Отзыв

официального оппонента

доктора физико-математических наук Скрипняк Владимира Альбертовича

на диссертационную работу Дерусовой Дарьи Александровны

«Разработка и исследование лазерно-виброметрического метода неразрушающего контроля полимерных и композиционных материалов с применением контактных и воздушно-связанных излучателей», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Диссертация Дерусовой Дарьи Александровны посвящена решению актуальной проблемы – разработке теоретических основ метода лазерно-виброметрического неразрушающего контроля (НК) конструкционных материалов с гетерогенной структурой с учётом их физических свойств, геометрии, резонансных и термомеханических явлений в дефектах, использованию разработанных методов для создания оригинальных воздушно-связанных акустических преобразователей с широким диапазоном рабочих частот, для удаленного ввода и регистрации акустических колебаний при минимизации внешних воздействий на исследуемые технические объекты.

Актуальность диссертационной работы сомнения не вызывает.

Исследование принципов резонансной акустической стимуляции дефектов и физических явлений открывает новые возможности для неразрушающего контроля дефектности тонких и хрупких композитов. Данное направление лежит в тренде современных разработок приборов и развития акустических методов неразрушающего контроля, лазерной виброметрии, а также различных отраслей промышленности, включая авиационную и ракетно-космическую технику. Известно, что наличие дефектов в материалах приводит к возникновению аномальных нелинейностей акустических параметров и генерации тепла при акустической стимуляции конструкций.

В диссертации Д.А. Дерусовой решен ряд задач, позволяющих применить метод сканирующей лазерной доплеровской виброметрии и инфракрасной термографии для экспериментального исследования резонансных явлений, возникающих в дефектах гомогенных полимерных и слоистых композиционных материалов. Были разработаны методики применения метода лазерного виброметрического неразрушающего контроля для определения дефектности материалов и объектов космической техники. Разработан способ бесконтактной ультразвуковой стимуляции объектов с использованием воздушно-связанного магнитострикционного преобразователя в сборке с волноводами оптимальной конфигурации. Разработана методика и оборудование для генерации акустических волн в воздушной среде на основе газового разряда при проведении лазерно-виброметрического

неразрушающего контроля. Получены новые результаты исследования электроакустических эффектов, возникающих при протекании тока в газоразрядном излучателе.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, списка литературы, трех приложений, изложенных на 301 страницах машинописного текста, включая 210 рисунков, 15 таблиц, 136 рисунков, трех приложений. Список литературы включает 256 наименований.

Во введении обосновывается актуальность направления исследования, сформированы цели и основные задачи работы, указаны выносимые на защиту положения, а также полученные в диссертации новые научные результаты. Представлено обоснование новизны и практической ценности результатов диссертации, отмечен личный вклад диссертанта в их получении, приведены сведения об апробации работы, приведено краткое содержание разделов и приложений диссертации.

В первой главе представлены результаты анализа перспективных направлений развития и современные методы, разрабатываемые в области лазерной виброметрии и нелинейной акустики, определены возможности их использования для неразрушающего контроля технических конструкций. Показано, что методы лазерной виброметрии расширяют возможности современных методов контроля крупных конструкций из полимерных композитов, а также материалов и ответственных изделий авиационной, транспортной и ракетно-космической техники.

Во второй главе описан лабораторный комплекс, включающий в себя сканирующий лазерный доплеровский виброметр PSV-500-3D-HV (Polytec), генератор сигналов специальной формы, набор ультразвуковых излучателей и инфракрасную камеру. Перечисленное лабораторное оборудование используется для определения амплитудно-частотных спектров колебаний в точках на поверхности контролируемого объекта, виброграмм и термограмм, отображающих распределение амплитуды вибрационного и температурного сигналов на исследуемой поверхности. Описаны научные основы методов акустической стимуляции и лазерного виброскапирования, используемые для регистрации амплитудно-частотных спектров колебаний и исследования резонансных пиков. Представлены результаты, обосновывающие возможность проведения теоретических и экспериментальных исследований термомеханических явлений, возникающих в области дефектов простой геометрической формы в гомогенных материалах, а также резонансные явления в области реальных дефектов в полимерных композитах. Показано, что виброграммы дефектов простой геометрической формы, получаемые с помощью сканирующей лазерной доплеровской

виброметрии (СЛДВ) при резонансной стимуляции, позволяют визуализировать контуры дефектов и, следовательно, применимы для определения их размеров. Результаты, выполненных диссертантом исследований свидетельствуют, о том, что акустическая резонансная стимуляция структурных неоднородностей материалов за счёт активации интенсивных вибраций приводит к локальному тепловыделению в зоне дефектов, причём при резонансных колебаниях открытых дефектов основной вклад вносят деформации изгиба, в то время как резонансные колебания скрытых дефектов сопровождаются деформациями растяжения-сжатия. Полученные новые научные результаты в диссертации расширяют возможности СЛДВ для определения скрытых дефектов в структурно-неоднородных конструкциях и композиционных материалах.

