

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНО-ВИБРОМЕТРИЧЕСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗДУШНО-СВЯЗАННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

© 2021 г. Д.А. Дерусова^{1,*}, В.П. Вавилов^{1,**}, В.О. Нехорошев^{2,***}, В.Ю. Шпильной^{1,****},
Н.В. Дружинин^{3,*****}

¹Томский политехнический университет, Россия 634028 Томск, ул. Савиных, 7

²Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия 634055 Томск, пр. Академический, 2/3

³Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия 634050 Томск, пр. Академический, 2/4

E-mail: *red@tpu.ru; **vavilov@tpu.ru; ***credence@ytomske.ru;

****vshpilnoy@list.ru; *****mikola@sibmail.com

Поступила в редакцию 15.11.2021; после доработки 22.11.2021

Принята к публикации 23.11.2021

Лазерная доплеровская виброметрия нашла применение как в неразрушающем контроле (НК) полимерных композиционных материалов (ПКМ), так и в исследованиях амплитудно-частотных характеристик акустических излучателей в широком спектре частот. Использование воздушно-связанных систем для возбуждения акустических колебаний в исследуемых объектах позволяет осуществлять процедуру контроля качества бесконтактно. 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 настоящей работе исследованы особенности НК композитов бесконтактным способом с применением сканирующей лазерной виброметрии. Приведены результаты НК ударных повреждений в ПКМ с использованием нескольких типов воздушно-связанных систем возбуждения акустических колебаний, а именно, на основе пьезоэлектрического, магнитострикционного и газоразрядного преобразователей.

Ключевые слова: акустика, ультразвук, лазерная доплеровская виброметрия, пьезоэлектрический преобразователь, искровой разряд, термоакустика, магнитострикционный излучатель, неразрушающий контроль, композиционные материалы.

DOI: 10.31857/S0130308221120034

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитострикционные и пьезоэлектрические (ПЭП) преобразователи, состоящие из одного или нескольких электромеханических преобразователей, концентраторов и волноводов, нашли широкое применение в неразрушающем контроле (НК). Конфигурация излучателей позволяет реализовать диагностические устройства, способные обеспечить стабильный акустический сигнал с требуемыми параметрами. Однако, ввиду существенного различия акустического импеданса воздушной среды и исследуемых твердых материалов, для эффективной передачи ультразвука, как правило, используют соединительные среды. На практике это усложняет техническое исполнение устройств, увеличивает стоимость и длительность процедуры диагностики и ограничивает номенклатуру материалов и изделий, подлежащих контролю качества. Более того, после проведения дефектоскопии с использованием соединительной среды необходима постобработка поверхности объектов исследования для их очистки от иммерсионной жидкости с последующей просушкой.

Появление воздушно-связанных ультразвуковых (УЗ) систем в начале 1980-х годов [1—3] привело к разработке новых способов УЗ контроля, которые в настоящее время составили конкуренцию традиционным УЗ системам в различных областях применений [4, 5]. Важной особенностью бесконтактных систем возбуждения является исключение влияния присоединенной массы и отсутствие необходимости использовать жидкий, твердый или гелеобразный иммерсионный слой для ввода акустического сигнала в исследуемый материал [6].

Преимущества бесконтактных УЗ преобразователей способствовали увеличению числа научных исследований в указанной области и разработке новых воздушно-связанных УЗ систем и методов НК, которые различаются по принципу действия и методам генерации УЗ волн в воздушной среде [7—11]. В частности, исследование воздушно-связанных магнитострикционных преобразователей продемонстрировало эффективность работы устройств в сборке с титановыми волноводами различной конфигурации. Согласование магнитострикционного излучателя с нагрузкой при помощи акустических волноводов позволяет повысить мощность полезного акустического

сигнала, однако при этом отмечено снижение достоверности результатов контроля по мере удаления излучателя от контролируемого объекта, что в принципе характерно для бесконтактных систем резонансного типа [12, 13].

В работах [8, 9] приведены характеристики газоразрядных (электротермоакустических, термоакустических) излучателей, в которых акустические колебания возбуждаются в результате теплового расширения газа вследствие протекания тока электрического разряда. Показано, что излучатели отличаются широким частотным диапазоном генерируемых акустических сигналов (до единиц МГц) и могут создавать импульс избыточного давления порядка 136 дБ на расстоянии до 0,4 м [8, 9]. В настоящее время газоразрядные излучатели находятся на стадии разработки, в то время как ПЭП применяют в коммерческих диагностических системах с воздушно-связанным возбуждением [7, 8]. В частности, в работе [7] показана возможность использования роботизированных систем для проведения контроля качества изделий со сложной геометрией.

Таким образом, актуальны разработки как устройств для бесконтактной акустической стимуляции, так и методик НК для их практического применения. Цель настоящей работы — анализ особенностей проведения НК слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) бесконтактным способом при использовании лазерной доплеровской виброметрии и воздушно-связанных систем возбуждения на основе пьезоэлектрического, магнитострикционного и газоразрядного преобразователей.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Независимо от типа системы возбуждения, лазерно-виброметрический НК заключается в регистрации и дальнейшем анализе вибраций на поверхности исследуемого материала, возникающих в процессе акустической стимуляции. Схема лабораторной установки для проведения НК композиционных материалов на основе лазерной доплеровской виброметрии с использованием различных воздушно-связанных УЗ преобразователей приведена на рис. 1.

