Journal of Sensors and Sensor Systems. – 2020. – Vol. 9, is. 1. – P. 127–132.

229. Daschewski M., Kreutzbruck M., Prager J., Dohse E., Gaal M., Harrer A. Resonanzfreie Messung und Anregung von Ultraschall [Resonance-free measuring and excitation of ultrasound] // Technisches Messen. – 2015. – Bd. 82, № 3. – S. 156–166.

230. Cooper J.A., Dewhurst R.J., Moody S., Palmer S.B. High-voltage spark discharge source as an ultrasonic generator // IEE Proceedings A (Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews). – 1984. – Vol. 131, is. 4. – P. 275–281.

231. Martinson E., Delsing J. Electric spark discharge as an ultrasonic generator in flow measurement situations // Flow Measurement and Instrumentation. – 2010. – Vol. 21, is. 3. – P. 394–401.

232. Mackersie J.W., Timoshkin I.V., MacGregor S.J. Generation of high-power ultrasound by spark discharges in water // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2005. – Vol. 33, is. 5, pt. 2. – P. 1715–1724.

233. Wang J., Jinxin C., Cai L., Fan Ya., Zhou M., Li Q. Characteristics of acoustic response from simulated impulsive lightning current discharge // *High Voltage* – 2019. – Vol. 4, is. 3. – P. 221–227.

234. Vanlanduit S., Vanherzeele J., Vuye C., Guillaume P. Characterization of acoustic materials using the scanning laser Doppler vibrometer // *Conference Proceedings of SPIE*. – 2006. – Vol. 6345: Seventh International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications. Ancona, Italy, June 19–22, 2006. – Article number 63451. – 11 p. – URL: <https://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.693166> (access data: 03.04.2023).

235. Feeney A., Kang L., Rowlands G., Zhou L., Dixon S. Dynamic Nonlinearity in Piezoelectric Flexural Ultrasonic Transducers // *IEEE Sensors Journal*. – 2019. – Vol. 19, № 15. – P. 6056–6066.

236. Feeney A., Kang L., Rowlands G., Dixon S. The Dynamic Performance of Flexural Ultrasonic Transducers // *Sensors*. – 2018. – Vol. 18, is. 1. – Article number 270. – 14 p. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/1/270/pdf?version=1516268216> (access data: 03.04.2023).

237. Feeney A., Kang L., Dixon S. High-Frequency Measurement of Ultrasound using Flexural Ultrasonic Transducers // *IEEE Sensors Journal*. – 2018. – Vol. 18, is. 13. – P. 5238–5244.

238. Feeney A., Kang L., Somerset W.E., Dixon S. The Influence of Air Pressure on the Dynamics of Flexural Ultrasonic Transducers // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19, is. 21. – Article number 4710. – 16 p. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/21/4710/pdf?version=1572414533> (access data: 03.04.2023).

239. Анурьев В.И. Элементы сопротивления материалов // *Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. / под ред. И. Н. Жестковой*. – 8-е изд., перераб и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 1. – С. 34–60.

240. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1970. – Т. 1: Механика, колебания и волны, молекулярная физика. – 517 с.

241. Бояркин Е.В., Кочетков А.С., Бехер С.А. Физические основы ультразвукового контроля. Руководство по подготовке к экзамену: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2018. – 38 с.

242. ГОСТ Р МЭК 61828–2012. Преобразователи ультразвуковые фокусирующие. Общие требования к методикам измерения параметров ультразвукового излучения. Идентичен международному стандарту МЭК 61828:2001 «Ультразвук. Фокусирующие преобразователи. Определения и методы измерения излучаемых полей» (IEC 61828:2001 «Ultrasonics. Focusing transducers. Definitions and measurement methods for the transmitted fields»). – Введ. 2014–05–01. – М.: Стандартиформ, 2014. – 39 с.

243. ГОСТ Р 55808–2013. Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний. – Введ. 2015–07–01. – М.: Стандартиформ, 2014. – 51 с.

244. Эльпинер И.Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие. – М.: Физматгиз, 1963. – 420 с.

245. Vuze C., Vanlanduit S., Guillaume P. Accurate estimation of normal incidence absorption coefficients with confidence intervals using a scanning laser Doppler vibrometer // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2009. – Vol. 47, is. 6. – P. 644–650.

