

КОНТРОЛЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

© 2022 г. А.Е. Базулин^{1,*}, Е.Г. Базулин¹, А.Х. Вовилкин¹, Д.С. Тихонов¹,
С.А. Смотров^{2,**}, В.И. Иванов^{3,***}

¹ ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+», Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8, Технопарк «Строгино»

² ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФГУП «ЦАГИ»), Россия 140180 Московская область, г. Жуковский, ул. Жуковского, 1

³ ЗАО «Научно-исследовательский институт интроскопии МНПО «Спектр», Россия 119048, Москва, ул. Усачева, 35, стр. 1

E-mail: *bazulin@echoplus.ru; **svetlana.smotrova@isagi.ru; ***ivi444@mail.ru

Поступила в редакцию 23.03.2022; после доработки 24.04.2022

Принята к публикации 06.05.2022

Изучена возможность выявления подповерхностных расслоений в полимерных композиционных материалах (ПКМ), локальных зон с повышенным содержанием пор и внутренних инородных включений (технологических и эксплуатационных дефектов), а также интегральных нарушений структуры (ударных повреждений) путем проведения исследований образцов с искусственными дефектами (плоскостными отверстиями) с использованием ультразвуковых антенных решеток. Показана принципиальная возможность применения антенных решеток с рабочей частотой 10 МГц для обнаружения и оценки параметров несплошностей, размеры которых порядка одного миллиметра. Для повышения качества изображения отражателей применялась процедура декорреляции эхосигналов и анализ когерентного фактора изображений. Приведены результаты контроля образцов ПКМ после нормированных ударов, которые говорят о перспективности применения ультразвукового неразрушающего контроля (УЗК) с использованием антенных решеток (АР).

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы (ПКМ), ультразвуковой неразрушающий контроль (УЗК), дефектметрия, антенная решетка, Full Matrix Capture (FMC), Total Focusing Method (TFM), тройное сканирование, C-SAFT, декорреляция структурного шума.

DOI: 10.31857/S013030822206001X; EDN: BMGAYP

1. ВВЕДЕНИЕ

При изготовлении современных авиационных и космических конструкций в настоящее время все в большей степени применяются полимерные композиционные материалы (ПКМ). Это связано с рядом положительных качеств этих материалов, из которых одним из основных можно назвать высокое соотношение прочность/вес конструкций. Конструкции, изготовленные из ПКМ, по прочности превосходят изделия из металлических сплавов. Сочетание в ПКМ компонентов с разными исходными свойствами позволяет получить требуемые прочностные и весовые характеристики. Это достигается за счет использования разнородных материалов — связующего/матрицы на основе полимерной смолы и армирующего наполнителя в виде высокопрочных/высокомодульных волокон.

С начала применения ПКМ в летательных аппаратах (ЛА) в 1970-х годах объем их использования в авиастроении существенно возрос. Применение ПКМ в производстве авиационной и космической техники дает возможность экономить от 5 до 40 % веса ЛА. Благодаря своим свойствам ПКМ заменили некоторые привычные металлические сплавы. Так, например, в конструкции планера магистрального самолета Boeing B-787 доля ПКМ составляет более 30 %, а в некоторых ЛА доходит до 60 %.

Однако надежность конструкций из ПКМ в ряде случаев уступает надежности металлических конструкций, свойства которых достаточно хорошо изучены. Сложность и неоднородность структуры ПКМ способствует появлению в элементе контроля разнообразных несплошностей (трещины в матрице, разрыв волокон, расслоения, поры и т.п. [1]), которые могут привести не только к ухудшению его прочностных свойств, но и стать причиной разрушения [2—6]. Кроме того, ПКМ подвержены «старению», т.е. под действием внешних нагрузок и факторов окружающей среды склонны к деградации эксплуатационных свойств со временем.

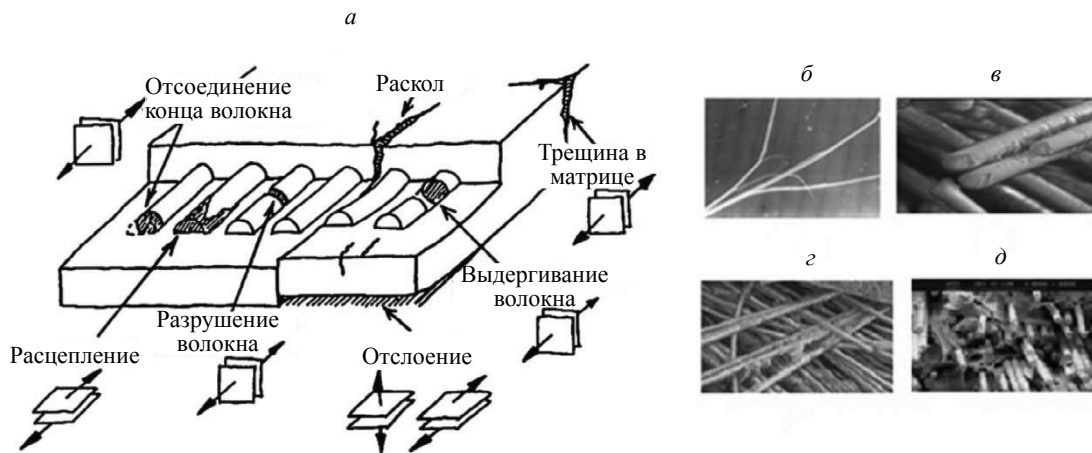


Рис. 1. Возможные виды дефектов (а) и картины разрушения волокон композиционного материала (б—д).

Количество видов несплошностей (повреждений и дефектов) в ПКМ составляет 10-12 наименований, что в несколько раз превышает их число в металлических материалах [7—9]. На рис. 1 показаны основные виды несплошностей в ПКМ.

Нарушение сплошности материала (Тип I — нормальный отрыв), показанные на рис. 1а:

- 1) отсоединение конца волокна; разрушение волокна;
- 2) расслаивание (межслойная трещина или отслоение);
- 3) выдергивание волокна;
- 4) трещина в матрице;
- 5) раскол.

Сдвиговый вид разрушения (Тип II и III — поперечный или продольный сдвиг):

- 6) отслоение;
- 7) раскол;
- 8) расщепление.

Если ПКМ состоит из нескольких слоев, то возникает еще один вид разрушения:

9) расслаивание для многослойных объектов, аналогичное отслоению, которое указано для образца на рис. 1а [7].

На рис. 1 приведены фотографии разрушения волокон и связующего: разрушение арамидных волокон металкой (б); разрушение волокон (в, г); разрушение волокон и связующего (д). Фотографии взяты из разных источников, ссылки на которые приведены в [8].

Несплошности ПКМ классифицируются следующим образом [7]:

по происхождению: 1) в процессе изготовления (производственные дефекты); 2) на стадии хранения; 3) при транспортировке; 4) в процессе эксплуатации (эксплуатационные повреждения);

в зависимости от размера: 1) макронесплошности (свыше 100 мкм); 2) мезонесплошности (60—100 мкм); 3) микронесплошности (до 60 мкм);

по местоположению в объекте: 1) поверхностные; 2) в объеме материала; 3) выходящие на кромку детали;

по глубине залегания;

в зависимости от раскрытия, формы и ориентации по строительным осям детали.

2. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ

В связи с актуальностью проблемы повышения надежности ЛА (вследствие необходимости контроля изменения характеристик конструкции при эксплуатации) встает вопрос НК композитных элементов и агрегатов на всех стадиях жизненного цикла — от проектирования до вывода из эксплуатации. Большое число видов дефектов и повреждений в ПКМ, чрезвычайная сложность структуры этих материалов существенно усложняет процесс выявления несплошностей с использованием методов НК и ухудшает достоверность их обнаружения.