Результаты исследований термомеханических явлений, возникающих в дефектах при резонансной акустической стимуляции, показали, что они в большой степени определяются вкладом резонансных гармоник высшего порядка, отвечающих за распределение резонансных узловых линий и колец по всей площади и на границах дефектов.

В третьей главе представлены оригинальные результаты исследований, выполненных диссертантом, обосновывающие способ НК композиционных и полимерных материалов на основе взаимодополняющего СЛДВ и бесконтактной ультразвуковой стимуляции с использованием магнитострикционного преобразователя и титановых волноводов различной конфигурации. Показано, что разработанный диссертантом воздушно-связанный магнитострикционный преобразователь, позволяет проводить неразрушающий контроль (НК) полимерных композитов на расстояниях до 80 мм от контролируемого изделия при соблюдении условия фазового согласования падающей и отраженной ультразвуковых волн.

В четвертой главе представлены оригинальные результаты исследований газоразрядного излучателя: при пробойном напряжении источника заряда (10-12) кВ излучатель генерирует акустические волны в воздушной среде в импульсном режиме с амплитудами виброперемещений излучающей поверхности порядка 30 мкм. Показано, что 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. Результаты экспериментальных исследований показали возможность проведения НК композиционных материалов с полимерной матрицей с применением воздушно-связанного акустического излучателя газоразрядного типа для обнаружения дефектов.

В заключении сформулированы обобщенные результаты диссертации по разработке математических моделей, численных методов, а также основные результаты исследования наноструктур в газовых средах. Сформулированы наиболее существенные положения работы и выводы проведенных исследований.

В приложениях А, Б, В приведены описание работы программы Defect Finder (DeFinder), разработанной для автоматизированного определения области дефекта в процессе проведения ультразвуковой резонансной лазерной виброметрии при обработке данных виброскапирования, скан свидетельства о регистрации программного комплекса, акт внедрения и рекомендательные письма об использовании результатов диссертационной работы.

Научная новизна диссертации Д.А. Дерусовой заключается:

1. Впервые теоретически и экспериментально исследованы физические феномены, лежащие в основе явления локального резонанса, по трем компонентам колебаний дефектов в гомогенных полимерных и слоистых полимерных композиционных материалах с применением теории упругости и конечно-элементного моделирования, а также с применением метода трехкомпонентной сканирующей лазерной доплеровской виброметрии.
2. Установлены зависимости термо- и виброакустических откликов в дефектах полимерных и композиционных материалов от спектрального состава сигнала возбуждения, используемого для их резонансной стимуляции, позволившие повысить точность НК.
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 разработанном газоразрядном излучателе в ходе его эксплуатации, показало, что амплитуда виброперемещения на мембране излучателя может достигать ~60 мкм при межэлектродном зазоре около 12 мм и приблизительно пропорциональна энергии, запасенной в емкостном накопителе на момент пробоя газоразрядного промежутка. Для

эффективной передачи энергии из области плазмы разряда необходимо регулировать межэлектродный зазор, а электродная система должна иметь объем, меньший объема канала разряда.

5. Предложенный метод электроакустической бесконтактной стимуляции композиционных материалов с использованием разработанного газоразрядного излучателя позволяет осуществить широкополосную акустическую стимуляцию композитов, при которой возникает мультичастотный резонансный отклик исследуемых объектов и их дефектов, а в воздушном пространстве между излучателем и объектом контроля не формируется стоячая волна. Полученные результаты использованы для выработки технологических принципов работы устройств и оценки границ их применимости.

Практическая значимость диссертации Д.А. Дерусовой заключается в следующем:

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

2. Создано устройство бесконтактной стимуляции для лазерного 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 с помощью электро-газоразрядного устройства для задач неразрушающего контроля полимерных и композиционных материалов.

4. Результаты разработки метода СЛДВ в рамках диссертации внедрены в АО «ЦНИИ специального машиностроения».

Обоснованность и достоверность результатов и выводов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается использованием современных методов и высокоточного оборудования СЛДВ, математической корректностью постановок задач анализа виброакустических сигналов, отсутствием противоречий, полученных в диссертации, с физическими представлениями, результатами, полученными другими авторами.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в получении новых результатов о влиянии физических свойств материалов, геометрии

дефектов на виброакустические и термомеханические характеристики, получаемые методом СЛДВ.

Получены теоретические результаты анализа влияния конфигурации титановых волноводов на механические и акустические характеристики воздушно-связанного магнитострикционного преобразователя.

Получены новые данные об эффективности передачи акустической энергии через воздушную среду при использовании воздушно-связанного магнитострикционного излучателя.

Получены новые данные о влиянии конфигурации электродной системы и физических характеристик источника заряда на вибрационные характеристики воздушно-связанного газоразрядного излучателя, диапазон его рабочих частот, спектральный состав сигнала возбуждения, мощность акустического излучения и энергию в импульсе разряда.

