

УДК 620.179.1:678.8

*В.В. Мурашов¹, М.В. Слюсарев¹, А.А. Евдокимов¹***КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ОБОЛОЧЕК АРОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
НАДЗЕМНЫХ ЧАСТЕЙ ОПОР БЫСТРОВОЗВОДИМЫХ
МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ ИЗ ПКМ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-10-10

Рассмотрены результаты исследования возможности неразрушающего контроля качества оболочек арочных элементов из ПКМ, применяемых при возведении мостов. Показана применимость акустического импедансного метода для выявления нарушений сплошности материала в виде зон недопротитки связующим при формовании, расслоений и степени заполнения арочных элементов бетоном.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.3. «Методы неразрушающих исследований и контроля» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: арочные элементы, неразрушающий контроль (НК), акустический импедансный метод (АИМ), полимерные композиционные материалы (ПКМ).

Research results on possibility of non-destructive quality testing of PCM covers of arch elements applied in bridges are considered. Applicability of acoustic impedance method for identification of material integrity disturb in the form of zones with poor binder impregnation at formation, exfoliation and filling degree of arch elements by concrete is shown.

The work is executed within implementation of the complex scientific direction 2.3. «Methods of nondestructive research and control» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: arch elements, non-destructive testing (NDT), acoustic impedance method (AIM), polymeric composite materials (PCM).

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Разрабатываемые в настоящее время арочные мостовые сооружения с двумя полосами движения автомобилей и пешеходными тротуарами, строящиеся, как правило, на небольших речках в городской и сельской местности, должны быть быстровозводимыми и, безусловно, надежными. Такой автомобильный арочный мост строится из композитных арочных элементов постоянного круглого сечения, содержащих бетонные сердечники. Качество арочного моста для обеспечения его надежности необходимо проверять методами неразрушающего контроля как на стадии изготовления, так и при эксплуатации и после ремонта моста [1–4].

Наиболее ответственными деталями при строительстве быстровозводимых мостовых сооружений являются арочные элементы, используемые в качестве надземных частей опор моста. Арочные элементы сначала изготавливают в виде пустотелых трубчатых крупногабаритных изделий из полимерного композиционного материала (ПКМ) в форме арки и затем заполняют бетоном непосредственно на месте сооружения моста.

Арочные элементы мостового сооружения сложны в изготовлении и при их производстве могут возникнуть дефекты как на поверхности изделия, так и в глубине его.

Эти дефекты могут оказывать существенное влияние на физико-механические характеристики изделий, что может сказаться на долговечности всего мостового сооружения в целом. Поэтому актуальной задачей является выбор неразрушающего метода контроля арочных элементов из ПКМ.

В данной статье рассмотрены возможные дефекты оболочки арочного элемента из углепластика, изготовленного методом интрузии, а также методы неразрушающего контроля качества деталей и конструкций из ПКМ. Особое внимание уделено акустическому импедансному методу дефектоскопии, позволяющему проводить контроль арочных элементов как до заполнения их бетоном, так и после.

Материалы и методы

Анализ существующих методов неразрушающего контроля крупногабаритных изделий из полимерных композиционных материалов с внутренними полостями

Дефекты, возникающие в деталях из ПКМ в процессе их изготовления и эксплуатации, существенно ухудшают эксплуатационные характеристики изделий и резко снижают их надежность. Сложность состава ПКМ, многообразие форм армирующих наполнителей, различные технологии изготовления препрегов и методов формования обуславливают и многообразие получаемых дефектов [5].

Дефекты ПКМ следует различать по их происхождению (возникающие на стадии изготовления, хранения, транспортировки или эксплуатации), по местоположению в конструкции (поверхностные, изолированные или выходящие на кромку конструкции), по глубине залегания, по раскрытию, по размерам в плане данных структурных неоднородностей (макродефекты – размером >60 – 100 мкм, которые обычно локализованы в объеме материала конструкции, и микродефекты – размером до 60 – 100 мкм, которые, как правило, распределены в объеме материала или в значительной его части) [6].

В условиях производства и эксплуатации применяются различные методы технической диагностики и неразрушающего контроля (НК), основанные на взаимодействии проникающих излучений или физических полей с контролируемым объектом: акустические, радиационные (рентгеновские), тепловые, оптические, электрические, радиоволновые и другие методы неразрушающего контроля. Среди методов контроля конструкций из ПКМ акустические методы по объему применения занимают первое место, так как они позволяют решать наибольшее число задач по контролю изделий из ПКМ [7–18].