Согласно [9—12], для контроля конструкций из ПКМ предпринимаются попытки использовать такие виды НК, как радиационный, тепловизионный, шерографический, визуально-измерительный, акустическая эмиссия и другие. Всего видов НК, используемых для контроля разнообразных объектов, насчитывается более 10, а методов и методик, детализирующих виды НК, более 50. Однако чрезвычайная сложность структуры ПКМ приводит к тому, что до сих пор не выбран оптимальный метод и методика, которые можно было бы использовать с удовлетворительными результатами для выявления дефектов и повреждений для любых условий эксплуатации композитных авиаконструкций.

Одним из наиболее эффективных методов выявления дефектов и повреждений в ПКМ и измерения их параметров является ультразвуковой неразрушающий контроль (УЗК) [10, 13]. Опыт многолетнего промышленного использования УЗК в различных отраслях доказал его хорошую чувствительность, высокую точность измерения параметров различных несплошностей (трещин, расслоений, пор, других дефектов и повреждений), возможность использования в различных ситуациях, включая контроль в полевых условиях. Согласно [7], акустические методы (УЗК и АЭ) являются самыми распространенными методами для выявления наибольшего числа несплошностей в ПКМ при разнообразных условиях контроля. Для контроля композитных конструкций применяется также импедансный метод [14], методы, использующие прямые совмещенные и раздельно-совмещенные преобразователи, а также методы, основанные на особенностях распространения в объекте контроля волн Лэмба [13, 15—17], методы лазерной виброметрии [18]. После внедрения технологии фазированных антенных решеток для УЗК объектов из металла решение задачи дефектометрии вышло на новый уровень [19]. В результате исследователи получили возможность перейти к решению задачи диагностики изделий из ПКМ с оценкой риска аварии.

Диапазон частот ультразвуковых колебаний при использовании УЗК лежит в пределах от 50 КГц до 25 МГц, что позволяет контролировать объекты с высоким затуханием ультразвуковых волн (низкочастотный диапазон от 50 КГц до 1,0 МГц) и выявлять несплошности весьма малых размеров (диапазон частот выше 5 МГц). Поэтому важной задачей НК в настоящее время является определение возможностей применения пьезоэлектрических антенных решеток (АР) при обнаружении и измерении параметров дефектов в конструкциях из ПКМ. Применение АР вместо одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) позволяет обеспечить предельную фокусировку порядка длины волны волны по всей области восстановления изображения отражателей и повысить скорость сканирования, так как в направлении расположения элементов АР ее можно перемещать с шагом 10 и более миллиметров. Применение фокусирующих ПЭП позволяет повысить разрешающую способность изображения, но только в области фокуса. Для получения предельной фокусировки изображения по всей глубине объекта контроля система сканирования должна перемещать фокусирующей ПЭП перпендикулярно поверхности объекта контроля, что усложняет конструкцию системы сканирования и увеличивает время сканирования.

Задача выбора наиболее подходящего метода НК и методик дефектометрии композитных конструкций продолжает оставаться актуальной, и поэтому необходимо проводить большой объем поисковых работ для выбора оптимального метода и методики. В данной статье приведены результаты изучения возможности выявления подповерхностных расслоений в полимерных композиционных материалах (ПКМ), локальных зон с повышенным содержанием пор и внутренних инородных включений (технологических и эксплуатационных дефектов), а также интегральных нарушений структуры (ударных повреждений) путем проведения исследований образцов с искусственными дефектами (плоскодонными отверстиями) с использованием АР на 10 МГц.

3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЯ МЕТОДОМ ЦФА

В настоящее время в УЗК широкое применение нашли две технологии восстановления изображения отражателей с использованием АР: фазированные антенные решетки (ФАР) [20, 21] и цифровая фокусировка антенной решетки (ЦФА) [22]. В работе [23] обе технологии сравниваются и делается вывод о том, что ЦФА-технология более перспективна в плане применения разнообразных алгоритмов восстановления изображений несплошностей — акустических отражателей.

На первом этапе ЦФА-технологии регистрируются эхосигналы для всех комбинаций излучатель—приемник элементов АР. Такой режим называется режим двойного сканирования (в зарубежной литературе: Full Matrix Capture — FMC [24]). Набор эхосигналов при излучении одним элементом АР называется «выстрелом», а набор эхосигналов по всем «выстрелам» будем называть «залп». На втором этапе по измеренным эхосигналам методом комбинационного SAFT (C-SAFT) [25] восстанавливается изображение отражателей. В зарубежной литературе используют название

Total Focusing Method — TFM [26]. Метод ЦФА позволяет восстановить изображения отражателей с лучшей для линейных методов фокусировкой во всех точках области восстановления изображения (ОВИ). Совместная обработка эхосигналов, измеренных АР при перемещении ее в направлении, например, поперечном сварному соединению, понижает уровень шума и повышает фронтальную разрешающую способность изображения. Такой метод получения изображения будем называть далее ЦФА-Х.

4. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Поисковые эксперименты по применению метода ЦФА-Х для НК образцов ПКМ проводили с использованием дефектоскопа «АВГУР-АРТ²⁰²⁰» [27]. На рис. 2 показана блок-схема экспериментальной установки, состоящей из электронного блока, иммерсионной ванны, двухкоординатной системы сканирования с механизмом фиксации, позволяющим выбрать нужные углы наклона АР к плоскости образца. На рис. 3 показана фотография экспериментальной установки. Ультразвуковые эхосигналы регистрировали с использованием 16-элементной АР с рабочей частотой 10 МГц. Для выполнения поисковых экспериментов применяли образцы углепластиков двух типов: с плоскдонными отверстиями и с нормированным ударным повреждением.

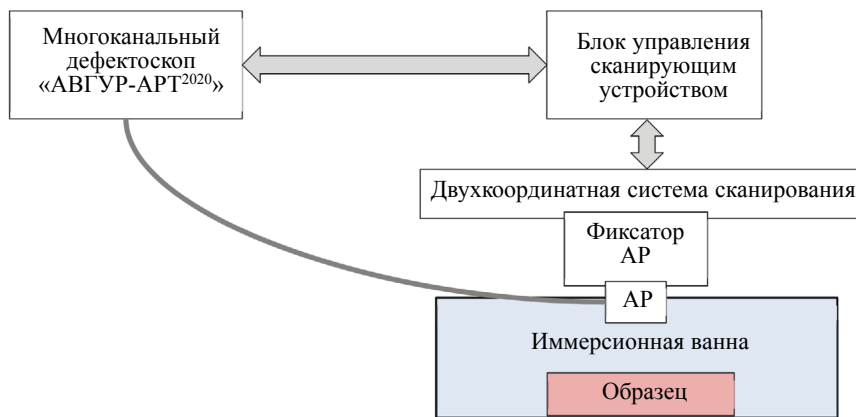


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки.

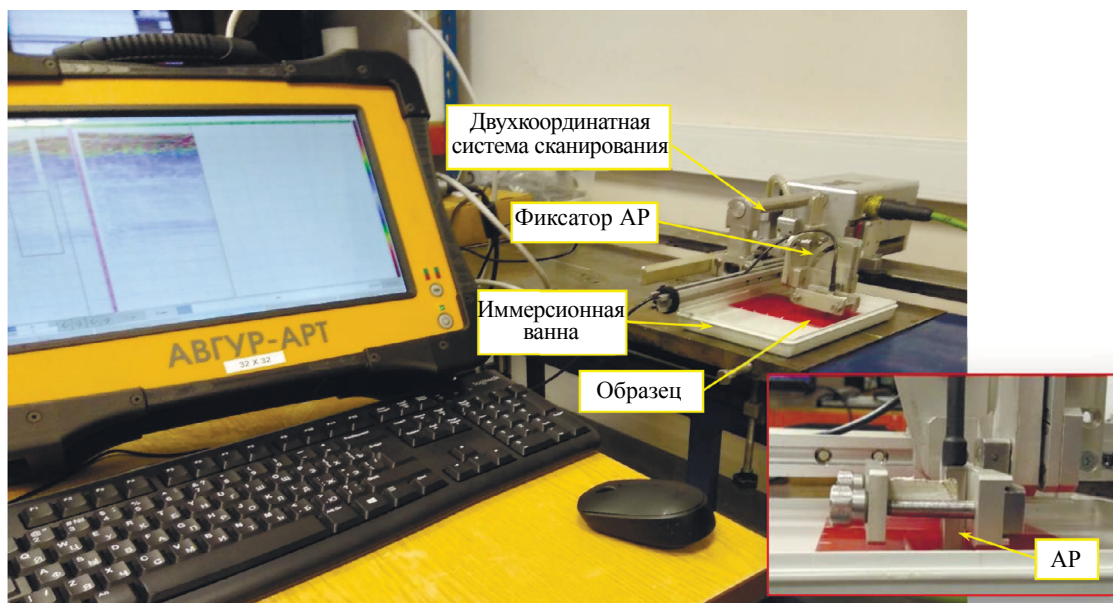


Рис. 3. Фотография экспериментальной установки.

