

УДК 620.179

В.В. Мурашов¹

ПРИМЕНЕНИЕ ВАРИАНТОВ АКУСТИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСНОГО МЕТОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПКМ И МНОГОСЛОЙНЫХ КЛЕЕНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-S-469-482

Рассмотрен принцип акустического импедансного метода контроля клееных конструкций и изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Указаны эксплуатационные возможности двух основных вариантов импедансного метода. Показано, что область применения этого метода может быть существенно расширена при применении новых вариантов метода: при работе дефектоскопа в автоколебательном режиме, при электромагнитно-акустическом возбуждении упругих колебаний в объекте контроля и при использовании спектрального варианта импедансного метода.

Ключевые слова: акустический импедансный метод, варианты метода, автоколебательный режим, электромагнитно-акустический способ (ЭМА), упругие колебания, спектральный вариант.

V.V. Murashov

Application of options of the acoustic impedance method for control of parts from PCM and multilayer glued structures

The principle of acoustic impedance control method of glued structures and products from polymer composite materials (PCM) is considered. Operation capabilities of two main options of the impedance method are specified. It is shown that the scope of this method can be significantly expanded when applying new options of the method: at operation of the defectoscope in self-ibration mode, at electromagnetic-acoustic initiation of elastic fluctuations in the object of control and when using spectral option of the impedance method.

Keywords: acoustic impedance method, options of the method, self-vibration mode, electromagnetic-acoustic mode (EMA), elastic fluctuations, spectral option.

¹ Федеральное 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

В 60-е годы прошлого века в связи с развитием гражданской авиации появились конкретные задачи по контролю деталей из полимерных композиционных материалов (стеклопластиков, углепластиков и т. п.) и многослойных клееных конструкций (сотовых, слоистых), выполненных из ПКМ и металлов [1–6]. Традиционный ультразвуковой эхо-импульсный метод для решения поставленных задач не годился, ввиду значительной мертвой зоны, не позволяющей контролировать тонкостенные конструкции.

Предложенный советским ученым Ю.В. Ланге, работавшим тогда в ВИАМ, акустический импедансный метод дефектоскопии позволил успешно проводить контроль неметаллических и клееных конструкций. В ВИАМ были разработаны первые низкочастотные акустические дефектоскопы типа ИАД и УВФД, в то время полностью обеспечивающие контроль деталей из ПКМ и многослойных клееных конструкций [7, 8]. Для того чтобы отметить передовые позиции ВИАМ в области низкочастотной акустической дефектоскопии, достаточно сказать, что фирма Inspection Instruments (Великобритания) сообщила о созданном ею дефектоскопе Acoustic Flaw Detector лишь через 12 лет после разработанного ранее советского прибора ИАД-3. Создана была полная копия прибора ИАД-3, но на транзисторах.

В дальнейшем для контроля конструкций из ПКМ и многослойных клееных конструкций в ВИАМ были разработаны [9–13] низкочастотные импульсные методы (амплитудный, временной и фазовый) и совместно с ВНИИНК – дефектоскоп АД-10У. Для контроля конструкций, содержащих слои из материалов с высоким затуханием упругих колебаний, были разработаны и выпускались серийно производственным участком ВИАМ амплитудно-частотные дефектоскопы АЧД-2М и АЧД-3, которые были внедрены на предприятиях отрасли.

В настоящее время среди методов неразрушающего контроля (НК) многослойных клееных конструкций акустические методы по объему применения занимают первое место [7, 14–18]. Среди акустических методов дефектоскопии по объему внедрения на российских предприятиях импедансный метод занимает третье место, уступая лишь эхо-методу и теневому методу, а по объему внедрения для контроля многослойных клееных конструкций – первое место [19].

Особое внимание в данной статье уделено разработанным в ВИАМ новым вариантам акустического импедансного метода дефектоскопии: реализуемому в автоколебательном режиме, электромагнитно-акустическому (ЭМА) и спектральному варианту метода.