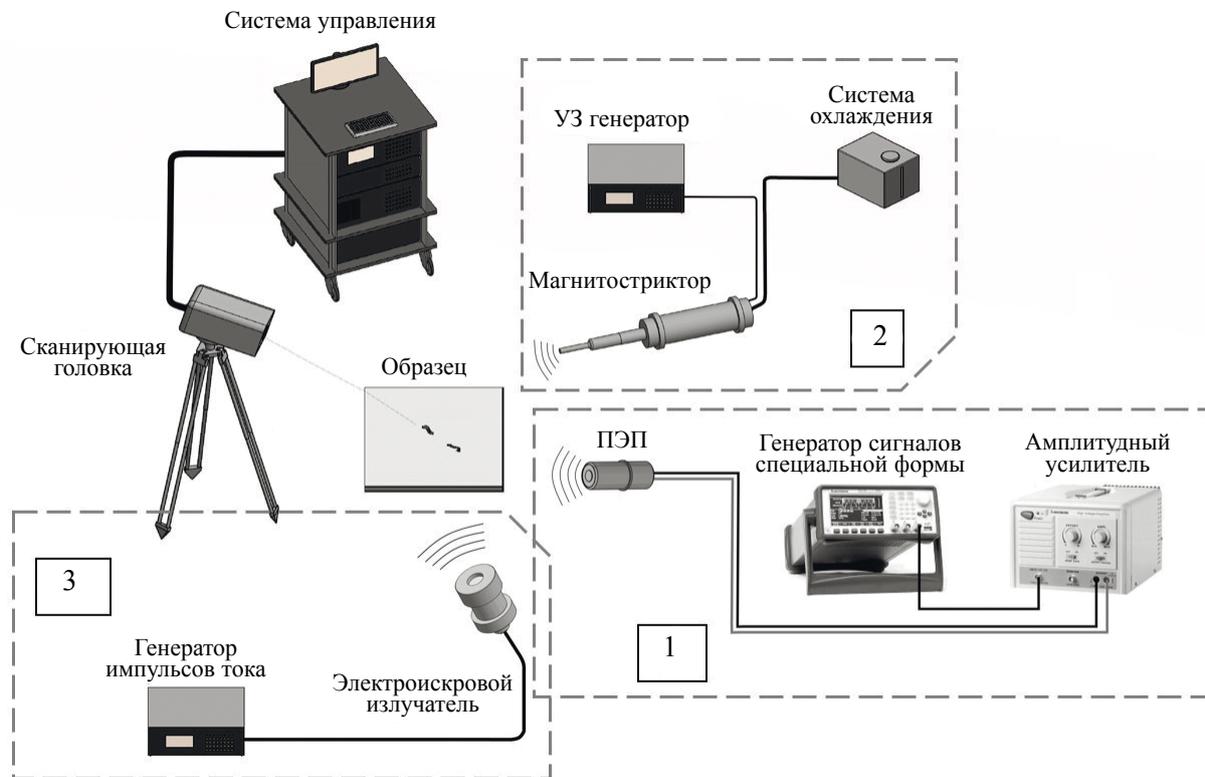


Рис. 1. Лабораторная установка для НК композиционных материалов методом лазерной виброметрии с воздушно-связанной системой возбуждения акустических колебаний (1 — с пьезоэлектрическим преобразователем; 2 — на основе магнитостриктора; 3 — на основе газоразрядного излучателя).

Лабораторная установка включает в себя сканирующую лазерную головку и систему управления доплеровского виброметра PSV-500-3D-HV (Polytec). Результатами сканирования являются амплитудно-частотный спектр вибраций в каждой точке исследуемой поверхности, а также 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 [14—16].

Эксперименты выполняли с различными системами бесконтактной акустической стимуляции на основе УЗ излучателей и генераторов электрических сигналов специальной формы. Контроль качества ПКМ 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, а также определить резонансные частоты и формы колебаний объектов контроля. Шаг сканирования области, включавшей 150×150 точек, был равен 2 мм.

В состав Блока 1 входил 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 рис. 1, 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 представлял собой разработанную авторами 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. Упрощенная схема устройства генерации акустических колебаний на основе импульсного разряда в газе показана на рис. 2. Конструктивная особенность излучателя состоит в том, что объем газоразрядного промежутка отделен от окружающей среды посредством упругой мембраны 4, которая, с одной стороны, является частью обратного токопровода, а с другой — выполняет функцию излучающей поверхности.

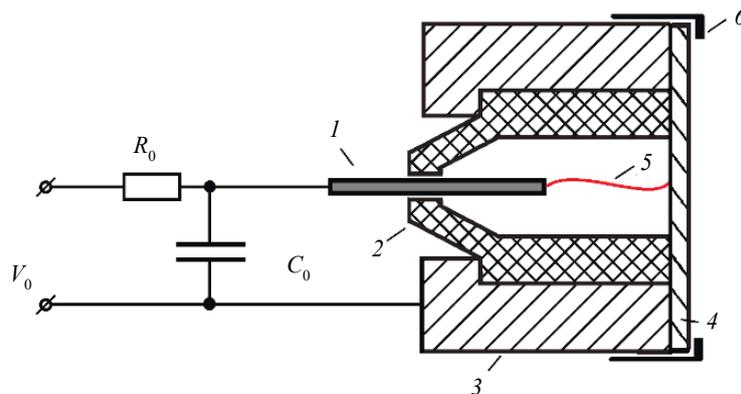


Рис. 2. Схема устройства генерации акустических колебаний на основе искрового разряда:
1 — активный электрод, 2 — изолятор, 3 — корпус (обратный токопровод), 4 — мембрана, 5 — разрядный канал (величина межэлектродного зазора до 12 мм), 6 — прижимной фланец.

