

УДК 389.001

Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из ПКМ

Бойцов Б.В., Васильев С.Л., Громашев А.Г., Юргенсон С.А.

В данной статье рассматриваются методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из ПКМ. Среди разнообразия существующих методов подробно рассматриваются наиболее перспективные на сегодняшний день методы контроля – рентгеновский и ультразвуковой.

Ключевые слова: акустический метод, неразрушающие методы контроля, томография, рентгеновский метод контроля, дефектоскопия.

При разработке технологических процессов неразрушающего контроля ПКМ основное внимание должно уделяться лабораторному анализу исходных материалов на соответствие их стандартам.

Практика неразрушающего контроля композиционных материалов показала, что для выявления дефектов нашли применение практически все методы и способы, традиционно применяемые в условиях производства, испытаний и эксплуатации техники, особенно при контроле материалов с неметаллической матрицей и наполнителем или комбинированные. Это оптические, электрические, акустические, радиационные, магнитные, тепловые, голографические, микрорадиоволновые и другие методы контроля. Но наиболее широкое распространение получил ультразвуковой и рентгеновский методы контроля.

Акустические методы, благодаря своей мобильности, составляют более 60% по отношению к другим методам неразрушающего контроля. При ультразвуковом контроле из-за значительного затухания колебаний в ПКМ необходимо использовать значение возбуждаемых колебаний ниже 1 МГц. Для объектов с толщинами более 100 мм частотный диапазон может быть от 55 до 500 кГц. Однако снижение частоты снижает разрешающую способность и чувствительность ультразвукового контроля, а увеличение частоты уменьшает диапазон контролируемых толщин.

Оптико-акустический эффект (ОА) – это эффект генерации звука при нестационарном нагреве среды излучением (в частности, светом). Использование лазерного излучения позволяет возбудить очень короткие акустические импульсы. Из теории [ОА] следует, что при малой длительности лазерного импульса акустический сигнал будет повторять огибающую лазерного импульса, т.е. не будет содержать переколебаний, которые свойственны акустическим импульсам, возбуждаемым пьезоэлектрическим способом. С помощью оптико-акустического метода, из-за его характерных особенностей, можно проводить исследования по механики развития разрушения.

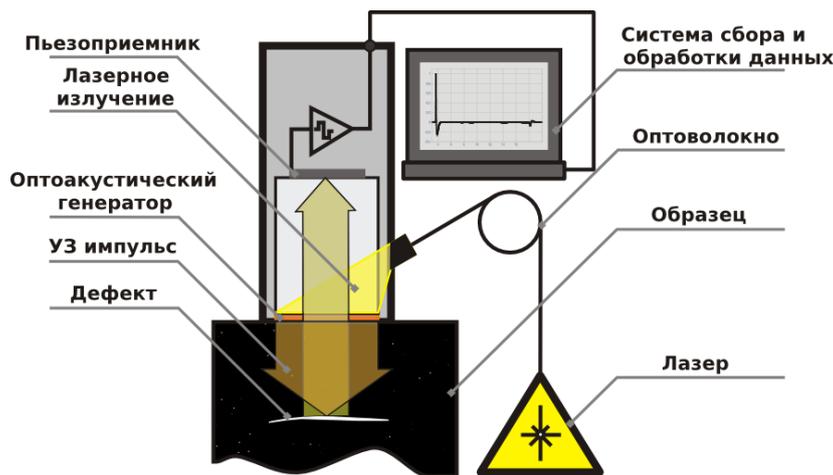


Рис. 1. Схема работы лазерно-ультразвукового преобразователя

На Рис. 1 изображена схема работы ОА дефектоскопа. Оптическое излучение от лазера по оптоволокну поступает в ОА преобразователь. Свет падает на ОА генератор, резкое расширение которого возбуждает акустические волны. Одна волна движется от ОА генератора в сторону пьезоприёмника, а другая – в сторону образца. Первая волна движется только внутри приёмника, поэтому при регистрации она содержит в себе информацию, как о спектре излучаемого сигнала, так и о характеристиках акустического тракта приёмника. Сигнал, зарегистрированный от этой волны, используется при обработке в качестве опорного сигнала. Вторая волна движется в сторону образца, отражается от его структуры и движется внутрь приёмника, где регистрируется в пьезоприёмнике. На Рис. 2 изображён зондирующий импульс. Его длительность по полувысоте составляет около 70 нс. Он состоит из большого положительного импульса и отрицательного дифракционного хвоста, который компенсируется при математической обработке.