Методика проведения исследований

Принцип и эксплуатационные возможности импедансного метода

Акустический импедансный метод дефектоскопии основан на различии механических импедансов бездефектного и дефектного участков конструкции [8]. Механический импеданс \dot{Z} конструкции в точке приложения возмущающей силы \dot{F} определяется отношением этой силы к вызываемой ею колебательной скорости и является комплексной величиной:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{F}}{\dot{V}} = R + jX = |Z|e^{j\varphi}, \quad (1)$$

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 основных вариантах – с использованием совмещенного и раздельно-совмещенного преобразователя.

Факторами, ограничивающими чувствительность импедансного метода, являются [7]:

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

Разброс Z_n , обусловленный непостоянством толщины клеевого слоя, неоднородностями объекта контроля, 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 гибкость; $j = \sqrt{-1}$;) обусловлено небольшой площадью соприкосновения контактного наконечника преобразователя с контролируемым объектом [7]. 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 объекту контроля.

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 бездефектных зонах $Z_k > \frac{|Z_n|}{2}$. При $|Z_d| > |Z_k|$ (Z_d – импеданс изделия в дефектной зоне) дефекты обычно не выявляются [8], так как в этом случае импеданс изделия мало влияет на режим работы преобразователя.

Предельная толщина обшивки, при которой еще целесообразен контроль, при прочих равных условиях тем меньше, чем больше модуль упругости материала. Для конструкций с гладкими обшивками в наиболее благоприятных условиях (жесткий, сплошной металлический внутренний элемент) минимальный диаметр выявленного дефекта в миллиметрах можно приблизительно оценить по формуле [20]:

$$D_{\min} = 0,1 \sqrt{\frac{Eh^3}{9,8(1-\mu^2)}}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости материала обшивки, МПа; μ – коэффициент Пуассона; h – толщина обшивки, мм. Формула (2) справедлива для резонансного режима настройки при условии $D_{\min} < 30$ мм.

С уменьшением модуля упругости внутреннего элемента чувствительность импедансного метода падает.

Описанные ранее основные варианты акустического импедансного метода успешно применяются в промышленности с 70-х годов прошлого века. В данной работе рассмотрены предложенные в ВИАМ новые варианты импедансного метода, расширяющие область его применения.

Результаты исследований и обсуждение

Контроль клееных конструкций импедансным методом, реализуемым в автоколебательном режиме

Возможности импедансного метода при контроле клееных конструкций могут быть существенно расширены при использовании автоколебательного режима работы. На рис. 1 показана функциональная схема импедансного прибора, работающего в автоколебательном режиме. Прибор состоит из усилителя 1 и раздельно-совмещенного преобразователя 2, в корпусе которого расположены акустически изолированные друг от друга излучающий 3 и приемный 4 вибраторы. Излучающий вибратор 3 соединен с выходом усилителя, а приемный вибратор 4 – с его входом. Элементом положительной обратной связи служит зона контакта преобразователя с объектом контроля (ОК) 5, в котором имеются бездефектные зоны и дефект 6. В бездефектной зоне ОК коэффициент передачи элемента обратной связи недостаточен для возбуждения автоколебаний в системе. Уменьшение величины в зоне дефекта $|Z_n|$ увеличивает коэффициент передачи цепи обратной связи, вызывая самовозбуждение системы, что свидетельствует о наличии дефекта.

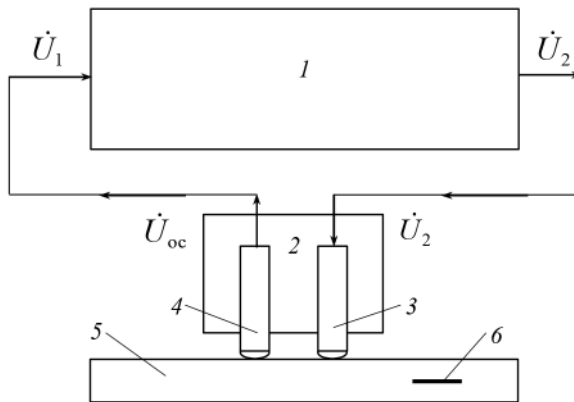


Рис. 1. Схема импедансного прибора, работающего в автоколебательном режиме:

- 1 – усилитель; 2 – разделительно-совмещенный преобразователь;
 3 – излучающий вибратор; 4 – приемный вибратор;
 5 – объект контроля; 6 – дефект (расслоение)

В замкнутой системе «усилитель–излучатель–конструкция–приемник–усилитель» обратная связь между выходом усилителя и его входом осуществляется через излучатель, материал и приемник. На рис. 1 представлена схема кольца самовозбуждения, где U_1 – электрическое напряжение на входе усилителя; U_2 – напряжение на выходе усилителя и входе излучателя; U_{oc} – напряжение на выходе приемника. Обозначим: K – коэффициент усиления усилителя; p – коэффициент передачи цепи обратной связи (точки над символами обозначают, что эти значения являются комплексными величинами).