Газоразрядный излучатель работает следующим образом. При подаче импульса тока от генератора межэлектродная емкость C_0 заряжается через токоограничительный резистор R_0 . При определенном напряжении в газоразрядном промежутке между электродами 1 и 4 происходит пробой и формируется канал искрового разряда, схематично изображенный на рис. 2 как позиция 5. Образованию и расширению области плазмы разряда сопутствует скачок давления, распространяющийся в объеме газоразрядного промежутка. Под действием скачка давления мембрана 4 отклоняется от положения равновесия. Смещение мембраны и ее релаксационные колебания провоцируют генерацию акустических волн в окружающей среде. По мере разряда емкости C_0 напряжение на газоразрядном промежутке снижается и в определенный момент времени становится недостаточным для поддержания плазмы. Происходит рекомбинация плазмы и обрыв тока через газоразрядный промежуток. Ввиду того, что длительность электрических процессов не превышает нескольких микросекунд, спектр излучаемых колебаний определяется, в основном, частотными характеристиками используемой излучающей поверхности и конструктивными особенностями газоразрядного излучателя.

В данной работе использованы электрод из стали 1 диаметром 1 мм и мембрана 4, 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.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Лазерная виброметрия композиционных материалов с использованием воздушно-связанного ПЭП

На рис. 3 показаны образец из ПКМ с ударным повреждением и воздушно-связанная система для акустической стимуляции на основе ПЭП, входившая в состав Блока 1 лабораторной установки (см. рис. 1). Для возбуждения ПЭП был 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 было 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.



Рис. 3. Акустическая стимуляция углепластикового композита с использованием воздушно-связанной системы на основе ПЭП (расстояние от излучателя до дефекта 10 мм, размеры образца 270×40×1,2 мм).

В результате лазерного сканирования углепластикового композита с ударным повреждением были получены виброграммы (рис. 4).

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 рас-

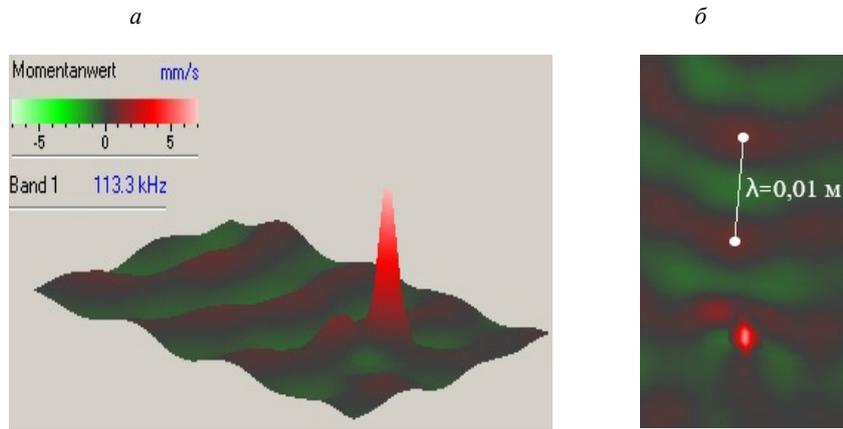


Рис. 4. Виброграммы углепластикового композита на частоте резонанса дефекта в 3D- (а) и 2D- (б) представлениях.

пространяющейся в пластине 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 [14]: $P_{ac} = \frac{\rho \times V_0^2 \times c \times S}{2} = 31$ мкВт.

Аналогичным образом была рассчитана акустическая мощность излучателя при изменении уровня напряжения от 10 до 70 В. На основе полученных данных была выявлена зависимость амплитуды виброскорости в области дефекта и в бездефектной зоне от уровня акустической мощности воздушно-связанного ПЭП при постоянной частоте стимулирующего сигнала (рис. 5), которая составляла 113,3 кГц, что соответствовало резонансу воздушно-связанной системы, образованной излучателем, окружающей средой, исследуемым образцом и дефектом на его поверхности.

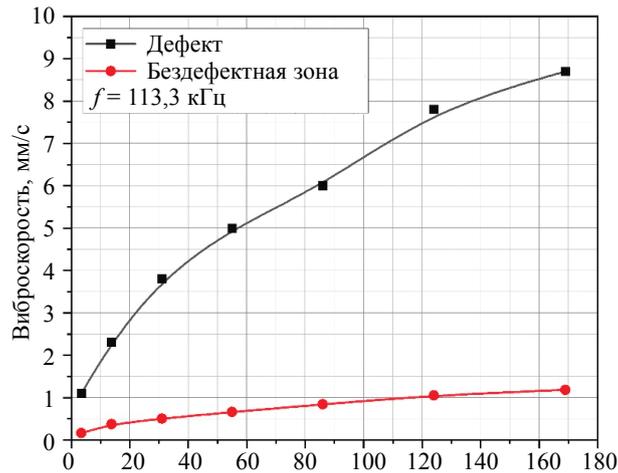


Рис. 5. Зависимость амплитуды виброскорости в области дефекта и в бездефектной зоне от уровня акустической мощности воздушно-связанного ПЭП.

