

УДК 620.179

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-59-67

В.В. Мурашов¹, А.С. Генералов¹**КОНТРОЛЬ МНОГОСЛОЙНЫХ КЛЕЕНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
НИЗКОЧАСТОТНЫМИ АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

Рассмотрены области применения и эксплуатационные возможности двух основных вариантов акустического импедансного метода. Сообщается об особенностях импедансного метода при контроле многослойных клееных конструкций и изделий из слоистых пластиков и факторах, ограничивающих чувствительность контроля. Рассмотрены также области применения и эксплуатационные возможности двух вариантов акустического велосиметрического метода. Сообщается об особенностях временного и фазового способов велосиметрического метода при контроле многослойных клееных конструкций и изделий из слоистых пластиков и факторах, ограничивающих чувствительность контроля. Рассмотрены физические основы акустического метода свободных колебаний при выявлении зон нарушения соединений между элементами многослойных конструкций, имеющих слои с высоким коэффициентом затухания упругих колебаний и малым модулем упругости.

Ключевые слова: многослойные клееные конструкции, неразрушающий контроль, низкочастотные акустические методы, импедансный метод, велосиметрический метод, метод свободных колебаний, физические основы, эксплуатационные возможности методов.

The scope of application and operational capabilities of two main variants of acoustic impedance method are considered. The specialty of the impedance method for the testing of multilayer adhesive structures and parts made of layered plastics and effects that restrict the sensitivity of this approach are reported. The fields of application and operational capabilities of two variants of the acoustic velocimetric method are considered. The peculiarities of temporal and phase techniques of the velocimetric method as applied to test of multilayer adhesive structures and articles from layered plastics are shown. Factors restricting the testing sensitivity are described. The basic physics of the acoustic free vibration method as applied to detect distortion zones of joints between elements of multilayer structures with layers of a high damping rate of elastic vibrations and low elastic modulus are reviewed.

Keywords: multilayer adhesive structures, non-destructive testing, low-frequency acoustic methods, the impedance method, the velocimetric method, the free vibration method, the basic physics, operational capabilities methods.

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

Безопасность полетов на летательных аппаратах зависит от нескольких факторов, одним из которых является фактор надежности авиационной техники. Обеспечение высокой надежности клееных конструкций, выполненных, в том числе, из полимерных композиционных материалов (ПКМ), относится к основным задачам авиастроения, так как надежность изделий ответственного назначения в значительной степени зависит от качества их изготовления.

Клеи находят широкое применение в авиастроении. Применение клеев обеспечивает повышение надежности изделий, снижение их массы, экономию дорогостоящих и дефицитных материалов, ремонтоспособность соединений, улучшение их эксплуатационных параметров и других важных свойств изделий при одновременном упрощении технологии изготовления. Клеи все шире используются для изготовления клееных слоистых и сотовых конструкций из различных металлических и неметаллических материалов, а также клееклепаных, клеесварных и клееболтовых конструкций.

Применение клеев для изготовления неразъемных соединений обеспечивает наилучшее распределение напряжений и малую скорость распространения трещин в конструкции, что способствует повышению надежности изделий [1–3].

Для неразрушающего контроля многослойных клееных конструкций в условиях производства и эксплуатации применяются различные методы, основанные на взаимодействии проникающих излучений или физических полей с контролируемым объектом: акустические, радиационные, тепловые, оптические, электрические, радиоволновые и др. [4–8].

Для контроля клеевых соединений применяются как традиционные акустические методы, обычно реализуемые с использованием жидкости для создания акустического контакта между преобразователем прибора и изделием (иммерсионный, струйный, контактный варианты), так и специальные низкочастотные акустические методы, реализуемые с использованием сухого точечного контакта преобразователя с объектом контроля или

эластичного протектора, соединенного с рабочим органом преобразователя, а также бесконтактные методы [9–13].

К методам первой группы относятся теневой метод (прохождения), эхо-метод (основной и реверберационный варианты) и метод вынужденных колебаний (резонансный метод). К специальным низкочастотным методам относятся импедансный, велосиметрический методы, метод свободных колебаний, вибрационно-топографический и вибрационно-тепловой методы [14].

Среди акустических методов неразрушающего контроля многослойных клееных конструкций особое место занимают специальные низкочастотные методы. 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 [15].

Основная область применения специальных низкочастотных методов, к которым относятся импедансный, велосиметрический методы и метод свободных колебаний, – обнаружение зон нарушения соединений в многослойных клееных конструкциях из ПКМ на основе углеродных, борных, стеклянных, органических волокон (угле-, боро-, стекло-, органопластиков 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 [16–18].