Акустические методы основаны на взаимодействии упругих колебаний и волн широкого диапазона частот с контролируемой деталью или конструкцией [4]. Для выявления дефектов в крупногабаритных изделиях (КГИ) из ПКМ с внутренними полостями могут применяться следующие акустические методы неразрушающего контроля (см. таблицу) [19–27]:

– импедансный метод (реализуемый с настройкой приборов по стандартным образцам предприятия и при безобразцовой настройке, когда настройка прибора осуществляется по контролируемой конструкции);

– методы собственных колебаний: локальные варианты метода вынужденных колебаний и метода свободных колебаний (акустико-топографический и акустико-тепловой методы, не имеющие в настоящее время должного аппаратного обеспечения, – в таблице не представлены);

– методы прохождения (теневого – в амплитудном и временном вариантах, велосиметрический и амплитудный – при возбуждении нормальных волн);

– методы отражения (эхо-метод и реверберационный вариант этого метода).

Методами дефектоскопии – отражения (эхо-методом, реверберационным), прохождения (теневым, велосиметрическим, амплитудным при возбуждении нормальных

волн), собственных колебаний (вынужденных колебаний, свободных колебаний), импедансными и др. – можно обнаружить расслоения, трещины, раковины, инородные включения в КГИ из ПКМ с внутренними полостями [5, 6].

Акустические методы контроля крупногабаритных изделий из ПКМ

Метод контроля	Вариант метода	Схема расположения преобразователя(ей) на конструкции при контроле	Область применения акустического метода
Импедансный	Изгибных волн		Выявление непрочности между обшивками и элементами жесткости или легким наполнителем
Собственных колебаний	Вынужденных колебаний (резонансный)		Выявление дефектов соединений между элементами многослойных конструкций, особенно в тех случаях, когда толщина обшивки, со стороны которой проводится контроль, равна или больше толщины каркаса
	Свободных колебаний		Контроль качества соединения неметаллического слоя с высоким затуханием упругих колебаний в нем (резиноподобные материалы, различные ТЗП и т. п.) и металлического или неметаллического каркаса
Прохождения	Теневой		Контроль сотовых конструкций с толстыми (свыше 7 мм) обшивками из ПКМ и сотами из полиамидной бумаги
	Велосимметрический		Контроль соединений между неметаллическими и металлическими слоями конструкции при одностороннем или двухстороннем доступе к ней
	Амплитудный при возбуждении нормальных волн		Выявление трещин, зон пористости материала в тонкостенных конструкциях из ПКМ
Отражения	Ревверберационный		Обнаружение дефектов соединений между металлическим слоем и металлом или легким наполнителем (между каркасом и клеевой вспенивающейся композицией)
	Эхо-метод		Выявление дефектов в клеевых соединениях толстостенных конструкций (свыше 5–10 мм)

В таблице указаны области применения различных реально применяемых акустических методов контроля, а также показаны схемы расположения преобразователей приборов при контроле, где И – излучающий преобразователь; П – приемный преобразователь.

зователь; L – база контроля (расстояние между излучающим и приемным преобразователями; $L_1 \ll L_2$). Точные рекомендации по методам и средствам контроля в некоторых случаях могут быть выданы только по результатам опробования на образцах или натуральных конструкциях с искусственными или естественными дефектами.

При выборе метода контроля следует учитывать: возможности методов контроля, конструктивные особенности изделия, свойства материала изделия или составных частей конструкции, виды ожидаемых дефектов и возможную глубину их расположения, доступность изделия и зон контроля, нормы допустимых дефектов, условия работы контролируемых изделий, требуемую производительность контроля, возможность автоматизации контроля, желаемый способ регистрации результатов контроля и т. п.

Основной характеристикой, определяющей возможности метода контроля, является чувствительность, зависящая в основном от особенностей метода контроля, технических данных аппаратуры, конструкции и материала объекта контроля и других факторов.

На выбор метода значительное влияние оказывают конструктивные особенности изделия, к которым относятся:

- тип изделия;
- форма и размеры изделия;
- толщина изделия;
- шероховатость поверхности контролируемого изделия;
- местоположение зон контроля и др.

Важнейшими факторами, определяющими выбор метода контроля, являются материал изделия, технология изготовления изделия, физико-механические свойства материала изделия (модуль упругости, коэффициент затухания звука и т. п.), анизотропия свойств материала и изменения свойств в различных участках изделия.

В ряду акустических методов неразрушающего контроля многослойных клееных конструкций из ПКМ особое место занимают специальные низкочастотные методы [28]. Отличительными особенностями этих методов контроля являются сухой контакт рабочего органа преобразователя дефектоскопа с контролируемой конструкцией в небольшой по площади ($0,01$ – $0,5$ мм²) зоне в одной или в двух точках, использование звукового и низкочастотного ультразвукового диапазонов (обычно до 150 кГц), а также возбуждение в контролируемых конструкциях в основном нормальных волн, например антисимметричных волн нулевого порядка или им подобных.

Основная область применения специальных низкочастотных методов, к которым относятся импедансный, велосиметрический методы и метод свободных колебаний, – обнаружение зон нарушения сплошности материала в конструкциях из ПКМ на основе углеродных, борных, стеклянных, органических волокон (угле-, боро-, стекло-, органо-пластиков и т. п.), в комбинированных клееных конструкциях, содержащих металлические и неметаллические слои, а также выявление нарушений сплошности в слоях из ПКМ и в полуфабрикатах перед склеиванием конструкции. Этими методами также могут быть выявлены дефекты в неметаллических покрытиях (например, теплозащитных) и зоны нарушения клевого соединения между этими покрытиями и силовым металлическим или неметаллическим каркасом [4].