Как видно из рис. 5, при увеличении акустической мощности до 170 мкВт амплитуда колебаний в области ударного повреждения возрастала от 1,1 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 будем характеризовать соотношением 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 составил $V_D/V_0 \approx 7$. 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 , что иллюстрируется рис. 6. В настоящем исследовании частоту сигнала возбуждения f варьировали при постоянной амплитуде выходного напряжения генератора U , в результате чего была получена частотная характеристика чувствительности системы.

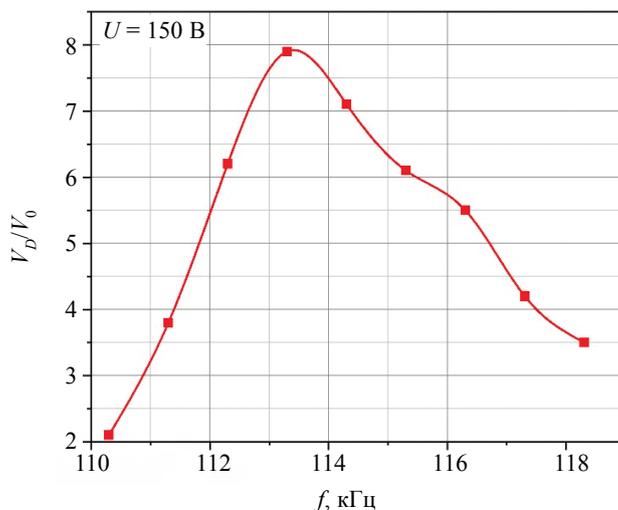


Рис. 6. Частотная характеристика чувствительности системы НК в области резонансного режима работы воздушно-связанной системы ПЭП (амплитуда напряжения на выходе генератора $U = 150$ В).

Из рис. 6 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 УЗ стимуляция с использованием воздушно-связанных ПЭП позволяет обнаруживать дефекты в виде ударных повреждений в ПКМ, однако необходимость точного согласования частоты стимулирующих акустических волн с частотой резонанса дефекта существенно ограничивает их применение в НК материалов и изделий.

3.2. Лазерная виброметрия композиционных материалов с использованием воздушно-связанного магнитоотричного излучателя

Недавние исследования воздушно-связанных излучателей на основе магнитоотричных УЗ преобразователей продемонстрировали возможность их применения в НК, но это достигается преимущественно за счет значительной мощности используемых устройств [17]. Модернизация конструкции волноводов для магнитоотричных излучателей повысила эффективность передачи акустической энергии в исследуемый образец. В частности, использование бесконтактного магнитоотричного излучателя позволило обнаружить ударное повреждение в углепластиковом композите, а также идентифицировать избыточное содержание клея и наличие воды в сотовых авиационных панелях [12].

В настоящей работе была исследована возможность использования воздушно-связанных излучателей на основе УЗ преобразователей магнитоотричного типа для обнаружения ударного

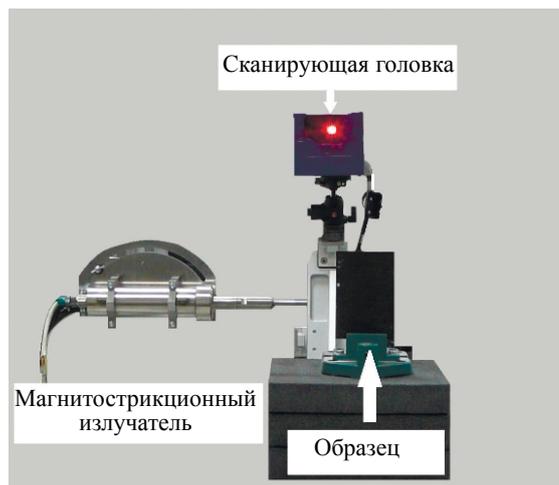


Рис. 7. Установка для НК углепластикового композита с использованием воздушно-связанного магнестрикционного излучателя.

повреждения в тонком углепластиковом композите. Схема эксперимента приведена на рис. 1 (Блок 2), фотография экспериментальной установки приведена на рис. 7.

Система возбуждения обеспечивала бесконтактную УЗ 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 [12]. Амплитудное значение виброперемещения на торце волновода составляло 30 мкм. Виброграмма, отражающая процесс распространения УЗ волны в воздухе от магнестрикционного излучателя, показана на рис. 8.

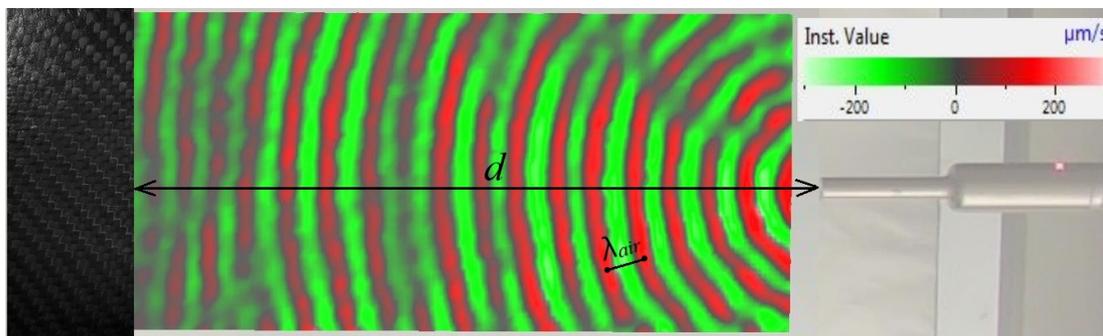


Рис. 8. Виброграмма распространения в воздухе УЗ волны, генерируемой магнестрикционным преобразователем.