Основными преимуществами специальных низкочастотных методов контроля 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 ме-

тодов, простоту методики контроля и возможность механизации контроля конструкций, обычно контролируемых этими методами.

Импедансный метод дефектоскопии основан на различии механических импедансов бездефектного и дефектного участков конструкции [19–21]. 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:

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

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

Разработанный в ВИАМ акустический импедансный метод дефектоскопии позволил успешно проводить контроль неметаллических и клееных конструкций. Среди акустических методов контроля качества в настоящее время по объему внедрения импедансный метод занимает третье место, уступая лишь эхо-методу и теневому методу, а по объему внедрения для контроля клееных конструкций – первое место. Подавляющая часть, например, сотовых клееных конструкций контролируется именно импедансным методом.

Импедансный метод реализуется при одностороннем доступе к контролируемой конструкции и применяется в двух вариантах: с использованием совмещенного и с использованием раздельно-совмещенного преобразователя. Области применения этих вариантов метода различны, поэтому кратко изложим возможности обоих вариантов.

Основная область применения первого варианта акустического импедансного метода – выявление дефектов клеевых соединений между сравнительно тонкой (до 2,5 мм – для алюминиевых сплавов и 1,6 мм – для сталей) обшивкой и элементом жесткости (лонжероном, нервюрой и т. п.) или наполнителем (сотами, пенопластом и др.), а также расслоений и непрочных в слоистых конструкциях с неметаллическим покрытием толщиной до 4–7 мм. Этим вариантом импедансного метода могут выявляться расслоения в монолитных конструкциях из ПКМ, которые могут рассматриваться как многослойные клееные конструкции.

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. Призна-

ком дефекта при этом служит увеличение амплитуды принятого сигнала вследствие уменьшения механического импеданса в зоне дефекта.

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. Для проверки всего сечения детали необходимо проконтролировать деталь последовательно с двух сторон.

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.

Рассмотрим более подробно возможности и особенности импедансного метода при контроле многослойных клееных конструкций и изделий из слоистых пластиков.

Импедансный метод может быть использован в случаях, когда модуль упругости материала слоя, со стороны которого производится контроль, достаточно велик (металлы, ПКМ и т. п.). Контроль со стороны материалов с низким значением модуля упругости (мягкая резина, пенопласт и т. п.) обычно невозможен.

Импедансным методом можно обнаружить зоны отсутствия сцепления между соединяемыми элементами в виде непрочных, 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 (до 0,5–0,6 мм) глубинах, и контроле конструкций с тонкими обшивками. 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 обшивки или отделенного дефектом слоя изделия;
- модуль упругости внутреннего элемента;
- соотношение жесткости обшивки или отделенного дефектом слоя изделия и жесткости всей конструкции в целом;
- шероховатость и кривизна поверхности объекта контроля.

Увеличение жесткости обшивки (или отделенного дефектом слоя конструкции), уменьшение отношения жесткости конструкции к жесткости обшивки, увеличение шероховатости и кривизны поверхности изделия приводят к снижению чувствительности метода. При заданных параметрах обшивки наибольшая чувствительность достигается при контроле изделий с толстыми, сплошными металлическими внутренними элементами.

Факторами, ограничивающими чувствительность импедансного метода, являются [19, 20]:

- разброс значений $Z_{\text{н}}$ механических импедансов в бездефектных зонах объекта контроля;
- упругое сопротивление $Z_{\text{к}}$ зоны контакта преобразователя с объектом контроля.

Разброс $Z_{\text{н}}$, 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 $Z_{\text{к}}=1/j\omega K_{\text{к}}$ (где ω – круговая частота; $K_{\text{к}}$ – контактная гибкость; $j = \sqrt{-1}$) обусловлено небольшой площадью соприкосновения контактного наконечника преобразователя с контролируемым объектом [14]. 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 $Z_{\text{к}}$ уменьшает чувствительность преобразователя к изменению импеданса изделия. Влияние $Z_{\text{к}}$ существенно только при контроле конструкций с жесткими внутренними элементами, для которых в доброкачественных зонах $Z_{\text{к}} > |Z_{\text{н}}|/2$. При $|Z_{\text{н}}| > |Z_{\text{к}}|$ (где $Z_{\text{н}}$ – импеданс изделия в дефектной зоне) дефекты обычно не выявляются [15], 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 упруго-

сти 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. На рис. 1 приведены построенные по формуле (2) кривые, позволяющие найти минимальный диаметр выявляемого дефекта в конструкциях с обшивками из стали, титанового и алюминиевого сплавов.