Основными преимуществами специальных низкочастотных методов контроля [29–33] перед другими методами неразрушающего контроля многослойных клееных конструкций из ПКМ являются:

- отсутствие необходимости смачивания конструкций или погружения их в жидкость, что позволяет проводить контроль деталей и агрегатов из гигроскопичных материалов;

– кривизна поверхности контролируемых конструкций обычно не является препятствием для проведения контроля, причем возможен контроль как выпуклых, так и вогнутых деталей;

– возможность контроля деталей, выполненных из анизотропных материалов с различной шероховатостью поверхности.

Следует также отметить простоту аппаратуры для реализации специальных низкочастотных методов, простоту методики контроля и возможность механизации контроля конструкций, обычно контролируемых этими методами.

Выбор и обоснование метода неразрушающего контроля оболочек арочного элемента

По результатам анализа существующих методов неразрушающего контроля крупногабаритных изделий из ПКМ с внутренними полостями, предпочтение было отдано методам, реализуемым в контактном варианте при сухом контакте преобразователя дефектоскопа с контролируемым изделием. Для выявления дефектов в КГИ с внутренними полостями целесообразно применение методов неразрушающего контроля, реализуемых при одностороннем доступе к контролируемому изделию.

Для выявления дефектов типа расслоений представляется перспективным использование акустического импедансного метода дефектоскопии [34–36]. Опробование импедансного метода проведено на образцах в виде плит с искусственными дефектами клинообразной формы, выходящими на кромку плиты, а также на конструктивно-подобном элементе, имеющем естественные или искусственные дефекты в виде расслоений и зон повышенной пористости материала (недопропитка связующим при формировании конструктивно-подобного элемента).

Для выявления дефектов типа трещин и зон повышенной пористости материала опробован ультразвуковой амплитудный метод прохождения при возбуждении в объекте контроля (ОК) нормальных волн. Опробование амплитудного метода прохождения проведено на образцах в виде плит с искусственными дефектами, представляющими собой нарушения сплошности материала. Такие дефекты имитировали трещины в материале, ориентированные перпендикулярно поверхности плиты и конструктивно-подобного элемента.

Рассмотрим более подробно физические принципы и эксплуатационные возможности акустического импедансного метода и ультразвукового амплитудного метода прохождения, реализуемого при возбуждении в ОК нормальных волн.

Акустический импедансный метод дефектоскопии основан на различии механических импедансов бездефектного и дефектного участков конструкции [28]. Механический импеданс \dot{Z} конструкции в точке приложения возмущающей силы \dot{F} определяется отношением этой силы к вызываемой ею колебательной скорости \dot{V} и является комплексной величиной:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{F}}{\dot{V}} = R + jX = |Z|e^{j\varphi},$$

где R и X – активная и реактивная составляющие импеданса; $j = \sqrt{-1}$; φ – фаза.

Модуль механического импеданса или полного механического сопротивления $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$ в зоне дефекта изделия типа нарушения сплошности (непроклея, расслоения) всегда меньше, чем в бездефектной зоне.

Импедансный метод реализуется при одностороннем доступе к контролируемой конструкции и применяется в двух вариантах: с использованием совмещенного или

раздельно-совмещенного преобразователя. Области применения этих основных вариантов акустического импедансного метода различны, поэтому кратко рассмотрим возможности обоих вариантов.

Область применения варианта импедансного метода с использованием совмещенного преобразователя – выявление дефектов типа расслоений в монолитных конструкциях толщиной до 5 мм. Этот вариант импедансного метода характеризуется высокой чувствительностью (наименьший размер выявляемого дефекта в наиболее благоприятных условиях составляет от 3 до 5 мм), но сравнительно малой глубиной залегания выявляемых дефектов.

Метод, реализуемый с использованием раздельно-совмещенного преобразователя, представляет собой второй вариант импедансного метода и позволяет выявлять дефекты по изменению оцененного с поверхности конструкции механического импеданса. Излучающий и приемный вибраторы, имеющие сферические контактные наконечники, расположены в общем корпусе преобразователя так, что передача энергии между ними практически может происходить только при их контакте с контролируемой конструкцией. Этот вариант импедансного метода позволяет выявлять дефекты на большой глубине, что значительно превышает возможности первого варианта импедансного метода.

Обоим вариантам импедансного метода свойственно наличие глубинной неконтролируемой зоны, прилегающей к стороне, противоположной стороне контроля. При контроле, например, монолитных деталей из ПКМ первым вариантом метода эта зона составляет приблизительно половину толщины детали, а при контроле вторым вариантом метода – треть толщины детали.