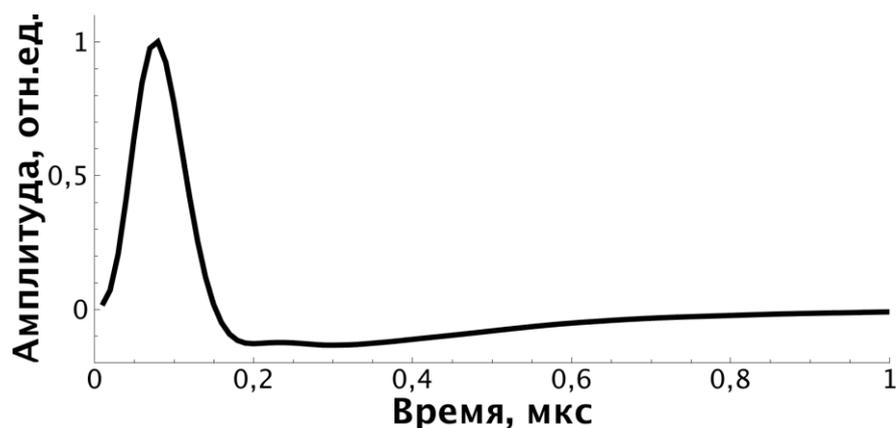


Рис. 2. Зондирующий импульс.

Благодаря тому, что длительность зондирующего импульса меньше двойного времени пробега звука по ОА генератору, у данного датчика практически отсутствует мёртвая зона, что позволяет исследовать структуру различных материалов начиная с приповерхностной зоны.

На рис.3 представлена схема ОА дефектоскопа, в состав которой входит:

- ОА блок
- ОА преобразователь
- Трансляционная система фирмы VZT
- Компьютер.

ОА блок состоит из лазера и АЦП. Лазер NdYAG с модуляцией добротности, мощностью – 100 мкДж, длительность лазерного импульса – 10 нс, частота повторения – 1 кГц. Характеристики АЦП: точность - 12 бит, частота дискретизации – 100 МГц, аналоговая полоса – 70 МГц.