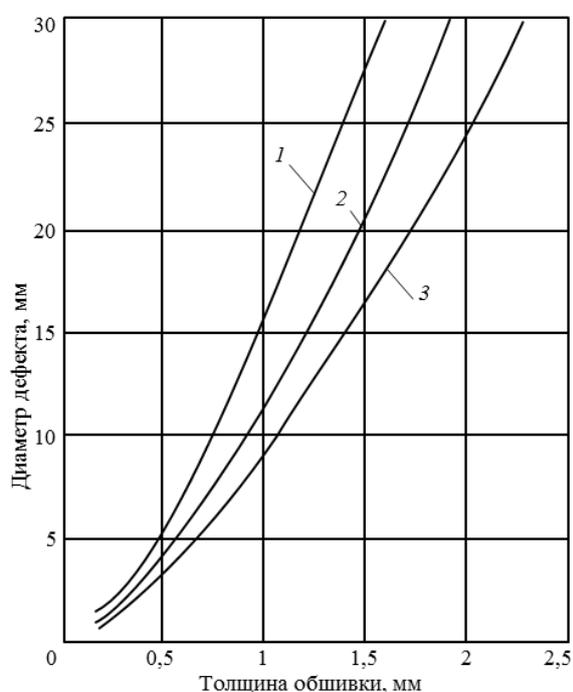


Рис. 1. Зависимость минимального диаметра дефекта, выявляемого импедансным методом в наиболее благоприятных условиях, от толщины обшивки клееной конструкции из стали (1), титанового (2) и алюминиевого сплавов (3)

С уменьшением модуля упругости внутреннего элемента чувствительность импедансного метода падает. Например, в конструкциях с наполнителем из пенопласта с плотностью ~200 кг/м³ предельная толщина обшивки в ~2 раза меньше, чем в конструкциях с металлическим лонжероном.

В настоящее время в ВИАМ разработаны и исследованы следующие варианты акустического импедансного метода контроля клееных конструкций:

- способ контроля импедансным методом при

настройке прибора на контролируемой конструкции [21];

- способ контроля, реализуемый в автоколебательном режиме [22];

- электромагнитно-акустический способ импедансного контроля [23];

- спектральный вариант акустического импедансного метода контроля [24].

Разработанные в ВИАМ варианты акустического импедансного метода позволяют расширить область применения рассматриваемого метода для контроля клееных конструкций за счет уменьшения глубинной неконтролируемой зоны, возможности проведения контроля конструкций при одностороннем доступе со стороны более толстого слоя и расширения типов и размеров контролируемых конструкций.

Конструкции, показанные в таблице, можно с успехом контролировать акустическим импедансным методом. Способ контроля акустическим импедансным методом, реализуемый в варианте настройки дефектоскопа по контрольным образцам (КО), позволяет выявлять дефекты с высокой достоверностью, но он не лишен и недостатков. Основной из них – необходимость изготовления и аттестации, как правило, большого количества КО для настройки дефектоскопа.

Виды дефектов клееных конструкций, выполненных с использованием ПКМ

Наименование	Схематичное изображение
Непроклеи в слоистых, сотовых и других конструкциях с наполнителем	
Расслоения в обшивках и деталях клееных сотовых и слоистых конструкций из ПКМ	
Инородные включения (полимерные пленки, бумага и пр.) в сотовых конструкциях	
Подмятие сотового наполнителя (потеря устойчивости)	

Неразрушающий контроль деталей и конструкций из ПКМ акустическим импедансным методом при настройке приборов без применения КО реализуется в двух вариантах:

- при настройке прибора на контролируемой конструкции («безобразцовая настройка»);
- при настройке прибора на контролируемой конструкции и имитаторе КО.

Термин «безобразцовая настройка» обозначает настройку прибора непосредственно на контролируемой конструкции без применения КО и употребляется для экономии времени. Безобразцовую настройку допускается применять только при условии предварительно опробованной методики контроля конструкций данного типа и при наличии всей необходимой информации (толщины обшивки, координат зон изменения толщин, высоты сотового заполнителя, координат элементов жесткости и др.) о контролируемой конструкции. В ВИАМ разработана производственная инструкция по неразрушающему контролю деталей и конструкций из полимерных композиционных материалов акустическим импедансным методом без применения контрольных образцов для настройки приборов, позволяющая во многих случаях исключить необходимость использования образцов для настройки приборов при контроле акустическим импедансным методом.

В ВИАМ в 60-е годы прошлого века были разработаны первые низкочастотные акустические дефектоскопы типа ИАД и УВФД, в то время полностью обеспечивающие контроль деталей из ПКМ и многослойных клееных конструкций. Чтобы отметить передовые позиции ВИАМ в области низкочастотной акустической дефектоскопии достаточно сказать, что фирма Inspection Instruments (Великобритания) сообщила о созданном ею импедансном дефектоскопе Acoustic Flaw Detector лишь через 12 лет после разработанного ранее советского прибора ИАД-3.