246. Zipser L., Franke H.H. Refracto-vibrometry – a novel method for visualizing sound waves in transparent media // 7th European Conference on Noise Control (EURONOISE 2008): Proceedings. Paris, France, June 29 – July 04, 2008. – Paris: [s. n.], 2008. – P. 1997–2001.

247. Sellappan P., Alvi F.S. Three-dimensional flow field and acoustics of supersonic rectangular jets // *Experiments in Fluids*. – 2022. – Vol. 63, is. 1. – Article number 20. – 19 p. – URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00348-021-03372-8.pdf?pdf=button> (access data: 03.04.2023).

248. White R.D., Neeson I., Schmid E.S., Merrison J., Iversen J.J., Banfield D. Flow Testing of a Sonic Anemometer for the Martian Environment // Proceedings of the 2020 AIAA Scitech Forum. Orlando, USA, January 06–10, 2020. – American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2020. – Article number 237189. – 13 p. – URL: <https://arc.aiaa.org/doi/reader/10.2514/6.2020-0712> (access data: 03.04.2023).

249. Zipser L., Seeling H.-D., Franke H. Refracto-vibrometry for visualizing ultrasound in small-sized channels, cavities and objects // Proceedings of the 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2009). Rome, Italy, September 20–23, 2009. – [S. 1.]: IEEE, 2009. – P. 2588–2591.

250. Pylnov Yu.V., Shirkovskiy P.N., Pernod Ph., Preobrazhensky V.L. Ultrasonic air-coupled wave phase conjugator for the low megahertz frequency range // Proceedings of the 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS 2009). Rome, Italy, September 20–23, 2009. – [S. 1.]: IEEE, 2009. – P. 2611–2614.

251. Solodov I., Bernhardt Y., Kreutzbruck M. Resonant Airborne Acoustic Emission for Nondestructive Testing and Defect Imaging in Composites // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, is. 21. – Article number 10141. – 16 p. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/21/10141/pdf?version=1635496553> (access data: 03.04.2023).

252. Guo X., Zhu L. Vibro-thermography of calibrated defects in hybrid plates focusing on viscoelastic heat generation // Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2021. – Vol. 18, is. 5. – P. 314–331.

253. Li X., Dai Z., Zhang G., Zhang S., Jeong H. Determining the Responsivity of Air-Coupled Piezoelectric Transducers Using a Comparative Method: Theory and Experiments // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 2021. – Vol. 68, is. 10. – P. 3114–3125.

254. Wu Q., Chen Q., Lian G., Wang X., Song X., Zhang X. Investigation of an air-coupled transducer with a closed-cell material matching strategy and an optimization design considering the electrical input impedance // Ultrasonics. – 2021. – Vol. 115, is. 7. – Article number 106477. – 9 p. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0041624X21001104?via%3Dihub> (access data: 03.04.2023).

255. Yang J.-S., Ma L., Chaves-Vargas M., Huang T.-X., Schröder K.-U., Schmidt R., Wu L.-Z. Influence of manufacturing defects on modal properties of composite pyramidal truss-like core sandwich cylindrical panels // *Composites Science and Technology*. – 2017. – Vol. 147, is. 3–4. – P. 89–99.

256. Dolmatov D., Zhvyrblyya V., Sednev D. The development of post-processing algorithm for the ultrasonic evaluation by the application of automated robotic testing systems // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 1019, is. 1: 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019). Tomsk, Russian, October 14–17, 2019. – Article number 012006. – 8 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1019/1/012006/pdf> (access data: 03.04.2023).

Приложение А

(рекомендуемое)

Описание работы программного обеспечения «DeFinder»

Программа Defect Finder (DeFinder) разработана для автоматизированного определения области дефекта в процессе проведения ультразвуковой резонансной лазерной виброметрии для обработки данных вибросканирования. Программа предназначена для обработки графических изображений в формате *.bmp, получаемых при проведении неразрушающих испытаний материалов с использованием лазерной виброметрии. Результатом работы программы DeFinder является изображение дефекта на белом фоне, а также (опционально) измеренная площадь дефекта. Для измерения площади дефекта оператор задает в программе следующую информацию об объекте исследования: длину, ширину или расстояние между условными контрольными метками.