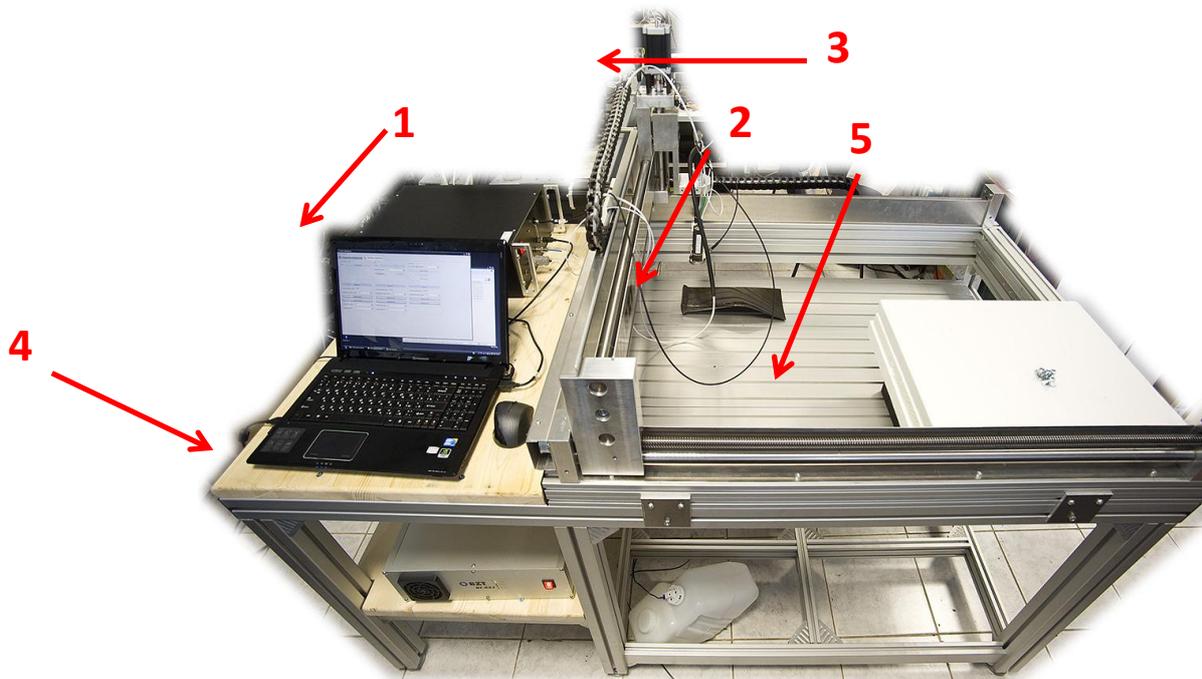


Рис. 3. Общий вид установки, на которой производились измерения.

1 - ОА блок, 2 – ОА преобразователь, 3 – трансляционная система, 4 – компьютер, 5 – крепёжный стол.

В связи с тем, что оптоакустический сигнал имеет широкий спектр, анализ его отражения от слоистой структуры значительно проще, чем в стандартной ультразвуковой дефектоскопии. Прежде всего, это связано с однозначностью определения характера границы, который описывается отношением акустических импедансов (т.е. произведения плотности среды на скорость звука) граничащих сред. Импульс, отражённый от акустически «жёсткой» границы (т.е. при падении из среды с меньшим акустическим импедансом в среду с большим акустическим импедансом) будет иметь положительное пиковое значение. При отражении от «мягкой» границы (к примеру, от расслоения, акустический импеданс которого можно считать равным импедансу воздуха, что меньше, чем импеданс твёрдого тела) он будет иметь отрицательное пиковое значение.

Результаты ОА сканирования представляются в виде В сканов, т.е. зависимости отражённого сигнала от координаты сканирования (горизонтальная координата) и времени прихода импульса (вертикальная координата). Само значение сигнала представлено градацией серого цвета. Чем меньше значение сигнала – тем темнее оно представляется, а чем больше – тем светлее.

Благодаря высокому продольному разрешению ОА метода, место удара выделяется большей временной задержкой импульсов от поверхности. По сильным отражениям от расслоений (чёрные линии) отчётливо видна картина разрушений внутри образца. Композитные материалы акустически сильно анизотропные. Это объясняется тем, что

скорость звука вдоль графитовых волокон практически в 5 раз выше, чем в связующем. Из-за этой анизотропии полный угол раскрытия разрушений составляет не 90 градусов, а больше. Это связано с тем, что вдоль волокон разрушение идёт быстрее и фактически «сносится» дальше от места удара.

В акустических ультразвуковых методах исследования материалов значение сигнала представлено градацией серого цвета. Чем меньше значение сигнала – тем темнее оно представляется, а чем больше – тем светлее (рис.1.14). Верхняя горизонтальная белая линия на оптико-акустических номограммах – это опорный сигнал. Следующая белая линия – импульс, отражённый от поверхности образца. Последующие чёрные полосы – отражения от расслоений, после которых структуры образца уже не видно. Таким образом, распознавание дефектов типа расслоений при использовании ультразвукового метода контроля представляется возможным на относительно небольшой глубине их залегания.

Радиационные методы используются для неразрушающего контроля ПКМ и металлов, причем как рентгеновский метод, так и метод радиоактивных изотопов. Наиболее предпочтительным является рентгеновский метод. Изделие при этом помещается в поле рентгеновского источника и подвергается просвечиванию.

Рентгеновское излучение создается рентгеновской трубкой, схема которой представлена на рис. 4. Источником электронов (катодом) служит вольфрамовая нить, нагреваемая током, под действием которого электроны "выкипают" с его поверхности. Затем они ускоряются разностью потенциалов в несколько десятков тысяч вольт и фокусируются на анод, сделанный из тугоплавкого материала с высоким атомным номером (например, вольфрама).