Содержание диссертации в достаточной степени отражено в публикациях автора. Результаты опубликованы в 43 печатных работах, включая 28 публикаций, включенных в зарубежные базы цитирования Web of Science, Scopus, 30 статей в изданиях из Перечня рецензируемых научных журналов ВАК, 38 статей в сборниках научных трудов и материалов конференций, реферируемых в РИНЦ, 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Результаты диссертации Д.А. Дерусовой прошли широкую апробацию на Российских и международных конференциях.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

В диссертации Д.А. Дерусовой присутствуют оригинальные научные результаты, **соответствующие паспорту специальности** 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, относящиеся к следующим областям:

- разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений (оригинальная математическая модель, алгоритм и метод решения задачи имитационного моделирования ударно-волнового нагружения тел);
- комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента (развитие метода мезодинамики частиц в сочетании с методом молекулярной динамики и полуэмпирическими методами решения задач квантовой

механики);

- реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента (созданный оригинальный программный комплекс, защищенный свидетельством гос. регистрации).

Основные результаты диссертации Д.А. Дерусовой относятся к следующим **областям исследований, включенным в паспорт специальности** 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды:

П. 1 Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды.

П.3 Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды.

П. 4 Разработка методического, математического, программного, технического, приборного обеспечения для систем технического контроля и диагностирования материалов, изделий, веществ и природной среды, экологического мониторинга природных и техногенных объектов, способствующих увеличению эксплуатационного ресурса изделий и повышению экологической безопасности окружающей среды.

Диссертационная работа Д.А. Дерусовой хорошо структурирована, написана ясным научным языком, в достаточной мере проиллюстрирована.

По содержанию диссертации имеются следующие **замечания**:

1. Отметим, что величины геометрических и физических параметров в натурных экспериментах, всегда измеряются с определенной погрешностью. Следовало бы указать погрешности измеренных параметров (площади дефектов в углепластиковом композите, виброперемещений, виброскорости, массы электродов, толщин мембран), приведенных в главах 3 и 4 диссертации.

2. Диссертация существенно бы выиграла, если бы в ней были расширенно представлены сопоставления результатов НК дефектов в образцах структурно-неоднородных и

композиционных материалов, полученных методом СЛДВ и другими методами, например, методом 3D рентгеновской томографии, методами акустического неразрушающего контроля. Результаты такого сравнения помогли бы обосновать границы эффективного применения развиваемого метода СЛДВ для неразрушающего контроля композитов, в том числе наноструктурных композитов. Приведенное в подразделе 3.4 сравнение результатов неразрушающего контроля композита лен–углерод–лен с использованием лазерной виброметрии и ультразвукового С-сканирования, свидетельствует о сопоставимости результатов НК с точностью до 10 % для частного случая плоского дефекта площадью более 1140 мм^2. Эффективность применения СЛДВ в качестве метода НК для установления наличия дефектов на более низком структурном уровне в ответственных изделиях авиакосмической техники требует дополнительного обоснования.

3. Следовало бы уточнить конкретные классы полимерных конструкционных и композиционных материалов, применительно к которым может быть рекомендован метод неразрушающего контроля на основе сканирующей лазерной доплеровской виброметрии и инфракрасной термографии, изложенный в главе 2.

4. Представленные в диссертации результаты касаются композитов с полимерными матрицами. Возможность применения СЛДВ в качестве метода неразрушающего контроля дефектов в композиционных материалах с металлическими, керамическими и гибридными матрицами в работе не обсуждена. Поэтому, расширение положения о рекомендации метода НК на основе СЛДВ на все классы композиционных материалов не обосновано. Следует учитывать, что в указанных композиционных материалах присутствуют высокомодульные армирующие компоненты. При вибрационных воздействиях могут возбуждаться квазипериодические осцилляции напряжений вдоль границы раздела компонентов, которые могут существенно искажать виброакустические сигналы, что будет затруднять интерпретацию результатов СЛДВ.

Приведенные замечания не снижают высокой оценки диссертационной работы, которая выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной, практической ценностью, является законченной научно-исследовательской работой, удовлетворяющей требованиям «Положение о порядке присуждения ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук НИ ТПУ», предъявляемым к докторским диссертациям.

Таким образом, диссертация «Разработка и исследование лазерно-

виброметрического метода неразрушающего контроля полимерных и композиционных материалов с применением контактных и воздушно-связанных излучателей» по содержанию, объему выполненных исследований, новизне, научной и практической значимости результатов полностью соответствует требованиям, предъявляемыми к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук в соответствии с п. 2.1 Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете, а ее автор, Дерусова Дарья Александровна, заслуживает присуждения ей ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Я, Скрипняк Владимир Альбертович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Дерусовой Дарьи Александровны, и их дальнейшей обработкой.

Официальный оппонент, Скрипняк Владимир Альбертович
11 декабря 2023 г.

доктор физико-математических наук,
профессор,
заведующий кафедрой механики деформируемого твердого тела,
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский государственный университет».
Адрес: Российская Федерация,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36
www.tsu.ru
E-mail: skrp@ ftf.tsu.ru

Подпись Скрипняк Владимира Альбертовича удостоверяю:
Учёный секретарь ученого совета
ФГАОУ ВО НИ ТГУ Сазонтова Наталья Анатольевна

Сведения об организации:
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»; 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36; (3822) 52-98-52; rector@tsu.ru; http://www.tsu.ru.