Если напряжение на входе усилителя

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{U}_2}{K}, \quad (3)$$

а напряжение на выходе приемного вибратора

$$\dot{U}_{oc} = p\dot{U}_2, \quad (4)$$

то, учитывая, что $\dot{U}_1 = \dot{U}_{oc}$ можно считать, что коэффициенты передачи цепи обратной связи и усиления усилителя обратно пропорциональны, т. е.

$$p\dot{K} = 1. \quad (5)$$

Коэффициент передачи \dot{p} преобразователя может быть представлен в виде [8]:

$$\dot{p} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = \dot{N}\dot{A}\dot{B}\dot{C}, \quad (6)$$

где $\dot{N} = \frac{\dot{K}_1}{\dot{K}_2}$ – отношение коэффициентов передачи вибраторов, определяемых как отношение колебательной скорости к амплитуде электрического напряжения; \dot{A} и \dot{C} – коэффициенты передачи (по колебательной скорости) излучателя и приемника соответственно; \dot{B} – коэффициент передачи конструкции, учитывающий потери вследствие расхождения, затухания и отражения волны на участке между излучающим и приемным вибраторами.

При неизменных параметрах вибраторов коэффициент передачи определяется в основном коэффициентом передачи конструкции.

Для возбуждения автоколебаний в системе при нахождении преобразователя в зоне отсутствия соединения слоев конструкции необходимо, чтобы было установлено определенное соотношение между коэффициентом усиления усилителя \dot{K} и коэффициентом передачи преобразователя \dot{p} , определяемое формулой (6), путем изменения коэффициента усиления \dot{K} усилителя.

При $\dot{p} = \frac{1}{\dot{K}}$ система становится неустойчивой с самовозбуждением и для возбуждения колебаний в системе требуется начальный толчок. Запускающим систему является сигнал, возникающий при соударении контактного наконечника звукопровода приемника с контролируемой конструкцией при установке преобразователя на ее поверхность или при трении контактного наконечника по поверхности контролируемой конструкции, а также сигнал, возникающий при включении прибора с преобразователем, установленным на конструкции (в зоне отсутствия адгезионного соединения – при контроле амплитудным способом) под влиянием малых отклонений от состояния равновесия вследствие флуктуаций. Автоколебания в замкнутой системе «усилитель–излучатель–конструкция–приемник–усилитель» возникают при наличии положительной обратной связи между излучателем и приемником через контролируемую конструкцию. Признаком отсутствия адгезионного соединения при контроле амплитудным способом служит появление колебаний в системе, а при контроле частотным способом – изменение частоты колебаний в системе.

Амплитуда колебаний ξ_{Π} в точке соприкосновения приемника с конструкцией зависит от амплитуды колебаний поверхности конструкции в точке ее возбуждения ξ_n , базы l преобразователя, коэффициента затухания δ упругих колебаний в материале конструкции, входного импеданса Z_{Π} приемника и упругого сопротивления зоны контакта приемника с конструкцией $Z_{K_{\Pi}} = \frac{1}{j\omega K_{\Pi}}$ (где $j = \sqrt{-1}$; ω – круговая частота;

$K_{\text{п}}$ – контактная гибкость в зоне приема), т. е. $\xi_{\text{п}} = \varphi(\xi_{\text{и}}, l, \delta, Z_{\text{п}}, Z_{K_{\text{п}}})$. Амплитуда колебаний в точке соприкосновения излучателя с конструкцией (в точке возбуждения) $\xi_{\text{и}}$ является функцией механического импеданса $Z_{\text{и}}$ материала в этой точке и импеданса $Z_{K_{\text{и}}} = \frac{1}{j\omega K_{\text{и}}}$ – упругого сопротивления зоны контакта излучающего вибратора с материалом ($K_{\text{и}}$ – контактная гибкость в зоне излучения).