При резонансной УЗ стимуляции в воздушной среде между излучателем и объектом контроля происходит наложение падающей на объект контроля и отраженной от него УЗ волн в соответствии с принципом суперпозиции. Возникающие интерференционные явления могут привести как к увеличению амплитуды колебаний в результирующей волне, так и к ее снижению [18]. В работе [19] показано, что регулирование воздушного зазора (d) между излучателем и исследуемым материалом существенно изменяет эффективность передачи ультразвука. Подобные явления в принципе характерны для воздушно-связанных систем возбуждения непрерывного действия. Например, на рис. 9 приведен график распределения амплитуды вибраций, возникающих в воздушной среде между торцом волновода магнестрикционного излучателя и объектом в форме пластины.

Из рис. 9 видно, что амплитуда виброскорости УЗ волны в воздухе спадает неравномерно, поскольку именно интерференция падающей и отраженной волн определяет амплитуду результирующего сигнала. Исходя из теоретических представлений, для достижения оптимального согла-

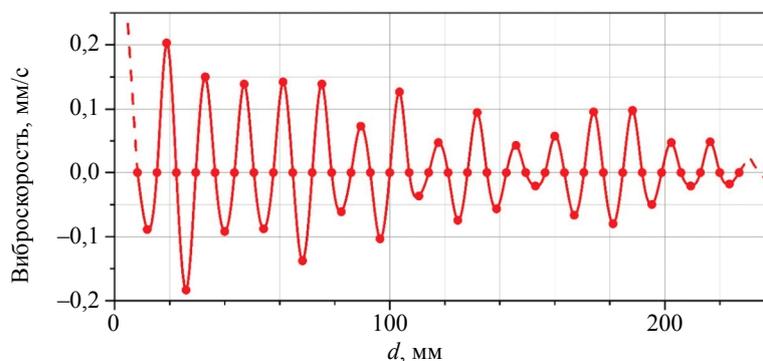


Рис. 9. Распределение амплитуды виброскорости в воздушной среде на различных расстояниях d между излучателем и исследуемым объектом (частота 23 кГц, длина волны 14,3 мм).

сования 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 $n \in N$, что физически означает условие согласования по фазе колебаний в образовавшейся стоячей волне. Это условие подтверждается экспериментально. На рис. 9 показано, 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 [20—22].

С помощью метода лазерной виброметрии были измерены вибрации, возникающие на поверхности углепластикового композита в процессе УЗ магнитострикционной стимуляции. 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 рис. 10 показаны виброграммы, полученные при сканировании на фронтальной ($a, б$) и тыльной ($в, г$) поверхностях образца из углепластика с ударным повреждением.

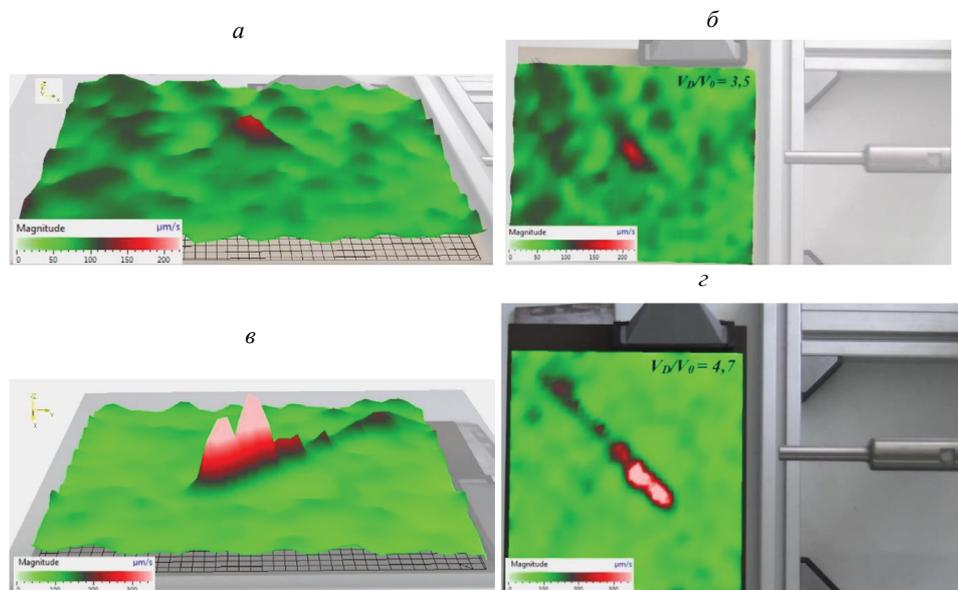


Рис. 10. Виброграммы на фронтальной ($a, б$) и тыльной ($в, г$) поверхностях образца из углепластика, полученные при акустической стимуляции с использованием воздушно-связанного магнитострикционного излучателя (размер образцов $155 \times 175 \times 1,5$ мм, ударное повреждение с энергией 18 Дж — в центре образца).

В результате анализа данных, полученных с помощью лазерной виброметрии, была оценена площадь зоны повреждения. На фронтальной стороне исследуемого образца площадь дефектной зоны составила 950 мм^2 , что меньше оценки, полученной при сканировании тыльной поверхности (1550 мм^2). 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 [23]).