Для написания программы использовалась программная среда C#. Алгоритм работы с программой, приведенный на рисунке А.1, содержит несколько ступеней.



Рисунок А.1 – Блок-схема алгоритма работы программы DeFinder

При загрузке изображений в программное обеспечение каждому пикселю присваивается вес, равный единице. После загрузки изображения, как видно из блок-схемы, в случае необходимости проведения расчета площади дефекта оператору необходимо указать длину образца в соответствующем поле. Для расчета пикселей в указанном диапазоне с помощью специального инструмента оператор указывает расстояние между контрольными метками на графическом изображении. Затем в специальном поле оператор указывает два крайних цвета для построения градиентной палитры: один в центре дефекта, второй в бездефектной области. Далее программа производит расчет плавности перехода цветов для построения палитры цветов дефекта. После построения палитры оператору предлагается ограничить область анализируемых цветов «бегунками». Все пиксели на изображении, имеющие цвета, оказавшиеся между маркерами-«бегунками», заменяются на белый цвет, а их вес обнуляется. Сравнение проводится по трем цветам, так как формат *.bmp работает с пикселями/элементами, несущими значения: R – красный, G – зеленый, B – синий. Изначально программа выбирает наибольший по значению (если он не равен 255) элемент и назначает его «главным». Основное сравнение проводится по значению указанного элемента. В случае если на границе нескольких цветов невозможно определить различие цветов по «главному» элементу, дополнительно проводится сравнение по двум другим цветам. Размер изображения можно ограничить в любой момент выполнения программы. После завершения всех операций пользователю предлагается сохранить итоговое изображение. При выполнении условия заполнения результатов масштабирования изображения программа производит расчет площади дефекта.

Руководство пользователя

При открытии программы пользователю доступен функционал, приведенный на рисунке А.2.



Рисунок А.2 – Главное окно программы DeFinder с выделением основных панелей

Основные функциональные области программного обеспечения DeFinder:

- 1 – область работы с файлом: открытие, закрытие, сохранение;
- 2 – рабочие инструменты: ограничение выделенной области изображения, указание длины исследуемого образца в пикселях;
- 3 – сведения (мм и пикс.) о параметрах элемента и площади дефекта;
- 4 – контрольные метки для построения палитры цветов;
- 5 – палитра цветов с маркерами-ограничителями;
- 6 – ручная подстройка маркеров-ограничителей;
- 7 – зона построения палитры, удаление цветов с заданным коэффициентом размытия.

После запуска программы по нажатию на соответствующий значок в области 1 производится открытие файла, содержащего изображение (виброграмму). Изображение загружается в рабочее поле, как показано на рисунке А.2. В случае если размер изображения не помещается в исходный размер окна программы, в главном окне программы автоматически появляется ScrollBar для пролистывания изображения по горизонтали/вертикали. В случае, когда оператору необходимо произвести расчет площади дефекта, в области 3 в поле «Length, mm» необходимо указать длину или ширину исследуемого образца, либо расстояние между