Чувствительность второго варианта импедансного метода зависит от параметров контролируемой конструкции и связана с конкретными условиями применения метода. Предельная чувствительность обычно ограничена базой преобразователя, так как дефекты уверенно выявляются, как правило, в том случае, когда и излучающий и приемный вибраторы находятся в зоне дефекта. При контроле конструкций с очень тонким верхним слоем или при выявлении дефектов на небольшой глубине (до 0,3 мм) предельная чувствительность при контроле вторым вариантом импедансного метода может быть меньше базы преобразователя.

Импедансным методом можно обнаружить зоны отсутствия сцепления между соединяемыми элементами в виде непроклеев, расслоений и других нарушений сплошности, характеризующихся наличием заполненного газом промежутка. Зоны с нарушением сцепления, не имеющие заполненного газом промежутка, импедансным методом, как правило, не выявляются. При этом импедансным методом обычно выявляются только дефекты, имеющие раскрытие, достаточное для того, чтобы отделенный дефектом слой контролируемой конструкции имел возможность колебаться самостоятельно, отдельно от остальной части конструкции.

Эта особенность метода существенна, например, при выявлении расслоений в ПКМ, залегающих на малых глубинах (до 0,5–0,6 мм). Такие дефекты обнаруживаются только при слабом прижатии преобразователя к объекту контроля. В случае большего давления в месте контакта расслоение «захлопывается», и изделие колеблется как единое целое. Поэтому при большом давлении близкие к поверхности дефекты могут быть пропущены.

Чувствительность импедансного метода зависит от конкретных условий его применения и определяется параметрами объекта контроля, к числу которых относятся:

- жесткость отделенного дефектом слоя изделия;
- соотношение жесткости отделенного дефектом слоя изделия и жесткости всей конструкции в целом;

– шероховатость и кривизна поверхности объекта контроля.

Увеличение жесткости отделенного дефектом слоя конструкции, уменьшение отношения жесткости конструкции к жесткости отделенного дефектом слоя конструкции, увеличение шероховатости и кривизны поверхности изделия приводят к снижению чувствительности метода.

Факторами, ограничивающими чувствительность импедансного метода, являются [4]:

- разброс значений механических импедансов Z_n в бездефектных зонах ОК;
- упругое сопротивление Z_k зоны контакта преобразователя с ОК.

Разброс значений Z_n , обусловленный непостоянством толщины клеевого слоя, неоднородностями ОК, не являющимися браковочными признаками, и интерференционными явлениями, создает мешающий фон, затрудняющий выявление мелких дефектов. Влияние этого фактора существенно при контроле изделий с любыми параметрами.

Упругое сопротивление $Z_k = \frac{1}{j\omega K_k}$ (ω – круговая частота; K_k – контактная гиб-

кость; $j = \sqrt{-1}$) обусловлено небольшой площадью соприкосновения контактного наконечника преобразователя с контролируемым объектом [28]. Ввиду малой площади, зоны наконечника и объекта контроля, прилегающие к области контакта, испытывают значительные упругие деформации. Таким образом, область контакта представляет собой сосредоточенное упругое сопротивление, через которое колебания передаются от преобразователя к ОК.

Упругое сопротивление Z_k уменьшает чувствительность преобразователя к изменению импеданса изделия. Влияние Z_k существенно только при контроле конструкций с жесткими внутренними элементами, для которых в доброкачественных зонах $Z_k > \frac{|Z_n|}{2}$. При $|Z_d| > |Z_k|$ (Z_d – импеданс изделия в дефектной зоне) дефекты обычно не выявляются [4], так как в этом случае импеданс изделия мало влияет на режим работы преобразователя.

Импедансный метод позволяет обнаруживать относительно неглубоко залегающие расслоения в изделиях из слоистых пластиков. Он может быть рекомендован в тех случаях, когда применение традиционных ультразвуковых методов (теневого, эхо-метода, резонансного) затруднено необходимостью смачивания изделия, его кривизной или иными причинами.

Для выбора оптимальных режимов контроля обычно используют контрольные образцы с искусственными или естественными дефектами [4, 28]. Эти образцы должны иметь те же основные параметры (например, толщина и материал обшивки и соединенных с ней элементов, размер сотовой ячейки и т. п.), что и контролируемая конструкция.

В данной статье рассматривается принцип контроля оболочек арочных элементов при настройке прибора по контролируемой конструкции (без применения контрольных образцов для настройки прибора).

Для опробования акустического импедансного метода на образцах в виде плит и конструктивно-подобном элементе выбран дефектоскоп ДАМИ-С09, разработанный и выпускаемый фирмой «Вотум» (г. Москва).

Ультразвуковой амплитудный метод прохождения, реализуемый при возбуждении в объекте контроля нормальных волн, представляет собой теневой метод прохождения при одностороннем доступе к контролируемому изделию.