При использовании основного варианта импедансного метода, описанного в работе [8], с уменьшением $Z_{\text{и}}$ амплитуда $\xi_{\text{п}}$ возрастает, а с увеличением – падает. Поскольку нарушение сплошности (непроклей, расслоение) вызывает уменьшение $|Z_{\text{и}}|$, то амплитуда колебаний $\xi_{\text{и}}$ увеличивается и соответственно увеличивается амплитуда колебаний $\xi_{\text{п}}$.

При использовании варианта импедансного метода, реализуемого в автоколебательном режиме, при нахождении преобразователя в зоне дефекта $\xi_{\text{и}}$ увеличивается до $\xi_{\text{и}} = \xi_{\text{п max}}$. Учитывая линейную связь между $\xi_{\text{п}}$ и $\xi_{\text{и}}$, можно считать, что $\xi_{\text{п}} = \xi_{\text{п max}}$. Аналогичная зависимость существует и для колебательных скоростей.

Изменение импеданса контролируемой конструкции в зоне нарушения ее сплошности является фактором, определяющим положительную обратную связь в системе, и приводит к возбуждению автоколебаний. Автоколебательный режим работы позволяет существенно расширить область применения импедансного метода за счет возможности контроля конструкций нового типа.

Контроль клееных конструкций ЭМА вариантом импедансного метода

Упругие колебания в изделии при контроле основным вариантом импедансного метода [7, 19] возбуждаются с помощью преобразователя, контакт которого с изделием осуществляется в небольшой по площади зоне (1,5–3 мм²) через контактный наконечник, имеющий сферическую рабочую поверхность.

Общая механическая нагрузка такого преобразователя может быть представлена [8] в виде параллельного соединения механического импеданса $Z_{\text{н}}$ контролируемого изделия в зоне контакта преобразователя с изделием и упругого сопротивления $Z_{\text{к}}$ зоны контакта вибратора преобразователя с изделием

$$Z = \frac{Z_{\text{н}} Z_{\text{к}}}{Z_{\text{н}} + Z_{\text{к}}}. \quad (7)$$

Импеданс контролируемого изделия $Z_{\text{н}} = R_{\text{н}} + jX_{\text{н}}$ является величиной комплексной, а упругое сопротивление $Z_{\text{к}}$ зависит от величины контактной гибкости $K_{\text{к}}$ и круговой частоты ω и его можно принять чисто реактивным:

$$Z_k = jX_k = j\left(\frac{1}{\omega K_k}\right). \quad (8)$$

Упругое сопротивление Z_k обычно снижает чувствительность преобразователя к изменению импеданса изделия Z_H и в конечном счете ограничивает чувствительность контроля импедансным методом с использованием пьезоэлектрического контактного преобразователя.

В некоторых случаях, когда дефекты расположены слишком близко к поверхности, со стороны которой производится контроль (тонкий верхний слой), дефекты при прижатии преобразователя «захлопываются» (при этом верхний, отделенный дефектом, слой колеблется как единое целое с остальной частью изделия) и такие дефекты не выявляются.

Другим недостатком контактных импедансных дефектоскопов является изнашиваемость контактных наконечников преобразователей в процессе эксплуатации и возможное повреждение поверхности контролируемого изделия изношенными наконечниками при их взаимодействии в условиях сухого трения.

Описанные недостатки импедансных дефектоскопов могут быть устранены при использовании ЭМА способа возбуждения упругих колебаний (с помощью ЭМА преобразователя) и использовании микрофона для приема колебаний поверхности контролируемого изделия.

Возбуждение упругих колебаний с помощью ЭМА преобразователя основано на использовании эффектов намагниченности, магнитострикции и вихревых токов [7], которые в реальных условиях могут присутствовать одновременно, причем степень их проявления зависит от свойств материалов слоев конструкции, частоты, типов возбуждаемых акустических волн и конструкций преобразователей. Для возбуждения акустических колебаний в конструкциях, выполненных из материалов, обычно применяемых в авиационной технологии, наибольшее значение имеют эффекты вихревых токов и намагниченности.