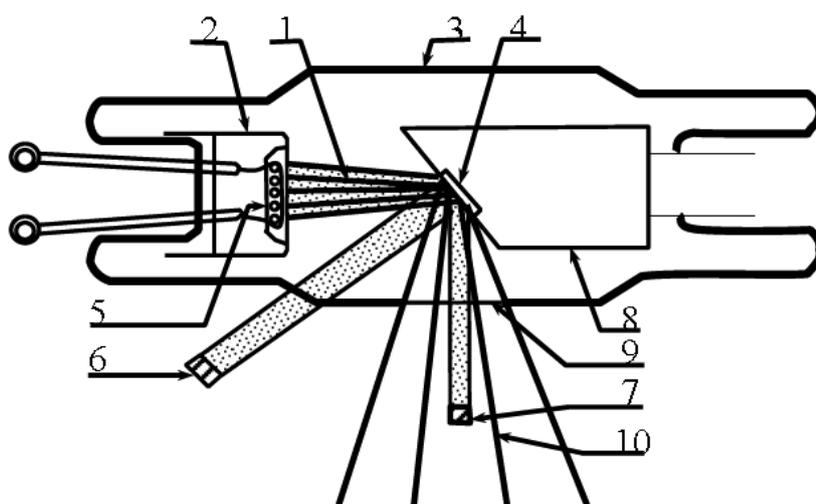


Рис. 4. Схема рентгеновской трубки: 1 –пучок электронов; 2 – катод с фокусирующим электродом; 3 – стеклянный корпус; 4 – вольфрамовая мишень

(антикатод); 5 – нить накала катода; 6 – реально облучаемая площадь; 7 – эффективное фокальное пятно; 8 – медный анод; 9 – окно; 10 – рассеянное рентгеновское излучение

Одним из наиболее перспективных методов рентгеновского контроля является радиационная (рентгеновская) компьютерная томография (КТ). Преимуществами КТ по сравнению с традиционной рентгенографией стали:

- отсутствие теневых наложений на изображении;
- более высокая точность измерения геометрических соотношений;
- чувствительность на порядок выше, чем при обычной рентгенографии.

Рентгеновские вычислительные комплексы могут быть использованы на всех этапах создания композитных конструкций:

- отработки технологического процесса;
- сертификации производства;
- приемочного контроля и диагностики;
- обнаружения изменений внутренней структуры при испытаниях и в период эксплуатации;
- изучения новых конструкторско-технологических решений.

Контроль качества объекта контроля (ОК) основан на реконструкции и визуализации внутренней структуры поперечных сечений (томограмм) в результате совместной вычислительной обработки теневых проекций, полученных при рентгеновском просвечивании ОК в различных направлениях. Послойный характер исследования и визуализации объемной структуры ОК связан с используемым упрощающим приемом, сводящим трехмерную задачу неразрушающего контроля к серии двумерных томограмм (сечений) ОК.

По чувствительности контроля рентгеновская ВРТ на два порядка превышает традиционные технические средства радиационного неразрушающего контроля.

Результаты исследования представляются в виде цифровых массивов, яркостных изображений или оцифрованных графиков, отображающих пространственную структуру линейного коэффициента ослабления в исследуемом сечении ОК – $\mu(x,y)$ - рис. 3.

Поскольку распределение линейного коэффициента ослабления $\mu(x,y)$ при фиксированном элементном составе материала пропорционально распределению массовой плотности $\rho(x,y)$, то по реконструированной томограмме удастся количественно оценить относительные величины разноплотностей в объеме ОК, обнаружить несплошности в виде трещин, локальных пор и включений, измерить координаты расположения и размеры любых

структурных элементов.