4.1. Образец с плоскодонными отверстиями

Образцы в виде пластин из различных пластиков (стекло-, угле-, органопластики и др.) с глухими плоскодонными отверстиями (ПДО) являются стандартными образцами для моделирования несплошности типа «непроклей/расслоение», составляющие вторую группу по степени опасности, связанной с относительным снижением прочности ПКМ. В качестве дополнительных требований к стандартным образцам выступают следующие условия [28]:

обеспечение близости величин толщин обшивок к значениям толщин натуральных панелей, что позволяет осуществить проверку не только поведения монослоя материала, но и совокупности монослоев в композитных пакетах с различными укладками и количеством слоев;

наличие схем типовых укладок, в которых ориентация волокон наиболее полно отражает работу натурной конструкции.

На рис. 4 показана фотография обратной стороны настроечного углепластикового образца АП-13 размерами $x \times y \times z = 150 \times 100 \times 6$ мм после изготовления в нем ПДО диаметром 8, 4, 2 и 1 мм с разными глубинами засверловки 4, 2 и 1 мм. Образец вырезан из подкрепленной стрингерами углепластиковой панели. На лицевую сторону образца нанесено типовое лакокрасочное покрытие на основе полиуретановой эмали PPG Aerospace CA40000RAL3000 (огненно-красный цвет). Укладка многослойного армирующего наполнителя (углеродного полотна) квазиизотропная. Остатки полок стрингеров расположены вдоль длинных сторон образца. В центре образца АП-13 вдоль оси x его толщина равна 5 мм, а по краям — 6,5 мм. Скорость продольной ультразвуковой волны, измеренная толщиномером, равна 3 мм/мкс (3 км/с).

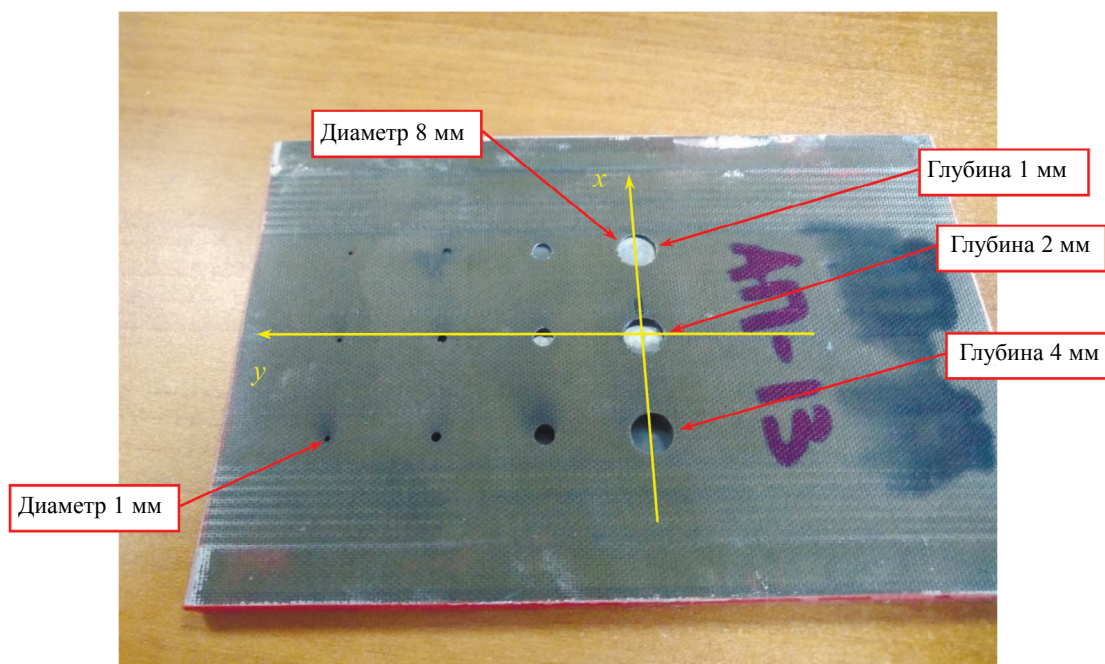


Рис. 4. Фотография обратной стороны образца АП-13 с 12 ПДО разного диаметра с разными глубинами засверловки.

4.1.1. Зарегистрированные эхосигналы

На рис. 5 в растровом виде показаны эхосигналы при сканировании по оси x с шагом 1 мм над ПДО диаметром 2 мм (см. рис. 4). Хорошо видны эхосигналы, отраженные от поверхности и дна образца АП-13, от ПДО диаметром 2 мм с глубинами засверловки 1 и 2 мм. По эхосигналам от поверхности можно сделать вывод, что образец установлен непараллельно линии перемещения АР и это обстоятельство в дальнейшем учитывалось при восстановлении ЦФА-Х-изображения отражателей. Эхосигналы дна повторяют неровную форму дна образца АП-13. Наличие армирующего углеродного наполнителя с квазиизотропной укладкой приводит к многократному переотражению

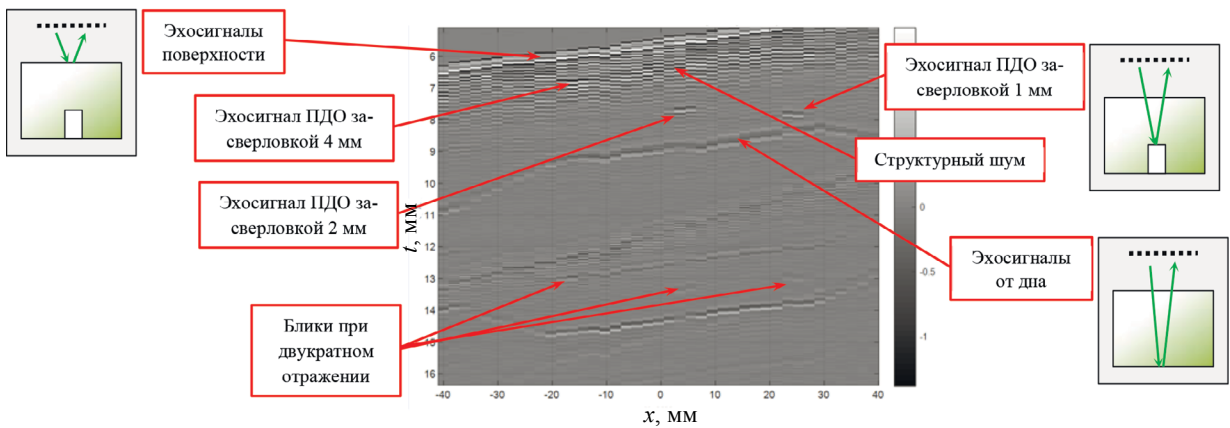


Рис. 5. Эхосигналы ПДО диаметром 2 мм на разных глубинах засверловки; пиктограммами схематически показаны лучи, формирующие эхосигналы.

и рассеиванию ультразвуковых импульсов. В результате возникает структурный шум, на фоне которого эхосигналы ПДО диаметром 2 мм с засверловкой на глубину 4 мм практически незаметны. Уменьшение уровня структурного шума у дна углепластикового образца можно объяснить тем, что из-за многочисленных отражений и затухания между слоями ПКМ амплитуды эхосигналов значительно уменьшаются.