Экспериментально было показано, что использование воздушно-связанного магнитострикционного излучателя для бесконтактной акустической стимуляции позволяет обнаружить дефекты в ПКМ 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 УЗ 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 затрудняет диагностику.

3.3. Лазерная виброметрия композиционных материалов с использованием воздушно-связанного газоразрядного излучателя

На рис. 11 показана фотография воздушно-связанной системы для акустической стимуляции гибридного образца ПКМ «лен—углерод» с использованием газоразрядного излучателя.

Система для генерации акустических колебаний в воздушной среде (Блок 3 на рис. 1) 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.

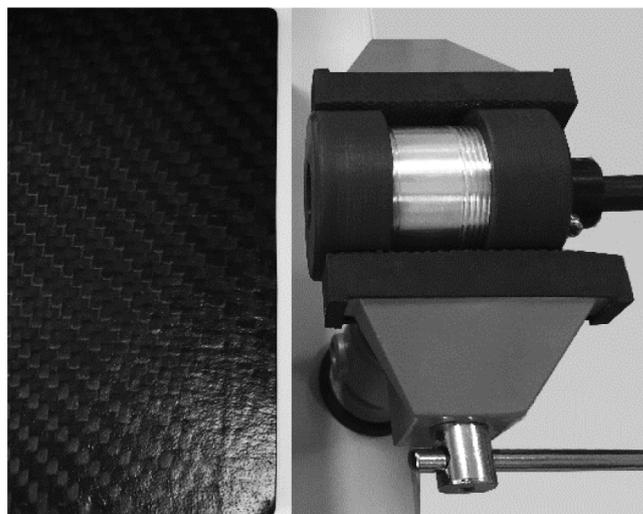


Рис. 11. Акустическая стимуляция гибридного образца «лен—углерод» с ударным повреждением с помощью воздушно-связанной системы на базе газоразрядного излучателя (размер образца $150 \times 100 \times 4 \text{ мм}$, ударное повреждение с энергией 40 Дж — в центре образца).

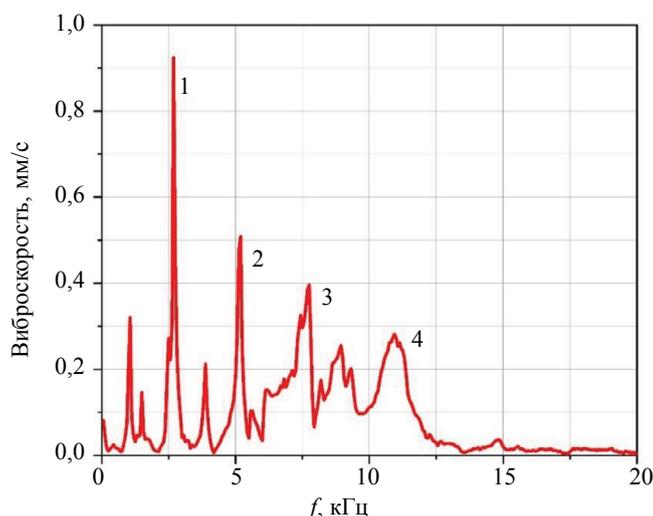


Рис. 12. Спектр вибрационного сигнала в области ударного повреждения гибридного ПКМ «лен—углепластик».

В ходе предварительных экспериментов с использованием лазерной виброметрии была изменена 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 амплитуды виброперемещения поверхности мембраны достигал 20 %, однако это не приводило к значительным искажениям виброграммы при лазерном сканировании.

При проведении НК гибридного ПКМ («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 рис. 12.

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 (1, 2), а другие соответствовали резонансным частотам дефекта в области ударного повреждения (3, 4). Виброграммы, отображающие вибрации поверхности гибридного композита на характерных резонансных частотах (1—4), приведены на рис. 13.

Рис. 13а 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 (см. рис. 13в) и 11,56 кГц (см. рис. 13г) были обнаружены резонансные вибрации в области двух частей ударного повреждения, напоминающих известные «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 был определен в результате анализа виброграммы, полученной при усреднении амплитуды вибраций в диапазоне частот от 50 Гц до 20 кГц (см. рис. 14а).

Для подтверждения результатов лазерной виброметрии в качестве альтернативного метода НК было проведено УЗ С-сканирование с использованием роботизированного дефектоскопа Ideal System 3D (Германия) [24]. Для возбуждения колебаний на частоте 15 МГц использовали специализированный ПЭП диаметром 16 мм. Результаты УЗ сканирования с шагом 1 мм были наложены на фотографию исследуемого гибридного композита (см. рис. 14б). Определенная по результатам виброметрии площадь дефекта составила 800 мм², или 95 % от величины, полученной по результатам С-сканирования.