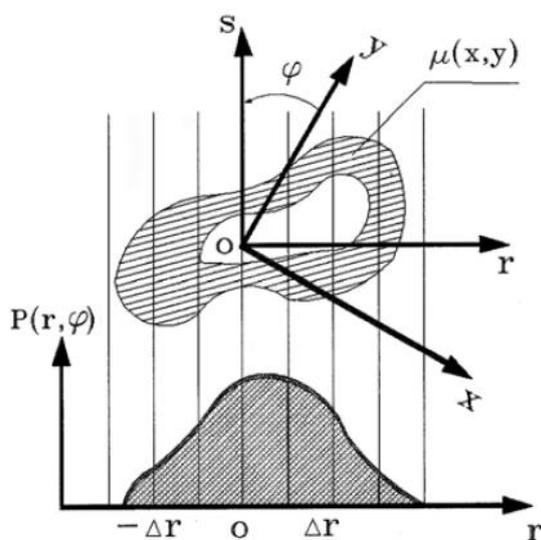


Рис. 3. Система координат пространства реконструкции двумерного распределения $\mu(x, y)$ по интегральным проекциям $p(r, \varphi)$.

Основное функциональное назначение системы сбора проекционных данных сводится к сбору совокупности экспериментальных данных, необходимых для оценки проекций $p(m \Delta r, n \Delta \varphi)$, и передаче этих данных в вычислительный комплекс.

Вычислительный томограф ВТ-600ХА предназначен для послойной визуализации, дефектоскопии и количественного неразрушающего контроля внутренней пространственной структуры широкого класса изделий, в том числе: клеевых соединений, сборок и многослойных конструкций, сотовых конструкций, композитов.

Томограф рекомендуется применять для отработки технологии, сертификации производства, входного (выходного) контроля и диагностики, для обнаружения изменений внутренней структуры в процессе испытаний или эксплуатации, а также для изучения конструктивно-технологических решений, используемых ведущими производителями аналогичных изделий или технологического оборудования.

Отличительными особенностями томографа ВТ-600ХА являются:

— широкий диапазон плотностей и размеров контролируемых изделий вследствие применения двух уникальных высокоэнергетических источников излучения (минифокусной рентгеновской трубки на 450кВ с проникающей способностью до 50 мм стали и минифокусного специализированного ускорителя электронов – томобетатрона на 5МэВ с проникающей способностью до 150 мм стали);

— широкий диапазон рабочих полей томографа от 20 до 600мм, допустимый вес ОК до 300 кг и длина зоны контроля по вертикали (без перестановки ОК) более 1000мм;

— уникально высокое пространственное разрешение внутри ОК – до 80 пер/см во всем диапазоне энергий и повышенная точность измерения размеров внутренних структурных элементов за счет сочетания фирменной методики локальной томографии и коллимированных минифокусных источников излучения с эффективной шириной фокусного пятна 0,3...0,1мм при увеличенном формате томограмм (от1024x1024 до 2048x2048);

— увеличенное рабочее поле рентгенограмм ОК – до 600x800 мм;

— русскоязычный интерфейс, электронные подсказки и документация;

— простота и удобство работы оператора благодаря использованию двухэкранного интерфейса и программного обеспечения с высокой степенью автоматизации и поддержкой «фонового» режима сканирования, позволяющего совмещать управление томографом с независимым рабочим местом для расшифровки результатов контроля, их документирования и архивирования.

В составе томографического комплекса ВТ-600ХА функционально можно выделить:

- систему сбора проекционных данных;

- вычислительный комплекс, поддерживаемый специализированным программным обеспечением;

- средства визуализации и интерактивной обработки томограмм, документирования и архивирования результатов томографического контроля.

В состав системы сбора проекционных данных, внешний вид которой показан на прилагаемой фотографии (рис. 4.), в свою очередь входят:

— Многоканальный блок детекторов с механизмом двумерной коллимации апертур;

— Два коллимированных минифокусных источника высокоэнергетического излучения на подвижной стойке. В качестве источников рентгеновского излучения в томографе ВТ-600ХА используются высокоэнергетический минифокусный промышленный рентгеновский аппарат Isovolt 450 Titan и малогабаритный индукционный ускоритель электронов МИБ-5 - "Томобетатрон".

— Элементы рентгенооптики (первичный и вторичный коллиматоры, фильтры);

— Трехкоординатное прецизионное сканирующее устройство с рабочим столом для закрепления объекта контроля, блоками управления, электроприводом и датчиками координат;

— Многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП);

— Специализированные источники электропитания и интерфейс.