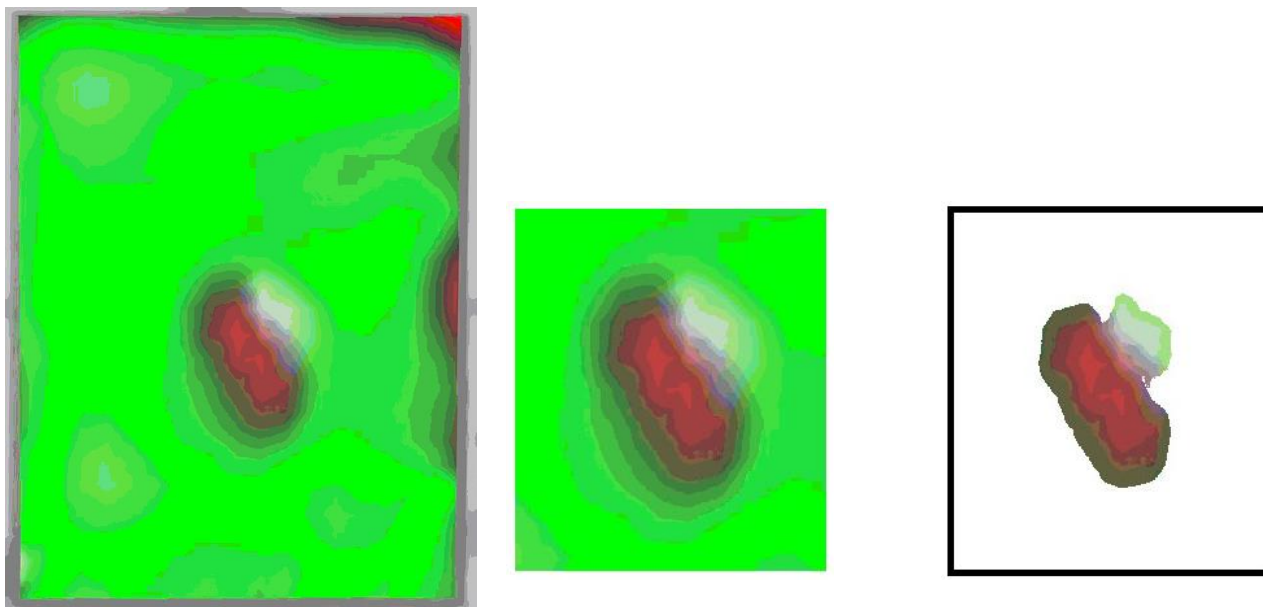
контрольными метками на образце. Указанные данные вносят в программу с использованием инструмента в области 2 или кнопкой «Set length» (область 3). В этом случае в поле выбора инструмента следует подвести мышь к первой контрольной метке на образце, нажать левую кнопку мыши, а затем подвести ее ко второй контрольной метке на образце и отпустить левую кнопку мыши. После этого программа автоматически рассчитает длину обозначенного участка в пикселях. В случае если оператор знает указанное значение, соответствующие данные можно ввести вручную.

Далее производится обработка данных, для чего оператору следует указать границы палитры. Для этого нужно нажать на метку выбора цвета (область 4), а затем выбрать необходимый цвет в палитре и повторно нажать кнопку мыши. Верхняя метка будет соответствовать центральному цвету области дефекта, а нижняя – преобладающему цвету бездефектной зоны. После этого область 5 окрасится в соответствии с выбранным градиентом цветов, предоставив оператору соответствующую палитру.

С использованием маркеров (область 5) оператор может «ограничить» диапазон отображаемых цветов. Для более точного перемещения маркеров следует воспользоваться переключателями в области 6. Погрешность выборки цветов в свою очередь отображается в области 7 (окно Ассигасу). Изменяя указанный показатель, оператор может добиться необходимого размытия границ цветов, если точность используемой палитры является недостаточной для анализа данных.

Для изменения рисунка путем удаления цветов необходимо поставить галочку в строчке «Find Defects» (область 7) и нажать «Calculate». Далее программа проверит цвет каждого пикселя с учетом выбранного диапазона цветов и, в случае если цвет не попадает в диапазон данных, присвоит ему значение белого цвета. Все пиксели изображения, помимо белых, будут использованы при расчете площади дефекта. Результаты расчетов отобразятся в окне «Defect size, mm²» (область 3).

Пример анализа графического изображения (виброграммы) с использованием программного обеспечения изображения DeFinder приведен на рисунке А.3.



a – исходная виброграмма, *б* – ограничение области анализируемого изображения, *в* – определение зоны дефекта

Рисунок А.3 – Пример обработки виброграммы, полученной по результатам лазерной виброметрии, в программном обеспечении DeFinder

Разработанное программное обеспечение защищено свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020612786 от 03.03.2020.