Нормальные волны, распространяющиеся в упругом волноводе (например, в твердой пластине со свободными границами), отличаются от всех других волн, способных распространяться в данном волноводе, тем, что они при своем прямолинейном

распространении сохраняют поперечную структуру поля и (или) поляризацию [37]. Упругие нормальные волны, распространяющиеся в пластинах со свободными границами, могут быть двух типов: волны Лэмба и так называемые поперечные нормальные волны (SH волны) [37].

Используемые при неразрушающем контроле волны Лэмба представляют собой упругие возмущения, в которых имеется смещение как в направлении распространения волны, так и в направлении, перпендикулярном плоскости конструкции. Волны Лэмба возбуждаются только в тонких конструкциях, когда толщина стенки конструкции не превышает длины волны. При возбуждении волны Лэмба фронт волны перемещается от зоны соприкосновения излучающего преобразователя с объектом контроля к зоне соприкосновения приемного преобразователя с объектом контроля, при этом участок изделия, по которому распространяется волна Лэмба, может рассматриваться как акустический тракт. Если на пути волны находится препятствие в виде трещины, то амплитуда принятого сигнала в зависимости от размеров трещины будет либо уменьшаться при малых размерах трещины, либо изменяться до нуля при больших размерах трещины. Предполагается, что при прохождении волны в зоне повышенной пористости сигнал на приемном преобразователе будет изменяться таким же образом – либо уменьшаться, либо исчезать.

Для опробования ультразвукового амплитудного метода прохождения, реализуемого при возбуждении в объекте контроля нормальных волн, выбран дефектоскоп УСД-60Н с катящимися преобразователями, разработанный и выпускаемый НПЦ «Кропус» (г. Ногинск).

В процессе опробования ультразвукового амплитудного метода прохождения, реализуемого при возбуждении в объекте контроля нормальных волн, на образцах в виде плит и конструктивно-подобном элементе с искусственными и естественными дефектами установлены основные характеристики метода (чувствительность, разрешающая способность и др.) при выявлении трещин и зон повышенной пористости материала или зон недопропитки.

Результаты и обсуждение

При контроле натуральных оболочек из композиционных материалов акустическим импедансным методом после их изготовления (рис. 1) обнаружены зоны недопропитки – зоны, обедненные смолой при изготовлении арочных элементов, расслоения и другие нарушения сплошности материала (рис. 2).



Рис. 1. Рабочий момент контроля качества изготовления оболочки арочного элемента с пустотелой полостью после ее формования

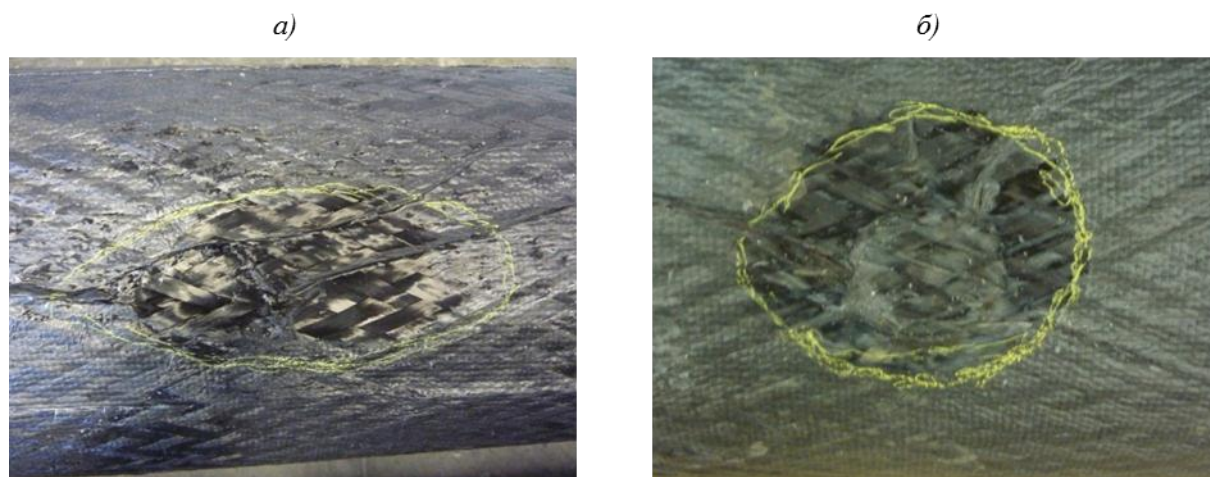


Рис. 2. Дефекты в оболочке арочного элемента: *а* – зона недопротитки связующим при формировании; *б* – зона, обедненная смолой при формировании

Для контроля качества оболочек арочных элементов предложено использовать безобразцовую настройку прибора. Термин «безобразцовая настройка» обозначает настройку прибора непосредственно на ОК, без применения контрольных образцов и употребляется для краткости. Безобразцовую настройку допускается применять только при условии предварительно опробованной методики контроля конструкций из ПКМ данного типа и наличии нормативной документации на данный материал и толщине стенки оболочки арочного элемента.