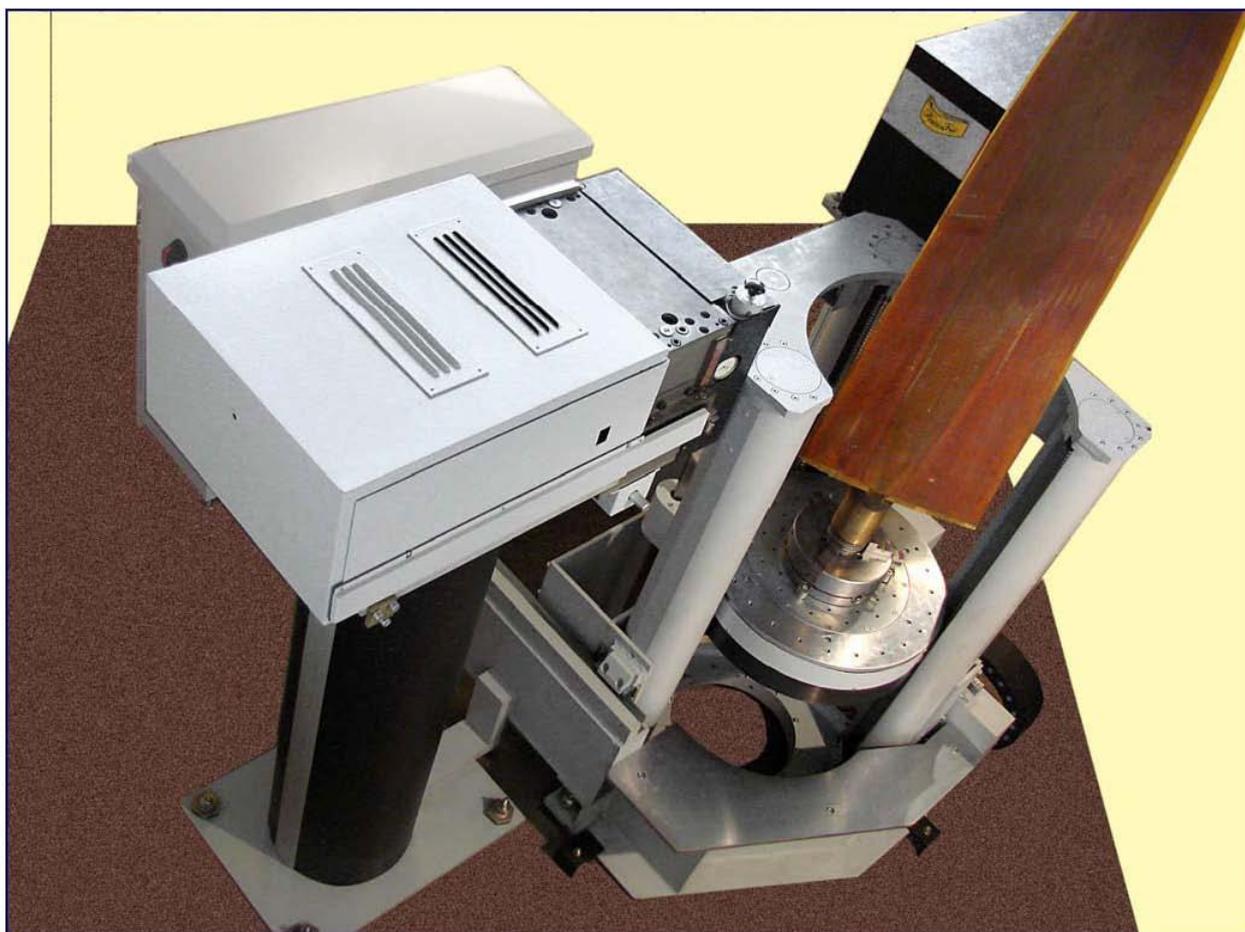


Рис. 4. Внешний вид системы сбора проекционных данных.