Приложение Б

(справочное)

Копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2020612786

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

<p>Номер регистрации (свидетельства): 2020612786 Дата регистрации: 03.03.2020 Номер и дата поступления заявки: 2020611778 21.02.2020 Дата публикации и номер бюллетеня: 03.03.2020 Бюл. № 3 Контактные реквизиты: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отдел правовой охраны результатов интеллектуальной деятельности, Матвиенко В.В., oporid@tpu.ru, 8(3822)606-494</p>	<p>Автор(ы): Шпильной Виктор Юрьевич (RU), Дерусова Дарья Александровна (RU), Чулков Арсений Олегович (RU) Правообладатель(и): федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)</p>
---	--

Название программы для ЭВМ:

Выявление дефектов и расчет их площади по предоставленному изображению в заданном диапазоне оттенков

Реферат:

Программа предназначена для поиска дефектов на графических изображениях, получаемых в результате работы программного обеспечения трехкомпонентного сканирующего лазерного виброметра PSV-400-3D фирмы «Polytec» (Германия). Результатом работы программы является изображение дефекта(ов) на белом фоне, а также (опционально) площадь этого дефекта. Программа может применяться для обработки изображений, полученных в результате неразрушающего контроля различных объектов. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: - рамочное кадрирование изображения; - попиксельное сравнение цветовых (черно-белых) оттенков с выбранным оператором диапазоном; - обесцвечивание (забеление) бездефектной области; - расчет пиксель-миллиметрового соотношения, исходя из указанных оператором величины (в миллиметрах) и длины отрезка (в пикселях, инструмент в приложении); - расчет площади дефектной области. Тип ЭВМ: IBM PC - совмест. ПК. ОС: Windows XP/2003/Vista/7/8/8.1/10.

Язык программирования: C#, Assembler

Объем программы для ЭВМ: 593 Кб

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020619856

THERMOSON

Правообладатель: *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)*

Авторы: *Суханов Михаил Сергеевич (RU), Вавилов Владимир Платонович (RU), Чулков Арсений Олегович (RU), Дерусова Дарья Александровна (RU)*

Заявка № 2020618598

Дата поступления 07 августа 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 25 августа 2020 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

Приложение В

(справочное)

Акт внедрения и рекомендательные письма ведущих мировых ученых

Акционерное общество
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ
СПЕЦИАЛЬНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ»
(АО «ЦНИИСМ»)

ул.Заводская, д. 34, г.Хотьково, Сергиево-Посадский г.о.,
Московская обл., 141371
тел.8-495-993-00-11, факс 8-496-543-82-94
e-mail: tsnism@tsnism.ru
http://www.tsnism.ru
ИНН/КПП 5042003203/ 504201001

04.04.2023г № 4-VIII/6

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального
директора и главного конструктора
АО «ЦНИИ специального
машиностроения»



А.А. Кульков
2023г.

использования результатов диссертационной работы

Дерусова Дарья Александровна

«Разработка и исследование лазерно-виброметрического метода
неразрушающего контроля полимерных и композиционных материалов с
применением контактных и воздушно-связанных излучателей»
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.2.8 - Методы и приборы контроля и диагностики
материалов, изделий, веществ и природной среды
в АО «ЦНИИ специального машиностроения».

Защита состоится в ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет» (г. Томск)

Комиссия в составе:

Председатель -	Начальник отделения надежности и исследования материалов	В.А. Анискович
Члены комиссии:	начальник отдела главный научный сотрудник ведущий научный сотрудник старший научный сотрудник	А.Н. Рыков О.Н. Будадин Ю.Г. Кутюрин С.О. Козельская

составила настоящий акт в том, что в процессе работ по обеспечению неразрушающим контролем изделий из композиционных материалов на основе термотомографического метода использован способ определения частоты основного резонанса дефектов материала при его ультразвуковой стимуляции для обеспечения наилучшего выявления дефектов на основе создаваемых температурных полей в области дефектов, разработанный в диссертационной работе Дерусовой Д.А.

Начальник отделения надежности и
исследования материалов



В.А. Анискович

Начальник отдела



А.Н. Рыков

Главный научный сотрудник



О.Н. Будадин

Ведущий научный сотрудник

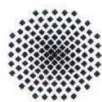


Ю.Г. Кутюрин

Старший научный сотрудник



С.О. Козельская



Universität Stuttgart



Prof. Dr. Igor Solodov

IKT-ZfP Pfaffenwaldring 32 D-70569 Stuttgart Germany

To whom it may concern

Prof. Solodov
 Telefon ++49 711 - 685 62835
 igor.solodov@ikt.uni-stuttgart.de
 Datum 24.07.2014

Letter of recommendation

July 24, 2014

Mrs. Daria Derusova is completing her more than 5 month (March 10 – August 20, 2014) attachment at the Institute of Polymer Technology (IKT), University of Stuttgart, Germany. Over this period of time, she has carried out two major tasks concerned with thermosonic characterization of defects in polymer and composite materials.