Безобразцовую настройку дефектоскопа на контролируемой конструкции можно проводить по частоте генерации преобразователя. Для этого надо выбрать и отметить на поверхности контролируемой конструкции в зонах, не имеющих явно выраженных дефектов (рис. 3) (вспучивания поверхности, вмятин, забоин и т. д.), не менее трех точек настройки, не лежащих на одной прямой. Расстояние между точками настройки, должно быть не менее 100 мм. Необходимо последовательно определить частоты генерации преобразователя в трех намеченных точках и сравнить полученные показания частоты, а также выбрать для настройки участок с большей частотой.

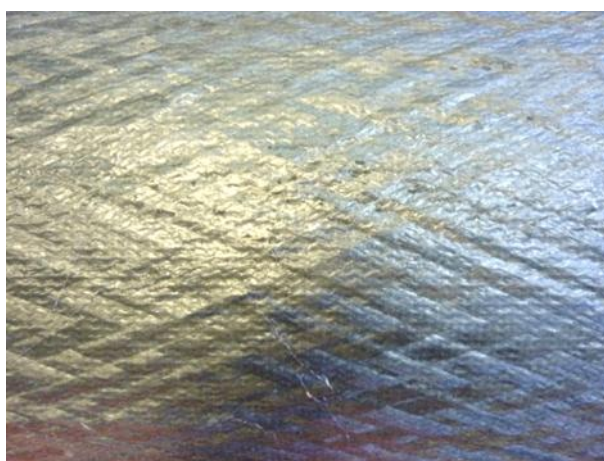


Рис. 3. Бездефектная зона оболочки арочного элемента, выбранная для настройки акустического импедансного дефектоскопа

В процессе выбора зоны настройки возможны варианты, при которых большая зона дефекта не выявлена при визуальном осмотре и настройку проводили на дефекте.

В этом случае при контроле срабатывание сигнализации, предупреждающее о наличии дефекта, будет происходить при переходе от дефектной зоны (зоны настройки) к бездефектной. Для оценки результатов контроля необходимо установить преобразователь в зоне срабатывания сигнализации и выполнить настройку последовательно во второй и в третьей точках, затем сравнить полученные значения частоты в этих точках и частоты, при которой проводился контроль. Зона, в которой частота меньше, является зоной дефекта.

Настройка дефектоскопа и контроль оболочек арочных элементов по параметру «частота» возможны только в случае различия частот генерации преобразователя, нагруженного на доброкачественный участок конструкции данного типа и на дефектный участок. В некоторых случаях при контроле оболочек арочных элементов не наблюдается разницы частот, определенных с помощью дефектоскопа на бездефектном и дефектном участках ОК.

При одинаковых значениях частот преобразователя (при его нахождении в точках 1, 2 и 3) предложено проводить выбор зоны настройки прибора по наименьшей величине отклонения маркера в амплитудно-фазовой плоскости.

В процессе работы установлено, что к факторам, ограничивающим возможности акустического импедансного метода при контроле оболочек арочных элементов, относятся:

- продольные и поперечные складки верхнего слоя материала на поверхности оболочки арочного элемента (рис. 4);
- шероховатость поверхности контролируемой конструкции $R_z > 30$ мкм;
- вибрация контролируемой конструкции.

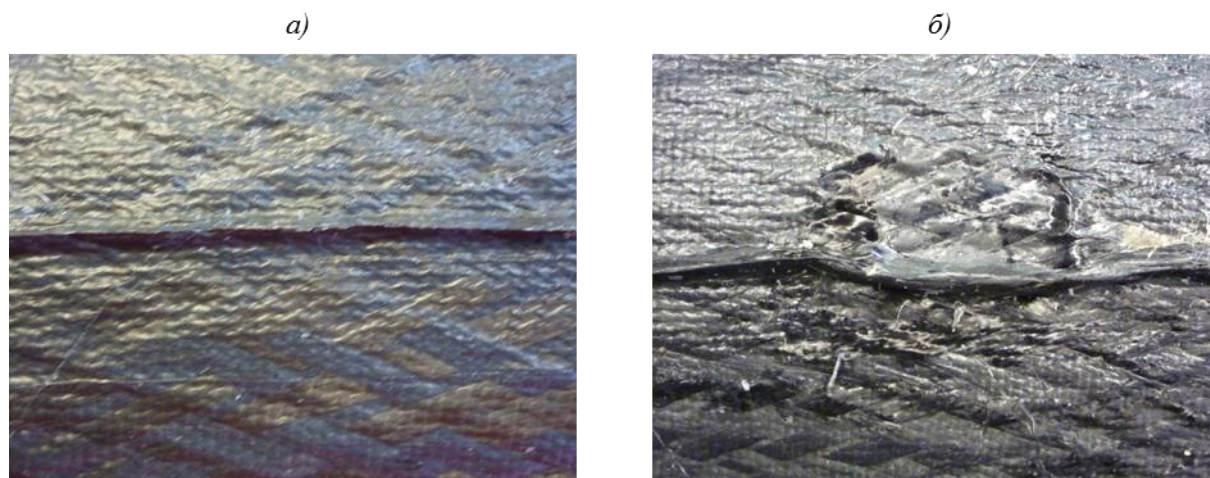


Рис. 4. Продольная складка (а) и вмятина со складкой (б) на поверхности оболочки арочного элемента

При наличии одного или нескольких указанных факторов вопрос о возможности контроля конструкции акустическим импедансным методом может быть решен путем ограничения скорости контроля, увеличения уровня браковки или введения дополнительных операций (например, при подготовке поверхности).