Реконструкция двумерных цифровых томограмм по набору разноракурсных проекций в томографе ВТ-600ХА осуществляется с использованием оригинального алгоритма, являющегося дальнейшим развитием алгоритма обратного проецирования с фильтрацией двойным дифференцированием.

Томограф ВТ-600ХА позволяет проводить в автоматическом режиме многослойное (серийное) сканирование ОК с широким выбором количества сечений (вплоть до 999) и интервала между смежными сечениями. Томограммы, полученные в процессе серийного сканирования, реконструируются в темпе сканирования и сохраняются на диске вместе со своими проекциями. Полученная серия многослойных томограмм может быть использована для трехмерной реконструкции объекта контроля.

Числовое представление результатов рентгеновского томографического контроля выгодно дополняют привычную для интроскопии форму отображения исследуемых структур ОК в виде яркостных или цветных изображений. Бесконтактность контроля и длительное запоминание цифровой информации об объемной структуре ОК создают качественно новые возможности использования результатов томографического контроля на протяжении всей

«жизни» ОК: непосредственно в процессе изготовления, при хранении, эксплуатации, ремонте или испытаниях, в том числе под влиянием внешних воздействий.

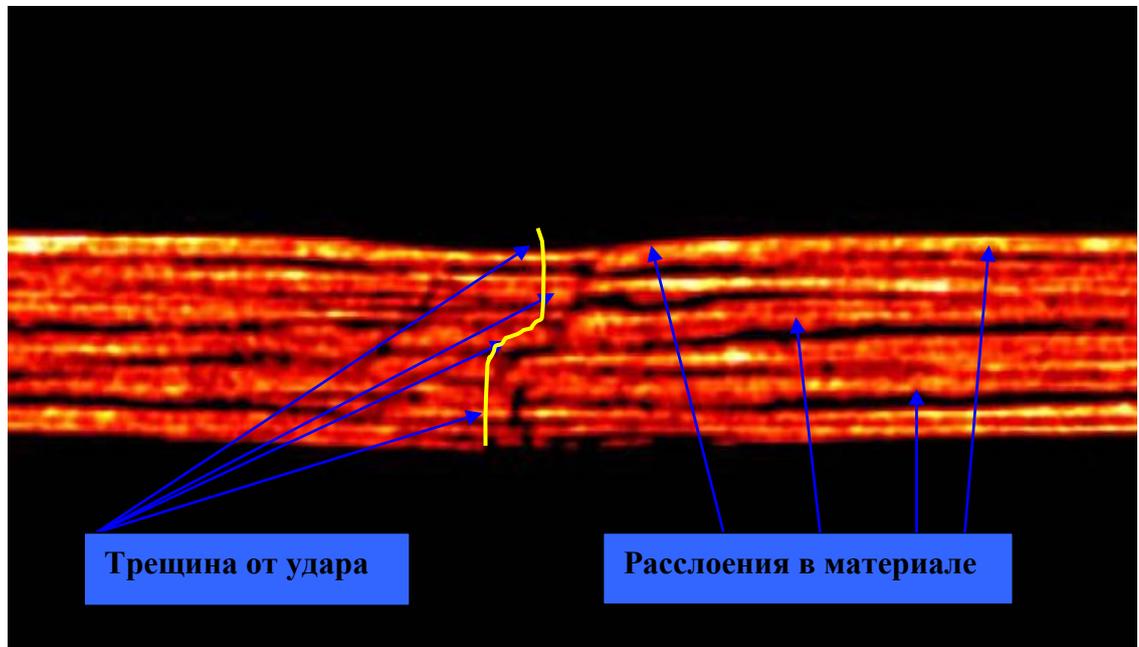


Рис. 5. Локальная томограмма композитного образца (после ударного воздействия с энергией удара $E=140\text{Дж}$)