При контроле многослойных конструкций, содержащих слои из немагнитных материалов (например, алюминиевых сплавов), обычно преобладают эффекты вихревых токов. Упругие колебания возбуждаются переменными электродинамическими силами [21], которые появляются в результате пондеромоторного взаимодействия вихревых токов (с плотностью \vec{i}), индуцируемых в верхнем металлическом слое переменным полем накладной катушки индуктивности, с постоянным или переменным магнитным полем (с вектором \vec{B})

$$\vec{F} = \vec{i}\vec{B}, \quad (9)$$

где \vec{F} — вектор плотности объемных сил, Н/м³.

При контроле конструкций, содержащих слои из магнитных материалов (например, из стали), упругие колебания возбуждаются силами, возникающими в результате взаимодействия поля внешнего источника (катушки индуктивности) с полем намагниченности объекта контроля, которое создается в результате намагничивания в магнитном поле ферромагнитного изделия.

Для реализации ЭМА способа возбуждения колебаний не требуется непосредственного контакта рабочего органа преобразователя (катушки индуктивности) с поверхностью изделия. При контроле необходимо постоянство зазора между катушкой и изделием, что обеспечивается при механизированном контроле конструкцией установки, а при ручном контроле – опорной деталью преобразователя.

Проведены исследования влияния зазора между рабочим органом преобразователя и контролируемой конструкцией на определяемые прибором характеристики. Замечено, что с увеличением зазора чувствительность прибора падает, т. е. чем больше зазор, тем меньше амплитуда принятого сигнала. Исследована зависимость чувствительности ЭМА способа импедансного метода от скорости перемещения преобразователя по поверхности контролируемого изделия. С увеличением скорости перемещения преобразователя чувствительность дефектоскопа падает. Исследована также зависимость производительности контроля (площадь в единицу времени) ЭМА вариантом импедансного метода от скорости сканирования при различном шаге между траекториями перемещения преобразователя. Показано, что при уменьшении шага сканирования производительность контроля падает.

Для реализации ЭМА варианта импедансного метода контроля разработан ЭМА дефектоскоп типа АД-10Б [22], предназначенный для контроля качества многослойных клееных конструкций.

*Контроль многослойных конструкций спектральным
вариантом импедансного метода*

Одним из достоинств акустического импедансного метода, реализуемого с использованием совмещенного преобразователя, является контакт рабочего органа преобразователя с изделием в одной небольшой по площади зоне (практически – в точке), что позволяет повысить локальность контроля и обеспечить более точное выявление границ дефектов. К недостаткам импедансного метода в этом варианте можно отнести возможность выявления дефектов только на небольшой глубине (для неметаллов – до 2,5 мм), а также невозможность контроля изделий, выполненных из материалов с большим затуханием звука в них.

Локальный метод свободных колебаний [23] в отличие от импедансного метода позволяет выявлять дефекты на гораздо большей глубине

(обычно до 30 мм), однако преобразователь с пьезоэлектрическим приемником имеет контакт рабочих органов с изделием в двух точках, что затрудняет выявление границ дефектов и снижает эффективность контроля изделий сложной формы. Использование преобразователей с микрофонным приемником не всегда возможно, так как эти преобразователи чувствительны к внешним шумам.

В ВИАМ предложен спектральный способ акустического импедансного метода дефектоскопии, реализуемый при ударе рабочего органа преобразователя по контролируемому изделию. Данный вариант метода может быть использован для дефектоскопии многослойных конструкций, содержащих слои из материалов с высоким коэффициентом затухания упругих колебаний и низким модулем упругости.

Критерием дефектности изделия при контроле спектральным способом акустического импедансного метода дефектоскопии служит изменение спектра колебаний бойка преобразователя при ударе его по поверхности объекта контроля [24]. По своей сути этот вариант метода является комбинацией импедансного метода, реализуемого с использованием совмещенного преобразователя, и метода свободных колебаний, при контроле которым анализируют спектр принятого сигнала.