Проведение контроля заключается в плавном перемещении преобразователя по поверхности контролируемой конструкции без нарушения акустического контакта рабочего органа преобразователя и отметке контуров выявленных дефектов по показаниям прибора (рис. 5 и 6).



Рис. 5. Рабочий момент контроля качества заполнения арочного элемента бетоном



Рис. 6. Зона арочного элемента, не заполненная бетоном (заштрихована)

Основными мешающими факторами при контроле арочных элементов, заполненных бетоном, являются складки на поверхности (продольные и поперечные), загрязнения поверхности контроля бетоном при заполнении арки и шероховатость ее поверхности.

В результате сравнения акустического импедансного и ультразвукового амплитудного методов неразрушающего контроля было выявлено, что наиболее эффективным является импедансный метод, так как этим методом, реализуемым с использованием отдельно-совмещенного преобразователя дефектоскопа, выявляются все дефекты разного вида, в том числе заложенные в образцах в виде трещин в материале, ориентированных перпендикулярно поверхности плиты-образца и конструктивно-подобного элемента. При расположении излучающего и приемного вибраторов отдельно-совмещенного преобразователя на разных «берегах» трещины, такой дефект выявляется по исчезновению или существенному ослаблению сигнала на приемном преобразователе, о чем информирует автоматический сигнализатор дефектов. Поэтому вводить дополнительный контроль ультразвуковым амплитудным методом прохождения было признано нецелесообразным. Кроме того, такой повторный контроль удвоил бы трудоемкость контроля оболочек арочных элементов.

Таким образом, по результатам опробования выбранных методов НК в ВЭТЦ ВИАМ и в Мытищинском филиале МГСУ на полноразмерных арочных элементах предпочтение было отдано импедансному методу, реализуемому в двух вариантах – с использованием совмещенного или раздельно-совмещенного преобразователей.

Технико-экономическая эффективность применения акустического импедансного метода для НК арочных элементов следует из повышения качества [38] и, соответственно, надежности быстровозводимых мостовых сооружений.

Заключение

1. Типовыми дефектами оболочек арочных элементов из ПКМ с внутренними полостями (до заполнения их бетоном) являются зоны недопропитки – зоны, обедненные смолой при изготовлении арочных элементов. В оболочках арочных элементов возможны также зоны повышенной пористости, расслоения и другие нарушения сплошности материала. Типовыми дефектами арочных элементов после их заполнения бетоном являются зоны отсутствия соединения полимерного композита с бетоном, т. е. области, недозаполненные бетоном. Возможно появление трещин в оболочках арочных элементов при их транспортировке. Все перечисленные дефекты ухудшают качество арочных элементов и, следовательно, снижают надежность мостовых сооружений.

2. Результаты проведенных исследований показали, что наиболее эффективным методом контроля качества арочных элементов является акустический импедансный метод дефектоскопии, позволяющий выявлять дефекты при одностороннем доступе к объекту контроля. Импедансный метод реализуется в двух вариантах – с использованием совмещенного или раздельно-совмещенного преобразователей дефектоскопа, которые позволяют проводить контроль оболочек арочных элементов как до заполнения их бетоном, так и заполненных бетоном.

3. Мешающими факторами при контроле оболочек арочных элементов являются наличие в отдельных зонах продольных и поперечных складок верхнего слоя материала на поверхности ОК и высокая шероховатость поверхности контролируемой конструкции, снижающие чувствительность контроля и уменьшающие зону контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. М.: ВИАМ, 2001. Вып.: Методы испытаний и контроля качества металлических и неметаллических материалов. С. 3–8.
3. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
4. *Неразрушающий контроль: справочник в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева*. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. 864 с.
5. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // *Контроль. Диагностика*. 2007. №4. С. 23–31.
6. Murashov V.V. Types of production and operational defects of the multilayer glued constructions and polymer composite materials products and methods to detect them // *Proc. 5th European-American Workshop on Reliability of NDT*. 2013. URL: <http://www.nde-reliability.de/Proceedings/Posters> (дата обращения: 12.07.2015).