4.1.2. ЦФА-Х-изображения

4.1.2.1. ПДО диаметром 2 мм

На рис. 6 показано ЦФА-Х-изображение ПДО засверловкой на глубину 4 мм. На рисунке линиями красного цвета нанесены границы образца АП-13 и ПДО. В отличие от изображения, приведенного на рис. 5, блик ПДО засверловкой глубиной 4 мм уверенно можно обнаружить по критерию превышения его амплитуды на 6 дБ по отношению к структурному шуму. Это объясняется тем, что восстановление изображения отражателей методом ЦФА-Х повышает отношение сигнал/шум даже для структурного шума, хотя не так эффективно как для «белого» шума [29].

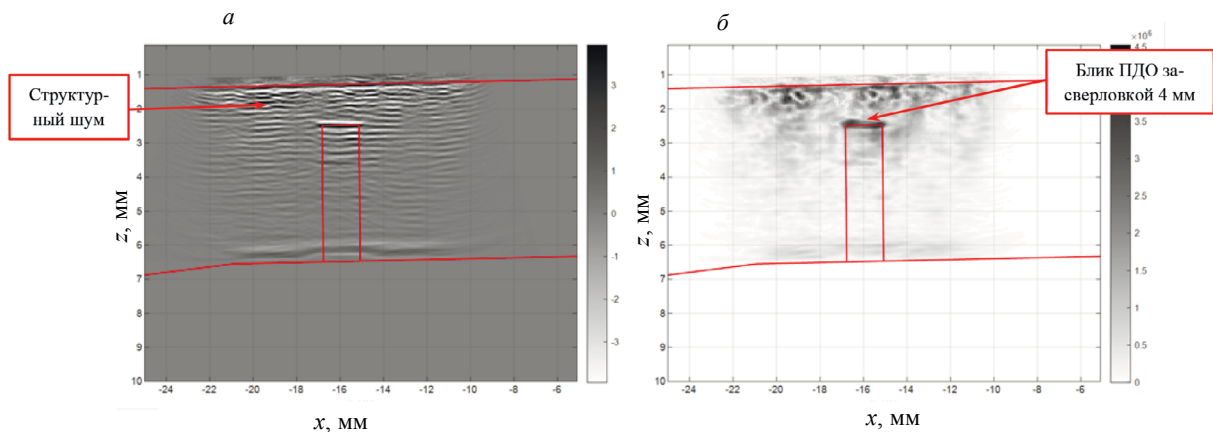


Рис. 6. ЦФА-Х-изображение ПДО засверловкой на глубину 4 мм:
a — реальная часть изображения (контрастность 0,5); *б* — модуль изображения (контрастность 1).

На рис. 7 представлена реальная часть ЦФА-Х-изображения ПДО диаметром 2 мм. Контрастность изображений равна 0,5. Блики ПДО уверенно видны, поэтому можно утверждать, что предложенный подход позволяет уверенно обнаруживать ПДО диаметром 2 мм по всей толщине образца.

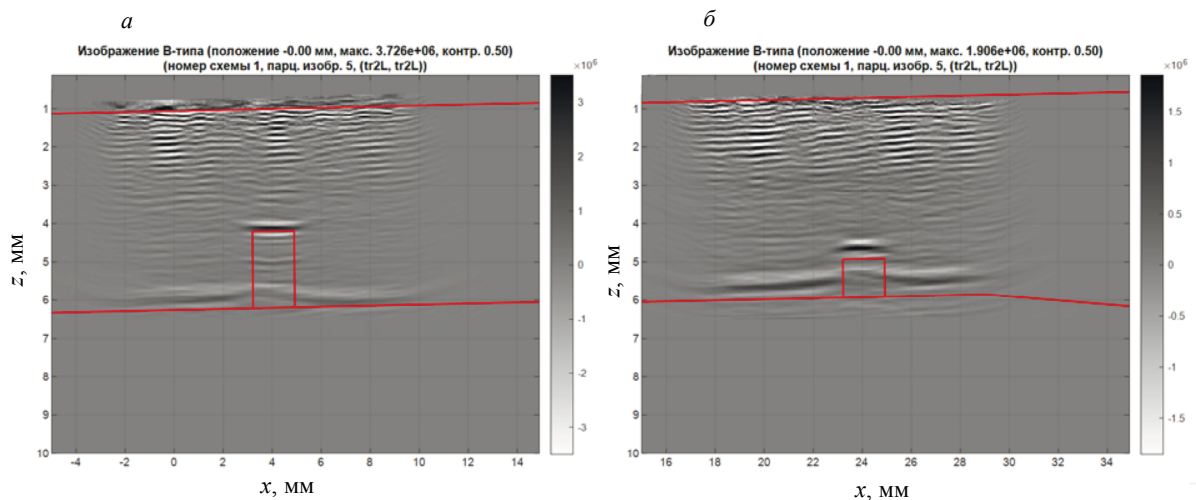


Рис. 7. Реальная часть ЦФА-Х-изображения ПДО диаметром 2 мм:
a — засверловка на глубину 2 мм; *б* — на глубину 1 мм.

4.1.2.2. ПДО диаметром 1 мм

На рис. 8 показана реальная часть ЦФА-Х-изображения ПДО диаметром 1 мм и дна образца. Видно, что блики ПДО обнаружить сложно по причине того, что эхосигналы от вершин ПДО уменьшили амплитуду сигнала, а их блики на изображении стали соизмеримы с амплитудой структурного шума.

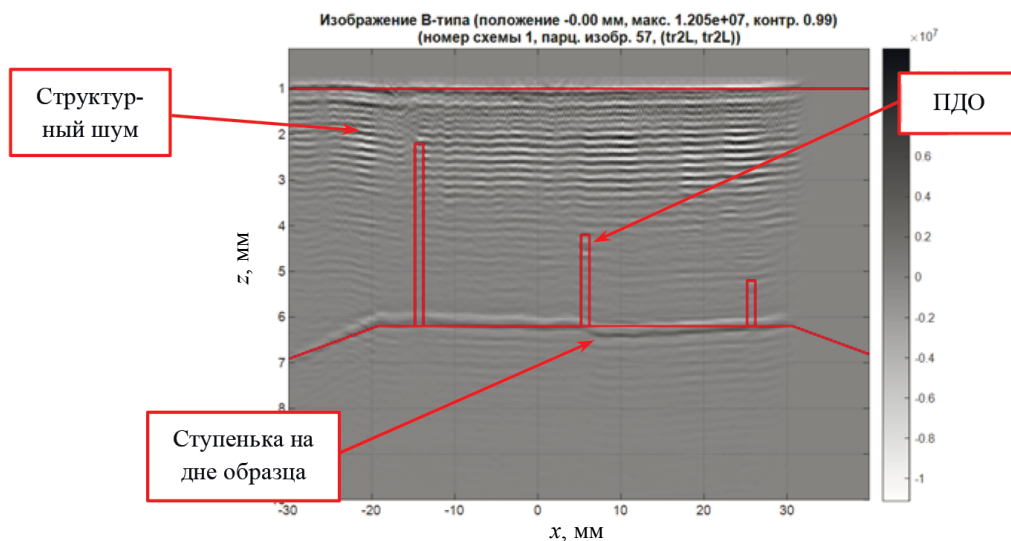


Рис. 8. Реальная часть ЦФА-Х-изображения ПДО диаметром 1 мм и дна образца АП-13.

Известно, что для уменьшения уровня структурного шума разработаны различные подходы: процедура декорреляции [30], восстановление изображений отражателей с учетом перерассеивания [31], восстановление изображений отражателей при решении обратной коэффициентной задачи [32]. На рис. 9*a* показан модуль изображения ПДО диаметром 1 мм с засверловкой глубиной 2 мм. Ближ ПДО формально не обнаружен, так как его амплитуда примерно на 4 дБ превышает уровень шума. На рис. 9*б* справа показано изображение, восстановленное по декоррелированным эхосигналам, по которому уже можно обнаружить блик ПДО.