При реализации рассматриваемого способа контроля боек ударяет по поверхности изделия, при этом свободно затухающие колебания возбуждаются как в контролируемом изделии, так и в бойке. Спектр колебаний бойка зависит от геометрических размеров бойка, материала, из которого он изготовлен, импульсных характеристик удара и импеданса изделия в контролируемой зоне. Параметры свободно затухающих колебаний бойка регистрируются пьезоэлементом и по изменению этих параметров (амплитуды и ширины спектра) судят о наличии дефекта в контролируемом изделии.

При ударе в дефектной зоне амплитуда силы уменьшается, а продолжительность соударения возрастает. Изменение длительности удара вызывает изменение его спектра. Известно [25], что чем короче импульс, тем шире его спектр, и наоборот.

Спектр одиночного импульса выражается формулой [26]:

$$S_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (10)$$

где t – время; ω – круговая частота; $j = \sqrt{-1}$; e – основание натурального логарифма.

Изменив масштаб времени в a раз, найдем спектр функции $af(t)$:

$$S_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} f(at)e^{-j\omega t} dt = S\left(\frac{\omega}{t}\right), \quad (11)$$

т. е. если длительность функции $f(t)$ уменьшена в a раз, то во столько же раз возрастет ширина спектра функции.

Возбуждаемые в бойке собственные колебания затухают с декрементом затухания, определяемым добротностью материала бойка. Логарифмический декремент затухания θ упругих колебаний бойка, возникающих при его ударе по поверхности контролируемого изделия, может быть определен по формуле [27]:

$$\theta = \frac{\pi}{Q} = \frac{\pi R}{\sqrt{\frac{m}{C_m}}}, \quad (12)$$

где Q – добротность колебательной системы; R – механическое сопротивление системы, кг/с; m – масса системы, кг; C_m – гибкость системы, $\text{с}^2/\text{кг}$.

Общая механическая нагрузка бойка Z при ударе его по поверхности изделия может быть представлена в виде уравнения (7) параллельного соединения механического импеданса Z_n контролируемого изделия в зоне контакта с бойком и упругого сопротивления зоны контакта бойка с изделием (8).

Механические импедансы $Z_n = R_n + jX_n$ бездефектных участков контролируемых изделий в рабочем диапазоне частот обычно имеют упругий характер, т. е. $X_n < 0$, хотя в зоне крупных дефектов X_n может принимать положительные значения ($X_n > 0$). Величину Z_k можно считать чисто реактивной (мнимой), причем $Z_k < 0$. Входное сопротивление $Z = R + jX$ бойка со стороны контролируемого изделия имеет в основном реактивный характер $Z = R + jX$.

На рис. 2 представлены спектрограммы импульсов свободных колебаний бойка, возбуждаемых при соударении его с поверхностью многослойной сотовой конструкции с обшивкой из стеклопластика, в доброкачественной зоне (1) и в зоне дефекта (2). При контроле ширина спектра в зоне дефекта уменьшается в ~ 4 раза, что вполне достаточно для уверенного выявления дефекта.

Спектральный способ акустического импедансного метода может быть реализован с помощью акустических дефектоскопов типа АД-60С или АД-50У со специальным преобразователем. При этом требуется организация электропитания вибратора от источника переменного тока напряжением 40–60 В. Движущийся вибратор с электронной схемой должен быть соединен проводником в виде эластичной спиральной пружины.

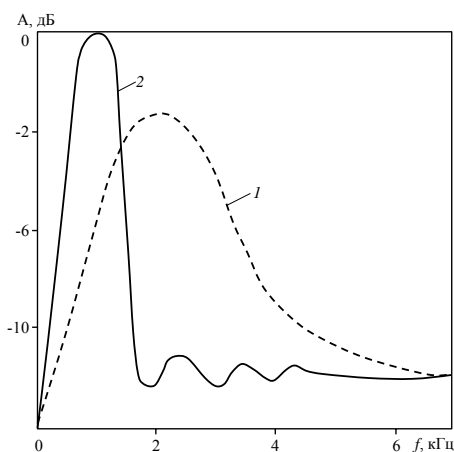


Рис. 2. Спектрограммы импульсов свободных колебаний бойка при соударении с изделием в доброкачественной зоне (1) и в зоне дефекта (2)

Заключения

Для контроля двухслойных конструкций толщиной до 10 мм из разнородных материалов предложен вариант акустического импедансного метода контроля, реализуемого в автоколебательном режиме. Разработаны амплитудный и частотный способы этого варианта метода, позволяющие уменьшить глубинную неконтролируемую зону в 2 раза и проводить контроль конструкций при одностороннем доступе со стороны более толстого слоя, контроль которых ранее импедансным методом был невозможен.