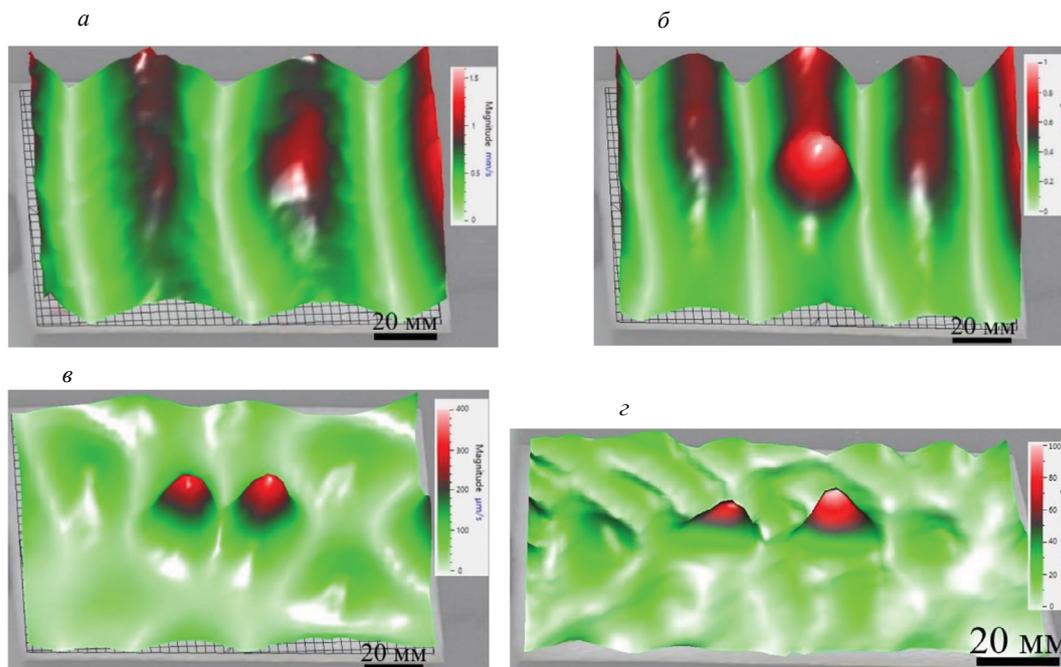


Рис. 13. Оценка ударного повреждения энергией 40 Дж в гибридном композите «лен—углепластик» путем анализа собственных частот образца (a —2,69 кГц; $б$ —5,19 кГц) и резонансных частот дефекта ($в$ —7,69 кГц; $г$ —11,56).

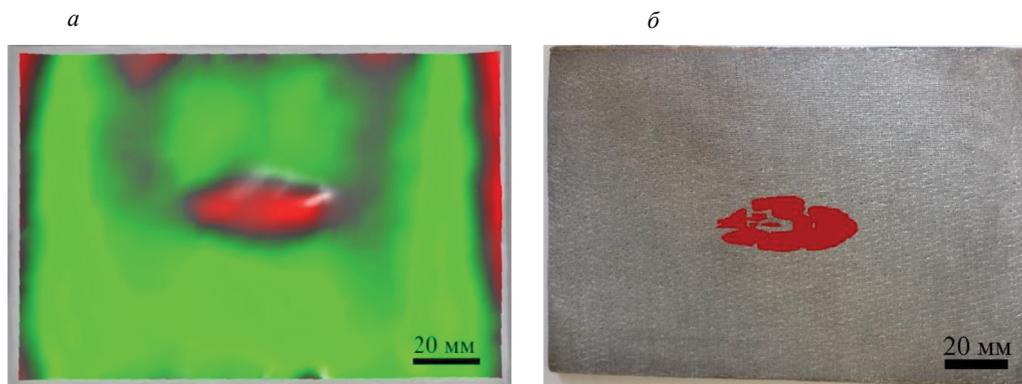


Рис. 14. Сравнительный анализ оценки размеров ударного повреждения в гибридном композите «лен—углепластик» с использованием лазерной виброметрии (a) и УЗ сканирования ($б$).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования выявлены особенности проведения процедуры НК слоистых ПКМ, характерные для различных воздушно-связанных систем возбуждения акустического сигнала. В частности, использование ПЭП, работающего в резонансном режиме, обеспечивает обнаружение дефектов при вводимой акустической мощности на уровне десятков мкВт. Однако в данном случае необходимым условием является соответствие частоты стимулирующих акустических волн частоте резонанса дефекта, что требует проведения предварительного частотного анализа. Преимуществами ПЭП является их технологичность и относительная простота конструкции, тем не менее получение с их помощью мощного широкополосного акустического сигнала, пригодного для бесконтактного возбуждения дефектов в слоистых ПКМ, остается сложной задачей.

Лазерное вибросканирование с использованием воздушно-связанного магнитострикционного излучателя позволило обнаружить ударное повреждение в углепластиковом композите без пред-

варительного анализа резонансных частот дефекта. Это объясняется высокой мощностью вводимого ультразвука, а также наличием высших гармоник и нелинейных явлений, расширяющих спектральный состав сигнала возбуждения.

Общей особенностью систем возбуждения, работающих в непрерывном режиме, является наличие интерференционных явлений в пространстве между излучателем и объектом исследования. Это определяет необходимость обеспечения фазового согласования падающей и отраженной волн в воздушно-связанной системе.

Лазерное вибросканирование углепластикового композита с использованием газоразрядного излучателя обеспечивает широкополосную акустическую стимуляцию объектов контроля, что позволяет проводить спектральный анализ акустического отклика дефектов на частотах до 20 кГц. 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 УЗ преобразователей.