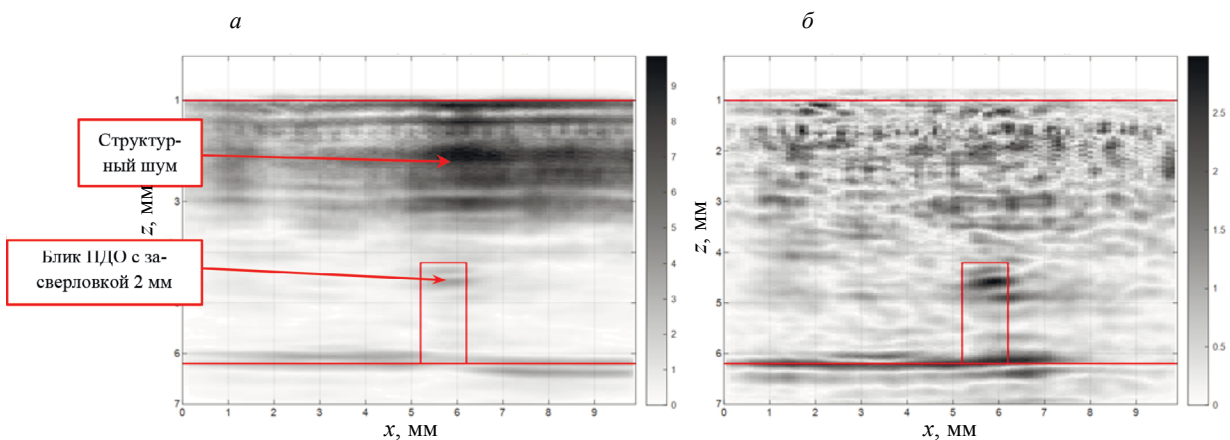


Рис. 9. Исходное ЦФА-Х-изображение ПДО диаметром 1 мм с засверловкой глубиной 2 мм: *a* — исходное изображение; *b* — восстановленное по эхосигналам изображение после процедуры декорреляции.

Для дополнительного повышения качества ЦФА-Х-изображения можно формировать изображения с учетом когерентного фактора [33]. На рис. 10 блик ПДО можно уверенно обнаружить, так как его амплитуда после дополнительной обработки более чем на 12 дБ превышает уровень структурного шума. Отметим, что на поверхности образца АП-13 стал заметен блик от пузырька газа, так как в иммерсионную ванну при выполнении экспериментов заливалась недегазированная вода. Кроме того, на глубине около 1,5 мм наблюдается регулярная структура бликов с периодом около 0,5 мм, связанная с расположением углеродных волокон наполнителя.

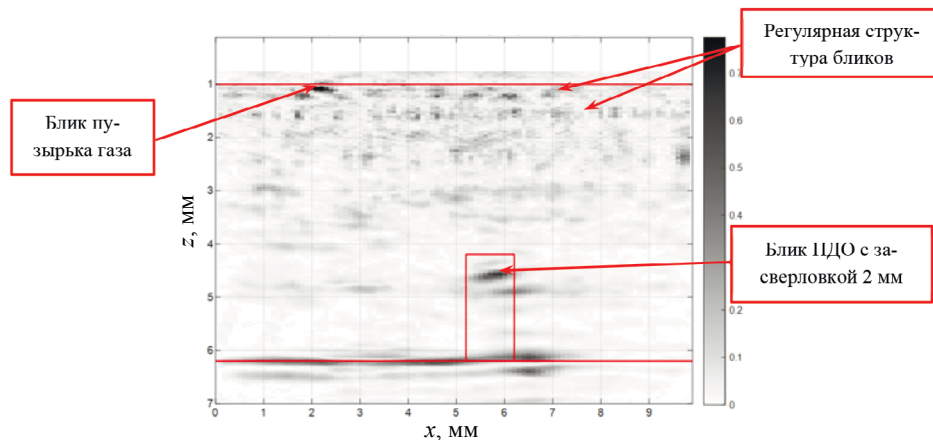


Рис. 10. Исходное ЦФА-Х-изображение ПДО диаметром 1 мм с засверловкой на глубину 2 мм, восстановленное по эхосигналам после процедуры декорреляции и с учетом когерентного фактора.

4.1.2.3. Восстановление трехмерного изображения образца

К сканированию вдоль оси x было добавлено сканирование вдоль оси y с шагом 2 мм. Как упоминалось ранее, для восстановления изображения нужно получить информацию о форме образца и учесть ее при формировании ЦФА-Х-изображения. Используя информацию о времени прихода импульса, отраженного от поверхности образца АП-13, можно восстановить форму плавно меняющейся поверхности (рис. 11) и далее учесть это при восстановлении изображения отражателей (несплошностей).

На рис. 12 приведены изображения всех типов (В, С и D) внутренней структуры образца и срез изображения вдоль оси z , перпендикулярной поверхности образца. Изображения В-типа показывает срезы в плоскости xz (см. рис. 4), D-типа — в плоскости yz , а С-типа — в плоскости

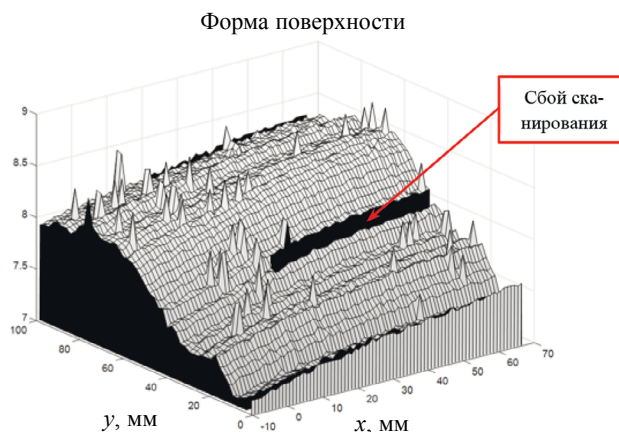


Рис. 11. Профиль поверхности объекта контроля.

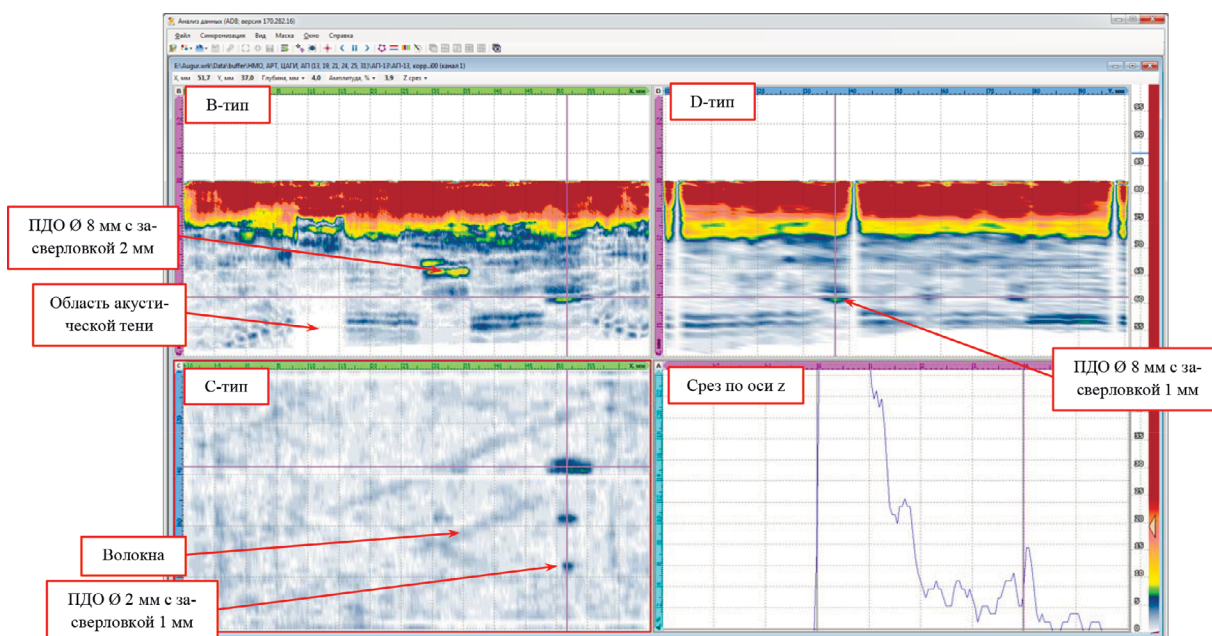


Рис. 12. ЦФА-Х-изображения В-, С- и D-типа внутренней структуры образца АП-13.