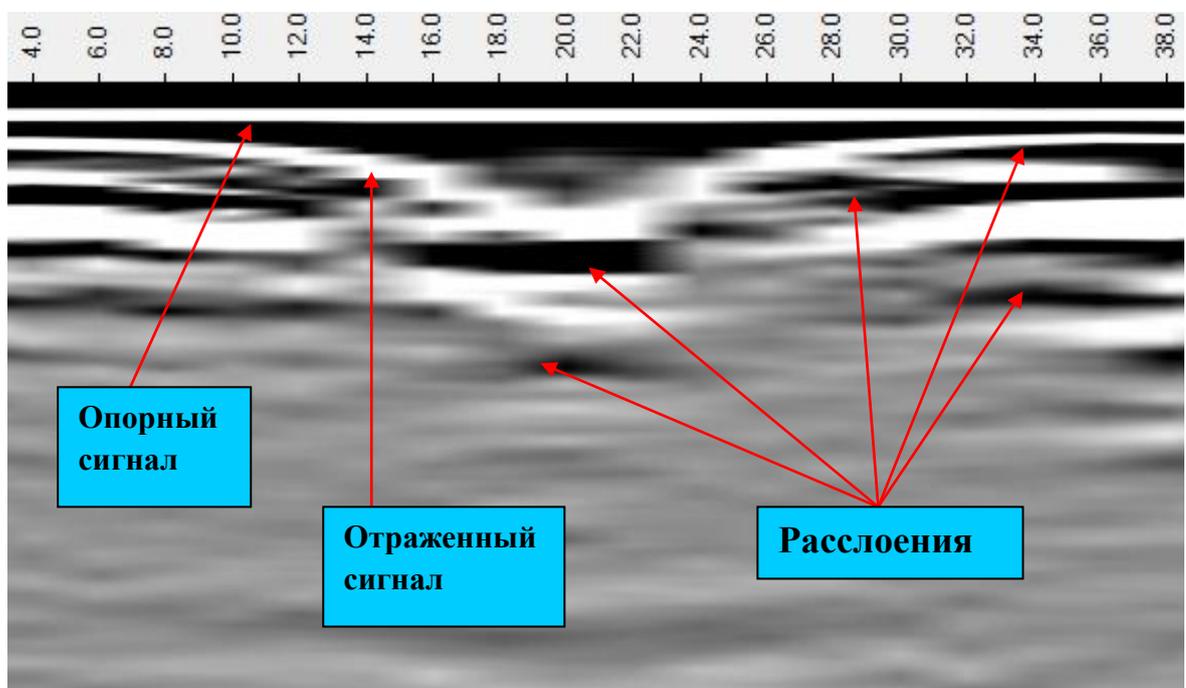


Рис.6. Ультразвуковой контроль композиционного образца (после ударного воздействия с энергией удара $E=140\text{Дж}$)

Сопоставление двух исследованных методов неразрушающего контроля позволило выявить на примерах эффективность и высокую разрешающую способность метода ВРТ по сравнению с ультразвуковым методом контроля, о чем свидетельствуют рис. 5 - 6. На ультразвуковых диаграммах верхняя горизонтальная белая линия представляет опорный сигнал УЗ-излучателя. Следующая белая линия – импульс, отражённый от поверхности образца. Последующие чёрные полосы – отражения от расслоений, после которых структуры образца уже не видно. Таким образом, отработка технологии изготовления конструкций из КМ должна производиться по результатам сканирования их на рентгеновском вычислительном томографе, а проверку состояния конструкций в процессе их эксплуатации достаточно проводить методом ультразвуковой диагностики.

Библиографический список:

1. Марусина М.Я., Казначеева А.О. Современные виды томографии. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006.
2. В.В. Сухоруков, Э.И. Вайнберг и др. Неразрушающий контроль, кн 5.- М. «Высшая школа», 1993.

Сведения об авторах:

1. Бойцов Б.В., профессор, заведующий кафедрой Московского авиационного института (национального исследовательского университета) д.т.н., тел. 8(499)158-00-11 e-mail: kaf104@mai.ru,
2. Васильев С. Л., начальник лаборатории компьютерной томографии РЦ ПЛА Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н. МАИ, тел.8-903-228-99-43, e-mail: cat@mai.ru,
3. Громашев А.Г., главный технолог ЗАО «Аэрокомпозит», д.т.н., тел. 8 916 195-13-61, e-mail: a_gromachev@aerocomposit.ru.
4. Юргенсон С. А, студент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), тел.:8-903-748-54-80, e-mail: sjurg@yandex.ru,