Резюмируя вышеизложенное, следует отметить, что использование бесконтактного режима ввода и регистрации акустического сигнала расширяет возможности диагностики ПКМ и минимизирует внешние воздействия на контролируемые объекты по сравнению с традиционными акустическими методами НК на основе контактных преобразователей. Однако использование бесконтактных излучателей имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при проведении НК.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук МК — 221.2021.4 (результаты по магнитострикционному излучателю), гранта РФФИ № 21-79-00169 (результаты по газоразрядному излучателю) и Госзадания «Наука» № 5.0017.ГЗБ.2020 (методика контроля качества). Авторы выражают благодарность профессору И.Ю. Солодову (Штуттгартский Университет, Германия) за оказанную помощь при проведении исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yano T., Tone M., Fukumoto A.* 1 MHz Ultrasonic Transducer Operating in Air / In: A.J. Berkhout, J. Ridder, and L.F. van der Wal. Eds. *Acoustical Imaging*. Boston, MA: Springer US, 1985. P. 575—584.
2. *Schiller S., Hsieh C.K., Chou C., Khuri-yakub B.* Novel high frequency air transducers / Review of progress in quantitative NDE, 1990, 795.
3. *Hutchins D.A., Schindel D.W.* Advances in non-contact and air-coupled transducers // Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium. 1993. V. 2. P. 1245—1254. DOI: 10.1109/ULTSYM.1994.401811
4. *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. V. 11. Is. 19. Article number 9240. DOI: 10.3390/app11199240
5. *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. V. 68. Is. 8. P. 2749—2759. DOI: 10.1109/TUFFC.2021.3076143
6. *Bernhardt Y., Kreutzbruck M.* Integrated defect sensor for the inspection of fiber-reinforced plastics using air-coupled ultrasound // Journal of Sensors and Sensor Systems. 2021. V. 9. Is. 1. P. 127—132. DOI: 10.5194/jsss-9-127-2020
7. *Marhenke T., Neuenschwander J., Furrer R., Zolliker P., Twiefel J., Hasener J., Wallaschek J., Sanabria S.J.* Air-Coupled Ultrasound Time Reversal (ACU-TR) for Subwavelength Nondestructive Imaging // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2020. V. 67. Is. 3. P. 651—663. DOI: 10.1109/TUFFC.2019.2951312
8. *Daschewski M., Kreutzbruck M., Prager J., Dohse E., Gaal M. und Harrer A.* Resonanzfreie Messung und Anregung von Ultraschall // Technisches Messen. 2015. V. 82 (3). P. 156—66.
9. *Gaal M., Kotschate D.* New technologies for air-coupled ultrasonic transducers // proceedings of 12th ECNDT conference, 2018, Gothenburg, Sweden. Author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/325685745>
10. *Migachev S.A., Kurkin M.I., Smorodinskii Y.G.* Noncontact excitation of sound in metals by a video pulse of electric field // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. V. 52. No. 11. P. 653—6561.
11. *Kachanov V.K., Sokolov I.V., Karavaev M.A., Kontsov R.V.* Selecting Optimum Parameters of Ultrasonic Noncontact Shadow Method for Testing Products Made of Polymer Composite Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 10. P. 831—842.

12. *Derusova D.A., Vavilov V.P., Druzhinin N.V., Kolomeets N.P., Chulkov A.O., Rubtsov V.E., Kolu-baev E.A.* Investigating vibration characteristics of magnetostrictive transducers for air-coupled ultrasonic NDT of composites // *NDT and E International*. 2019. V. 107. DOI: 10.1016/j.ndteint.2019.102151
13. *Shpil'noi V.Yu., Vavilov V.P., Derusova D.A., Druzhinin N.V., Yamanovskaya A.Yu.* Specific Features of Nondestructive Testing of Polymer and Composite Materials Using Air-Coupled Ultrasonic Excitation and Laser Vibrometry // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. V. 57. No. 8. P. 647—655.
14. *Solodov I., Bernhardt Y., Kreuzbruck M.* Resonant airborne acoustic emission for nondestructive testing and defect imaging in composites // *Applied Sciences*. 2021. V. 11. Is. 21. Article number 10141. DOI: 10.3390/app112110141
15. *Solodov I., Dillenz A., Kreuzbruck M.* A new mode of acoustic NDT via resonant air-coupled emission // *Journal of Applied Physics*. 2017. V. 121. Is. 2428. Article number 245101.
16. *Schmerr L.W., Song S.-J.* *Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems*. 1st ed. Boston: Springer, 2007.
17. *Guo X., Zhu L.* Vibro-thermography of calibrated defects in hybrid plates focusing on viscoelastic heat generation // *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2020. Article in press. DOI: 10.1080/17686733.2020.1771528
18. *Solodov I., Döring D., Busse G.* Air-Coupled Lamb and Rayleigh Waves for Remote NDE of Defects and Material Elastic Properties // *Strojniski Vestnik / Journal of Mechanical Engineering*. 2010. V. 56. Is. 9. P. 557—564.
19. *Blum R.* Verfahren zur Erkennung von Spaltern in Span- und MDF-Platten und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens, DE Patent 19519669C1, Germany, 1997.
20. *Pyl'nov Yu.V., Shirkovskiy P.N., Pernod Ph., Preobrazhensky V.L.* Ultrasonic air-coupled wave phase conjugator for the low megahertz frequency range // *Proceedings — IEEE Ultrasonics Symposium*. 2009. Article number 5441902. P. 2611—2614.
21. *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. V. 68. Is. 10. P. 3114—3125. DOI: 10.1109/TUFFC.2021.3084756
22. *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. V. 115. Article number 106477. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106477
23. *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. V. 147. P. 89—99. DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.05.007
24. *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. V. 1019. Is. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/1019/1/012006