ху. На изображении В-типа можно наблюдать блики ПДО диаметром 8 мм с глубиной засверловки 2 и 1 мм. От ПДО диаметром 8 мм с засверловкой 4 мм хорошо видна акустическая тень, наличие которой можно использовать для определения размеров отражателя. Этот принцип подобен работе с радиолокационной тенью при обнаружении самолетов с малой радиолокационной заметностью. На изображении D-типа видны блики ПДО диаметром 8, 4 и 2 мм с засверловкой 1 мм, а на изображении С-типа можно наблюдать блики ПДО диаметром 8, 4 и 2 мм с засверловкой 1 мм.

На рис. 13 показано ЦФА-Х-изображение С-типа, полученное следующим образом. Из полного изображения (в виде куба чисел) была выделена трехмерная область с бликом дна. Для получения объединенного двумерного изображения С-типа из трехмерного изображения для каждой точки $xу$ оставалось максимальное значение вдоль оси z . Такую операцию будем называть объединение по максимуму вдоль оси z . Контрастность изображения была увеличена на 6 дБ. На рис. 13 на блике дна образца хорошо видны акустические тени ПДО диаметром 8, 4 и 2 мм на любых глубинах засверловки. Тени ПДО диаметром 1 мм обнаружить не удастся. На рисунке видны две горизонтальные линии, возникшие из-за сбоя при сканировании.

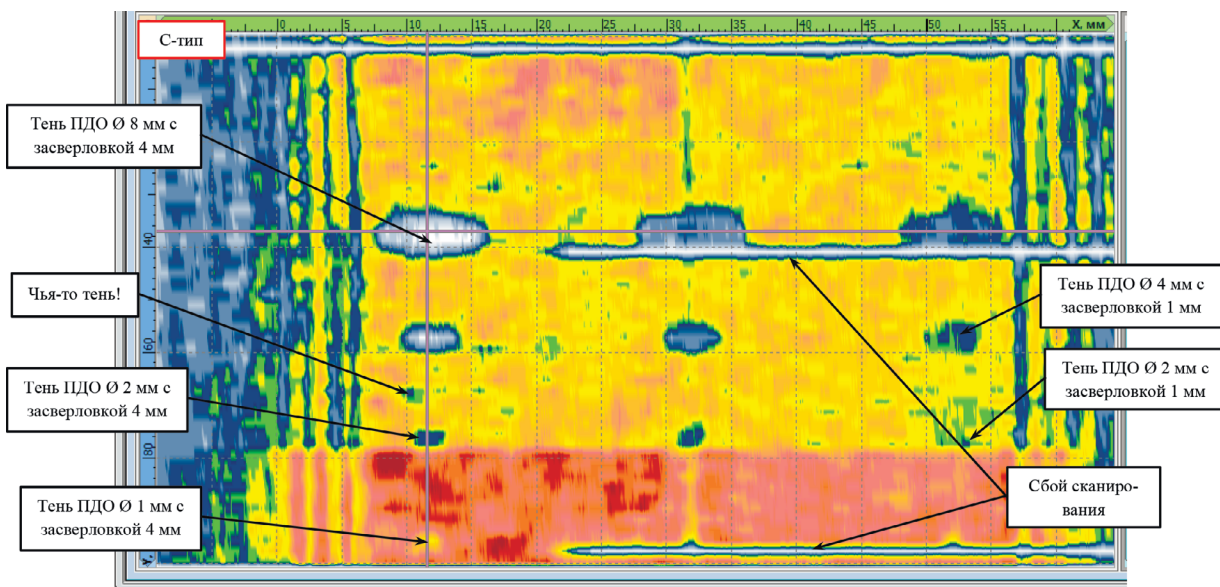


Рис. 13. ЦФА-Х-изображение С-типа, объединенное по максимуму вдоль оси z .

4.2. Образец с ударными повреждениями

Образцы с нормированными ударными повреждениями используют для определения прочности на сжатие после повреждения (удара) согласно [34]. На первом этапе образец для испытаний подвергают воздействию поперечного, локального удара с помощью копра — установки для испытания на удар падающим грузом с полусферическим индентором. На втором этапе устанавливают тип повреждения после удара методом неразрушающего контроля (этой проблеме и посвящена статья) и измеряют глубину вмятины после удара. На третьем этапе к образцу для испытаний прикладывают сжимающую нагрузку до разрушения. Вычисляют предел прочности при сжатии после удара, модуль упругости при сжатии после удара и продольную деформацию при сжатии после удара.

Нормированные ударные повреждения наносились, в соответствии с методикой, стальным цилиндрическим бойком массой $5,50 \pm 0,25$ кг с гладким полусферическим наконечником диаметром $24,5 \pm 0,1$ мм на испытательном копре с вертикально падающим грузом INSTRON Dynatur 9250HV. При этом для крепления образцов при выполнении экспериментов использовали специальное зажимное приспособление для испытаний на удар падающим грузом, показанное на рис. 5, по ГОСТ 33844—2016 [34]. На рис. 14 показана фотография углепластикового образца АП-12 с

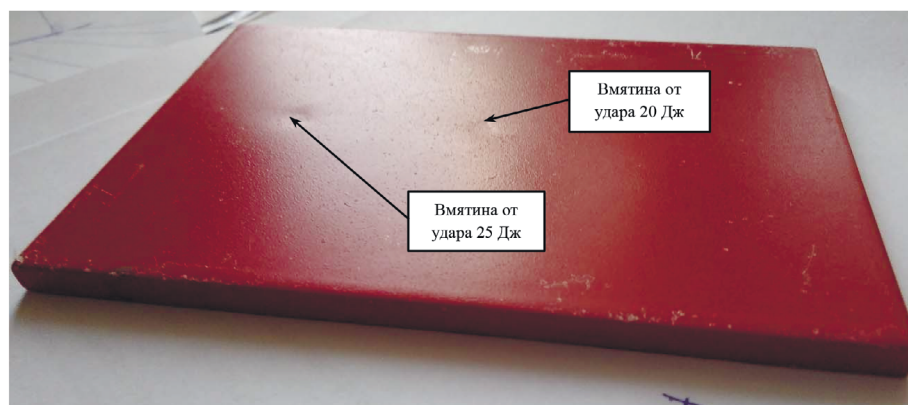


Рис. 14. Фотография образца АП-12 с вмятинами от ударных воздействий.

двумя вмятинами — последствиями нормированных ударов 20 (в центре) и 25 Дж. Образец АП-12 аналогично АП-13 представляет собой пластину размерами $x \times y = 150 \times 100$ мм, вырезанную из подкрепленной стрингерами углепластиковой панели (остатки полок стрингеров расположены вдоль его длинных сторон). Аналогично образцу АП-13 на лицевую сторону образца АП-12 нанесено типовое лакокрасочное покрытие на основе полиуретановой эмали PPG Aerospace SA40000RAL3000. АП-12 отличается от настроечного образца АП-13 толщиной, которая без учета полок стрингеров равна 6,7 мм, и видом армирующего наполнителя: он представляет собой ровинговую углеткань с квазиизотропной укладкой. Регистрация эхосигналов и восстановление изображений проводились так, как описано в разделе 4.1.2.3.