7. Мурашов В.В., Мишуров К.С. Определение пористости углепластиков в авиационных конструкциях ультразвуковым методом // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2 (35). С. 88–92.
8. Kablov E., Murashov V., Rumyantsev A. Diagnostics of Polymer Composites by Acoustic Methods // *Ultrasound*. 2006. №2. P. 7–10.
9. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф., Иванова Г.А., Файзрахманов Н.Г. Диагностика структуры, состава и свойств полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2008. №1. С. 17–24.
10. Bobrov V.T., Rozlovenko S.G., Murashov V.V. Materials characterization // *Testing. Diagnostics*. 2010. №2. С. 42–44.
11. Мурашов В.В. Определение физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов акустическими методами // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 465–475.
12. Karabutov A.A., Murashov V.V., Oraevsky A.A., Podymova N.B. Nondestructive characterization of layered composite materials with a laser optoacoustic sensor // *Conf. Nondestructive Evaluation of Materials and Composites II*. San Antonio: Published by SPIE, 1998. V. 3396. P. 103–111.
13. Карабутов А.А., Мурашов В.В., Подымова Н.Б. Диагностика слоистых композитов с помощью лазерного оптико-акустического преобразователя // *Механика композитных материалов*. 1999. Т. 35. №1. С. 125–134.
14. Способ определения физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов и устройство для его осуществления: пат. 2214590 Рос. Федерация; опубл. 20.10.03 Бюл. №29.
15. 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.
16. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Диагностика состава и свойств полимерных композитов в деталях и конструкциях // *Контроль. Диагностика*. 2008. № 8. С. 13–17.
17. Мурашов В.В. Определение состава и плотности конструкционных углепластиков лазерно-акустическим способом ультразвукового контроля // *Материаловедение*. 2014. №11. С. 24–29.
18. Murashov V. The determinations of CFRP porosity by laser-acoustic method of ultrasonic control // *Proc. of the 4th International Conference on Thermosets 2015*. Berlin: Fraunhofer Research Institution for Polymeric Materials and Composites PYCO. 2015. P. 58–60. URL: <http://www.thermosets.de/Proceedings> (дата обращения: 20.12.2015).
19. Rose J.L., Soley L.E. Ultrasonic guided waves for anomaly detection in aircraft components // *Materials Evaluation*. 2000. V. 58. №9. P. 1080–1086.
20. Hsu D.K., Dayat V., Barnard D.J. Technology of production of samples to configure and control of the equipment for the control of glue joints // *Materials Evaluation*. 2009. V. 67. №7. P. 843–850.
21. Armstrong N. Control of honeycomb panels and products made of foam by amplitude method of passing // *Materials Evaluation*. 2010. V. 68. №12. P. 27–31.
22. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефектоскопия и диагностика полимерных композиционных материалов акустическими методами // *75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбилейный науч.-технич. сб.* М.: ВИАМ, 2007. С. 342–347.
23. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 2. Методы выявления дефектов монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // *Контроль. Диагностика*. 2007. №5. С. 31–42.
24. Gunasekera A.M. Monitoring of impact damage products from PCM // *Materials Evaluation*. 2010. V. 68. №8. P. 880–887.
25. Мурашов В.В., Трифонова С.И. Контроль клеевых соединений в конструкциях и изделиях из ПКМ ультразвуковым теневым методом // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2015. №5. С. 15–23.
26. Мурашов В.В., Лаптев А.С. Контактные жидкости для создания акустического контакта при ультразвуковом контроле многослойных конструкций из ПКМ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №8. Ст. 10. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения 20.12.2015).

27. Мурашов В.В., Косарина Е.И., Генералов А.С. Контроль качества авиационных деталей из полимерных композиционных материалов и многослойных клеевых конструкций // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №3. С. 65–70.
28. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение. 1991. 272 с.
29. Мурашов В.В. Контроль клеевых конструкций // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2005. №1. С. 21–27.
30. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль клеевых соединений // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2008. №7. С. 21–28.
31. Мурашов В.В. Контроль многослойных клеевых конструкций из полимерных композиционных материалов // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2011. №10. С. 16–23.
32. Мурашов В.В., Генералов А.С. Контроль многослойных клеевых конструкций низкочастотными акустическими методами // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №2. С. 59–67.
33. Мурашов В.В., Трифонова С.И. Контроль качества полимерных композиционных материалов ультразвуковым временным способом велосиметрического метода // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №4 (37). С. 86–90. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-86-90.
34. Мурашов В.В. Выявление зон отсутствия адгезионного соединения слоев в многослойных конструкциях // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2013. №3. С. 29–31.
35. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль заготовок и деталей из углерод-углеродного композиционного материала для многоразового космического корабля «Буран» // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №4. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.10.2015).
36. Murashov V.V. Attestation of Glued Articles by Acoustic Impedance Method // *Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials*. 2010. V. 3. №4. P. 267–273.
37. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. С. 84–87.
38. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Ерасов В.С., Анчевский И.Э., Ильин В.В., Вальтер Р.С. Стенд для испытания на климатической станции ГЦКИ крупногабаритных конструкций из ПКМ // *Сб. докл. IX Междунар. науч. конф. по гидроавиации. «Гидроавиасалон-2012»*. 2012. С. 122–123.