Firstly, she has acquired experimental skills and extensive experience of using modern equipment for scanning laser vibrometry and ultrasonic thermography. This enabled her to carry out vast experimental studies of elastic and thermosonic resonance phenomena in defects. The experiments proved that internal friction is the major mechanism of resonant ultrasonic heating defects in homogeneous materials. The use of the resonance enhanced dramatically the efficiency of ultrasonic thermal response of defects which is an important practical outcome of her studies.

Secondly, Daria Derusova gained theoretical knowledge and experience of analytical and computer simulation of elastic and elasto-thermal phenomena. The second task required her learning of fundamentals of the finite element approach and use of Comsol Multiphysics software package. The original results of her both experimental and theoretical studies are presented at the QIRT 2014 conference in Bordeaux, France and published in the Proceedings of this conference. Two other journal papers have also been prepared for publication.

In the course of her stay at the University of Stuttgart, Daria Derusova demonstrated a good deal of hard work, patience, self-sustainability and acquired reliable research and engineering skills.

I am entirely satisfied with her work over the attachment period and express full support in further development of her engineering carrier.


 Igor Solodov

Institut für Kunststofftechnik
 der Universität Stuttgart
 Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart

Prof. Dr., Institute of Polymer Technology (IKT)
 University of Stuttgart, Germany

Telefon: ++49 711 685 - 62835
 Telefax: ++49 711 685 - 64 635
 Internet: www.zfp.uni-stuttgart.de

IKT-ZfP
 Pfaffenwaldring 32
 D-70569 Stuttgart
 Germany



北京航空航天大学

To whom it may concern:

Prof. Guo Xingwang
Beijing 100191, P.R. China
Tel./fax: +86 1082313061
Mobile: +86 13683642305
xingwangguo@buaa.edu.cn
Date: October 14, 2015



Letter of recommendation

Within 1 month (from September 14 to October 14, 2015) Mrs. Daria Derusova visited the laboratory of Infrared Nondestructive Testing, Beihang University for conducting joint experiments for defect detection in composite, wood and metal materials through ultrasonic thermography of the object.

The conducted research has allowed to conduct comparative analysis of efficiency of using high power ultrasonic thermography and low power ultrasonic vibrothermography for impact damage detection in composite materials as well as to evaluate the possibility of using ultrasonic thermography for quality control of metal and wood material. The results of experiments have been prepared for our joint publication.

At the time of her stay at the Beihang University, Daria Derusova demonstrated a good professional and personal skills. I wholeheartedly recommend her and wish her the very best in all future endeavors.

Guo Xingwang

Signature:  

Ph.D, Associate Professor

School of Mechanical Engineering and Automation

Beihang University

P.R.China



Politecnico
di Bari

Department of Mechanics, Mathematics and Management

Politecnico di Bari
V.le Japigia 182, 70126 Bari - Italy

During 18-25 March 2019, Dr. Derusova passed a short scientific exchange at Politecnico di Bari (Italy). She organized a seminar and a lecture for PhD students, teaching staff members and professors of Politecnico di Bari and discussed the results obtained by International laboratory of infrared nondestructive testing in the field of ultrasonic and optical infrared inspection. This collaboration was supported by Erasmus+ KA107 International Credit Mobility program, Key Action 1 (Mobility for learners and staff), and according to the Inter-Institutional Agreement 2017-19 between Politecnico di Bari and the National Research Tomsk Polytechnic University.

During the collaboration with Laboratory of Structural Diagnostic and Thermal Methods headed by Prof. Umberto Galietti, Dr. Derusova have conducted joint experiments on defect detection in carbon fiber reinforced polymer.

This cooperation was beneficial for both Universities and enhanced the scientific activities between two laboratories specialized in infrared nondestructive testing.

Bari, 15/04/2019

Yours



Prof. Michele Ciavarella

Professor of Mechanical Design.

MC lab @ Dept "of excellence" of Mechanics,
Mathematics and

Management. Email: mciava@poliba.it Phone: +39-
080-5962811