4.2.1. ЦФА-Х-изображения

На рис. 15 показано изображение ЦФА-Х-изображение В-типа при аппроксимации поверхности образца квадратичной кривой Безье при сканировании АР вне областей ударов. Хорошо видна тканая структура ровинга — чем ближе к поверхности, тем лучше она проявляется, и чем дальше от поверхности, тем больше сказывается затухание эхосигналов, что приводит к уменьшению их амплитуды. Это изображение интересно сравнить с рис. 5. Видно, что ЦФА-Х-изображения структур армирующих наполнителей образцов АП-13 и АП-12 разные.

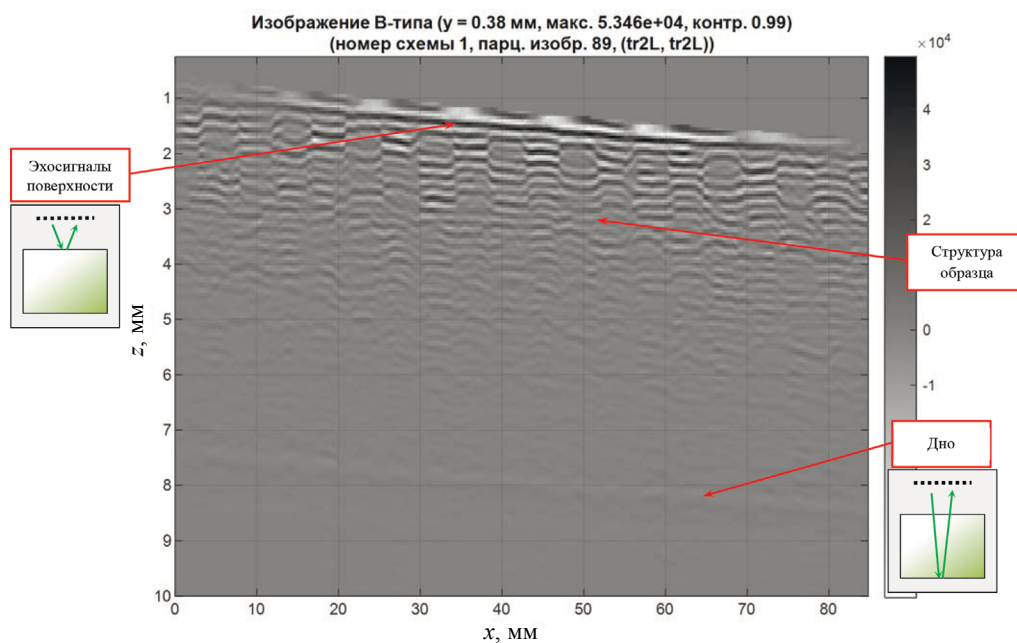


Рис. 15. ЦФА-Х-изображение В-типа вне области повреждения.

На рис. 16 показаны ЦФА-Х-изображения внутренней структуры образца, на которых видны области, где произошел разрыв волокон, в результате чего формируются области теней, заметные на изображениях В- и D-типа. На этих изображениях можно проследить за расширением области повреждения образца при приближении к дну. На изображении С-типа, сформированном на глубине 1,1 мм, хорошо видны повреждения, размеры которых примерно совпадают с размерами вмятин, отмеченных на рис. 14, а также периодическая структура ровинговой углеткани.

На рис. 17 показано ЦФА-Х-изображение С-типа, объединенное по максимуму вдоль оси z . На рис. 17 отлично видна тень из-за повреждения структуры образца от ударов 20 и 25 Дж. Усредненные радиусы областей разрушений от ударных воздействий при приближении к дну увеличились примерно в 3 раза по сравнению с их величиной на глубине 1,1 мм (см. рис. 16) и достигли значения 15 мм.

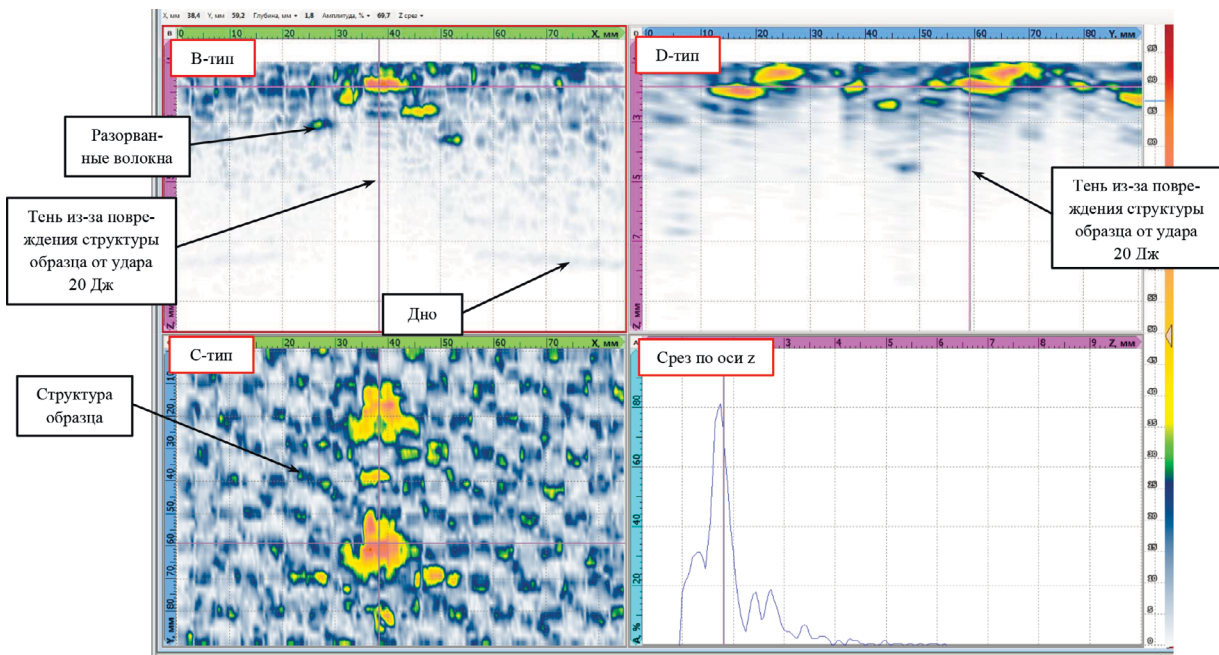


Рис. 16. ЦФА-Х-изображения В-, С- и D-типа внутренней структуры образца АП-12 после воздействия нормированных ударов.

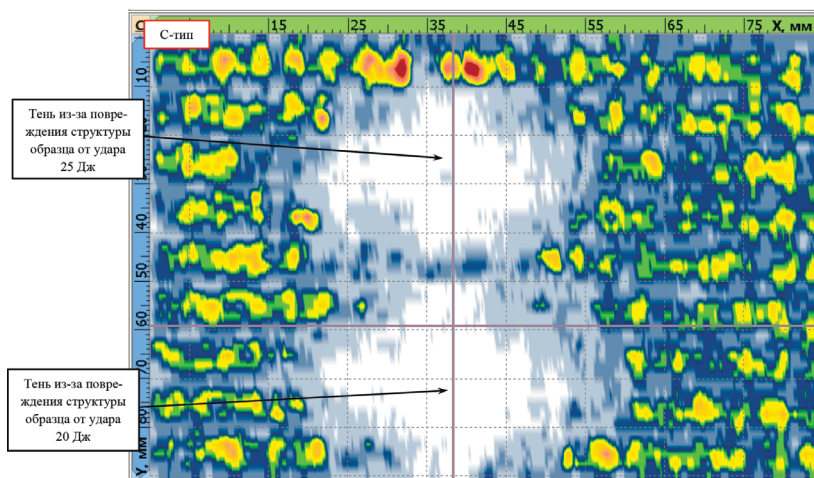


Рис. 17. ЦФА-Х-изображение С-типа, объединенное по максимуму вдоль оси z.