Основным достоинством ЭМА варианта импедансного метода является возможность контроля изделий в бесконтактном варианте, т. е. при отсутствии непосредственного контакта рабочего органа преобразователя с поверхностью контролируемого изделия. Этот вариант импедансного метода может с успехом применяться для контроля многослойных конструкций с металлическими верхними слоями. В некоторых случаях этот способ контроля может быть использован и для контроля конструкций из углепластика, однако чувствительность прибора при этом ниже.

Экспериментальными исследованиями частотного состава колебаний бойка преобразователя при испытаниях многослойных изделий установлено, что чувствительность контроля рассматриваемым вариантом импедансного метода дефектоскопии значительно выше, чем при контроле акустическим методом свободных колебаний при анализе параметров упругих колебаний конструкции в зоне контроля.

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») [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
3. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Сереженков А.А. Конструкционные и термостойкие клеи // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 328–335.
4. Петрова А.П., Лукина Н.Ф. Клеи для многофазовой космической системы // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.10.2016).
5. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
6. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
7. Неразрушающий контроль: справочник / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2006. Т. 3. Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. 864 с.
8. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.
9. Мурашов В.В., Косарина Е.И., Генералов А.С. Контроль качества авиационных деталей из полимерных композиционных материалов и многослойных клееных конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 65–70.
10. Мурашов В.В., Генералов А.С. Контроль многослойных клееных конструкций низкочастотными акустическими методами // Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 59–67. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-59-67.
11. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль заготовок и деталей из углеродуглеродного композиционного материала многофазового космического корабля «Буран» // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. 2013. №4. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.10.2016).
12. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций // Клеи. Герметики. Технологии. 2005. №1. С. 21–27.
13. Murashov V.V. Nondestructive Testing of Glued Joints // Polymer Science. Series D. Glues and Sealing Materials. 2009. Vol. 2. No. 1. P. 58–63.

14. 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.
15. 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. 23–32.
16. 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.
17. Karabutov A.A., Murashov V.V., Podymova N.B., Oraevsky A.A. Nondestructive characterization of layered composite materials with a laser optoacoustic sensor // Proceedings of SPIE. International Society for Optical Engineering Nondestructive Evaluation of Materials and Composites II. TX. San Antonio, 1998. P. 103–111.
18. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Диагностика состава и свойств полимерных композитов в деталях и конструкциях // Контроль. Диагностика. 2008. №8. С. 13–17.
19. Murashov V.V. Attestation of Glued Articles by Acoustic Impedance Method // Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials. 2010. Vol. 3. No. 4. P. 267–273.
20. Фельдман Л.С. Неразрушающий контроль качества клеесварных соединений. Киев: Техніка, 1973. 188 с.
21. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник в 2-х кн. / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1976. Кн. 2. С. 91–99.
22. Remizov V.B., Shkarlet Yu.M. Increase of efficiency of electromagnetic acoustic instruments by means of division of exciting frequencies and reception // 10th World Conference on Non-destructive Testing. Moscow, 1982. Report 1A-33.
23. Murashov V.V. Control of Laminated Structures by the Acoustic Free Vibration Method // Polymer Science. Series D. Glues and Sealing Materials. 2012. Vol. 5. No. 4. P. 341–345.
24. Hsu D.K., Barnard D.J., Roach D.P. Dot method of control of adhesive joints in multilayer structures // Materials Evaluation. 2009. Vol. 67. No. 7. P. 785–791.
25. Скучик Е. Основы акустики. Пер. с англ. М.: Мир, 1976. Т. 1, 2. 1066 с.
26. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. М.: Мир. 1971. С. 309.
27. Шрайбер Д.С. Ультразвуковая дефектоскопия. М.: Металлургия, 1965. С. 158.