ВЫВОДЫ

По результатам выполненных поисковых исследований можно сделать следующие выводы.

1. Показано, что образцы ПКМ с толщиной стенки 6 ± 2 мм могут быть достаточно успешно проконтролированы с использованием 16-элементной антенной пьезоэлектрической решетки с рабочей частотой 10 МГц с применением технологии ЦФА-Х. ПДО диаметром 2 мм и более уверенно обнаруживаются по всей толщине образца.

2. Обнаружить ПДО диаметром 1 мм можно после уменьшения уровня структурного шума с помощью метода декорреляции эхосигналов и анализа когерентного фактора изображения (см. рис. 9б и рис. 10).

3. Для повышения качества изображения отражателей использовался метод ЦФА-Х, учитывающий неровную поверхность образца, которая аппроксимировалась кривой Безье второго порядка, и непараллельность поверхности образца и линии сканирования АР (см. рис. 5 и рис. 11).

4. Контроль образцов из ровинговой углеткани с квазиизотропной укладкой после нанесения ударных повреждений показал:

оценить степень повреждения у поверхности образца можно по бликам мест разрыва углеткани (см. рис. 16);

акустическая тень на дне образца от повреждений позволяет точнее определить их размеры по всей толщине образца (см. рис. 17).

Авторы выражают благодарность сотрудникам ФГУП «ЦАГИ» Е.А. Боеву и А.Г. Калинину и специалистам фирмы «Авиапокрас» за помощь в подготовке образцов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-13019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 27.002—2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 28 с.
2. *Мурашов В.В., Алексахин В.М.* Контроль прочности зоны соединения элементов интегральных конструкций из полимерных композитов ультразвуковым методом // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. № 7. С. 15—19.
3. *Мурашов В.В.* К вопросу определения упругих и прочностных свойств полимерных композиционных материалов акустическим комплексным методом // Деформация и разрушение материалов. 2014. № 11. С. 39—45.
4. *Kablov E., Murashov V., Rumyantsev A.* Diagnostics of Polymer Composites by Acoustic Methods // Ultrasound. Kaunas: Technologija. 2006. № 2. P. 7—10.
5. *Мурашов В.В.* Определение физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов акустическими методами // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 465—475.
6. *Chu Y.C., Rokhlin S.I.* Comparative analysis of through-transmission ultrasonic bulk wave methods for phase velocity measurements in anisotropic materials // J. Acoustic. Soc. Am. 1994. V. 95. No. 6. P. 3204.
7. *Мурашов В.В., Румянцев А.Ф.* Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть I. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2007. № 4. С. 23—31.
8. *Иванов В.И., Белов П.А., Насибуллин Т.С.* Виды источников акустической эмиссии в композиционных материалах // Контроль. Диагностика. 2016. № 10. С. 14—20.
9. *Suzuki H., Takemoto M., Ono K.* A Study of Fracture Dynamics in a Model Composite by Acoustic Emission Signal Processing // Journal of Acoustics Emission. 1993. V. II. No. 3. P. 117—128.
10. ГОСТ Р 56787—2015. Композиты полимерные. Неразрушающий контроль. М.: Стандартинформ, 2016. 71 с.
11. *Смотрова С.А., Иванов В.И., Смотров А.В., Кускова А.Н., Мантрова Ю.В.* Определение рабочего диапазона чувствительности люминесцентного смарт-покрытия по результатам ультразвуковых измерений параметров ударных повреждений // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23. № 9. С. 26—33.
12. *Сясько В.А.* Возможности применения методов активной термографии для оперативного неразрушающего контроля высокотехнологичных композиционных и металлических изделий в процессе их изготовления и эксплуатации / Сб. трудов 2-й Международной научно-технической конференции НККМ-2016 «Приборы и методы неразрушающего контроля качества изделий и конструкций из композиционных и неоднородных материалов». Санкт-Петербург, 7—9 декабря 2016 г. С. 132—142.
13. Неразрушающий контроль / Справочник в 7 т. Под общ. ред. В.В. Ключева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
14. *Ланге Ю.В.* Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.
15. *Sabeti S., Leckey C., De Marchiz L., Harley J.* Sparse wavenumber recovery and prediction of anisotropic guided waves in composites // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2019. Aug. V. 66. No. 8. P. 1352—1363. DOI: 10.1109/TUFFC.2019.2918746
16. *Wang W., Zhang H., Lynch J.P., Cesnik C.E.S., Li H.* Experimental and numerical validation of guided wave phased arrays integrated within standard data acquisition systems for structural health monitoring // Struct. Control Health Monit. 2018. V. 25. e2171.
17. *Taheri H., Du J., Delfanian F.* Experimental Observation of Phased Array Guided Wave Application in Composite Materials // Mater. Eval. 2017. V. 75. P. 1308—1316.
18. *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.

19. *Базулин Е.Г.* Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решетками // Дефектоскопия. 2014. № 3. С. 12—22.
20. *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications.* Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. URL: <https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-advances/> (дата обращения: 26.11.2020).
21. *Taheri H., Hassen A.A.* Nondestructive Ultrasonic Inspection of Composite Materials: A Comparative Advantage of Phased Array Ultrasonic // *Appl. Sci.* 2019. V. 9. No. 8. P. 1—16. DOI:10.3390/app9081628
22. *Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г.* О применимости технологий антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1. С. 64—70.
23. *Базулин Е.Г.* Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51—75.
24. *Hunter A.J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D.* The Wavenumber Algorithm for Full-Matrix Imaging Using and Ultrasonic Array // *NDT Int.* 2006. V. 39. No. 7. P. 525—541.
25. *Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н.* Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.
26. *Holmes C., Drinkwater B.W., Wilcox P.D.* Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation // *NDT&E International.* 2005. V. 38. P. 701—711.
27. Сайт фирмы «ЭХО+». URL: <http://www.echoplus.ru/> (дата обращения: 02.03.2021).
28. *Зиченков М.Ч., Ковалев И.Е., Ковалев Н.И., Корнилов А.Б., Корнилов Г.А., Смотров А.В., Смотров С.А.* Концептуальные аспекты разработки перечня стандартных образцов из ПКМ для развития методологии активного теплового неразрушающего контроля изделий // *Авиационная промышленность.* 2021. № 1. С. 1—11.
29. *Карташев В.Г., Качанов В.К., Шалимова Е.В.* Основные положения теории пространственно-временной обработки сигналов применительно к задачам ультразвуковой дефектоскопии изделий из сложноструктурных материалов // Дефектоскопия. 2010. № 4. С. 19—29.
30. *Bazulin E.G.* Reducing the Level of Weakly Changing Noise by the Decorrelation Method during Ultrasonic Monitoring Using Antenna Arrays // *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2020. V. 56. No. 4. P. 310—317. [*Базулин Е.Г.* Уменьшение уровня слабо меняющихся помех методом декорреляции при проведении ультразвукового контроля с использованием антенных решеток // Дефектоскопия. 2020. № 4. С. 14—21.]
31. *Базулин Е.Г.* Применение метода максимальной энтропии в ультразвуковом неразрушающем контроле для получения изображений рассеивателей с учетом эффекта перерассеивания в одномерном случае // *Акустический журнал.* 2010. Т. 56. № 1. С. 103—112.
32. *Базулин Е.Г., Гончарский А.В., Романов С.Ю., Серезников С.Ю.* Обратные задачи ультразвуковой томографии в неразрушающем контроле: математические методы и эксперимент // Дефектоскопия. 2019. № 6. С. 30—39.
33. *Базулин Е.Г.* Использование коэффициента когерентности для повышения качества изображения отражателей при проведении ультразвукового контроля // Дефектоскопия. 2017. № 6. С. 5—17.
34. ГОСТ 33844—2016. Композиты полимерные. Метод определения прочности на сжатие после повреждения многослойных углекомпозитов. М.: Стандартинформ, 2016. 28 с.