Для реализации импедансного метода в настоящее время в России выпускаются приборы ДАМИ-С, ИД-91М, АД-42ИМ. Представляет интерес прибор Bondascope 2100, разработанный английской фирмой NDT Sonatest Inc., работающий не на изгибных, а на продольных волнах. Этот прибор позволяет проводить контроль клеевых соединений в конструкциях путем анализа геометрического изображения комплексного числа, выражающего импеданс.

Велосимметрический метод основан на влиянии нарушений сплошности материала на скорость распространения упругих волн в контролируемой конструкции, а также на изменении пути волны между излучателем и приемником, вызванное наличием таких нарушений [25, 26]. Метод реализуется как при одностороннем, так и при двухстороннем вариантах контроля, при этом в изделии могут возбуждаться как непрерывные, так и импульсные колебания частотой 20–60 кГц, которые рас-

пространяются в виде антисимметричных волн нулевого порядка (*мода a_0*) и (или) продольных волн.

Различают два способа реализации велосимметрического метода: фазовый способ, когда дефект регистрируется по изменению фазы принятого сигнала, и временной способ – по изменению времени прохождения сигнала.

Велосимметрический метод, реализуемый при одностороннем доступе, позволяет выявлять дефекты на глубине до 30 мм. Двухсторонним велосимметрическим методом могут быть проконтролированы изделия толщиной до 100 мм. Наименьшая площадь выявляемого дефекта при контроле этим методом составляет 0,07–15 см² (в зависимости от глубины залегания дефекта и параметров контролируемого агрегата). При контроле велосимметрическим методом, реализуемым при одностороннем доступе к объекту контроля, с увеличением глубины залегания дефекта чувствительность метода падает.

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 [27]. Упругие нормальные волны, распространяющиеся в пластинах со свободными границами, могут быть двух типов: волны Лэмба и так называемые поперечные нормальные волны (SH-волны).

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 делятся на две группы, каждая из которых может распространяться в объекте контроля независимо друг от друга:

- симметричные (*s*) волны, в которых движение симметрично относительно плоскости, проходящей через середину стенки конструкции параллельно ее плоскости;

- антисимметричные (*a*) волны, в которых движение происходит асимметрично относительно этой плоскости, проходящей через середину стенки конструкции.

Фазовая скорость c_{ph} , являющаяся основной характеристикой нормальной волны, показывает скорость перемещения нулей и максимумов волнового пакета при распространении импульсов и зависит от типа волны, частоты упругих колебаний f и толщины пластины h . Семейство кривых, графически показывающих зависимость фазовой скорости от произведения fh , представляет собой график дисперсионных кривых нормальных волн (собственно «дисперсия» – зависимость скорости от частоты).

Для материалов, обычно контролируемых методами с использованием нормальных волн (угле-

стекло-, органопластики и т. п.), графики дисперсионных кривых фазовых скоростей в листах или в пластинах строят по экспериментальным данным, так как методы аналитического вычисления c_{ph} в изделиях из таких материалов весьма сложны. Для неметаллических материалов с большим затуханием упругих колебаний эту кривую можно легко снять экспериментально, перемещая приемник вдоль прямой, проходящей через точку возбуждения гармонических упругих колебаний излучающим преобразователем, и измеряя длину волны λ как расстояние между точками с одинаковыми фазами.

Групповая скорость c_{gr} показывает скорость движения переднего фронта импульса. Для упругих волн любого типа фазовые c_{ph} и групповые c_{gr} скорости отличаются лишь в условиях дисперсии, когда последняя зависит от частоты (при отсутствии дисперсии $c_{ph}=c_{gr}$). Групповая скорость c_{gr} может быть как больше, так и меньше фазовой. Зная фазовую скорость c_{ph} , групповую скорость c_{gr} можно определить [27] по формуле:

$$c_{gr} = c_{ph} - \lambda \frac{dc_{ph}}{d\lambda}, \quad (3)$$

где $\lambda = \frac{c_{ph}}{f}$ – длина волны.

Аналитический расчет c_{gr} для изделий из анизотропных армированных пластиков и других подобных материалов затруднителен. Поэтому c_{gr} можно найти по формуле (3) или снять экспериментально путем непосредственного измерения продолжительности (t) распространения импульсов упругих колебаний на известном участке пути l . Скорость c_{gr} можно найти из выражения

$$c_{gr} = l/t. \quad (4)$$

При контроле деталей из неметаллических материалов в форме пластины возбуждают волны нулевого порядка (моды s_0 и a_0). Это определяется как условиями возбуждения волн (формой контактного наконечника излучающего преобразователя, площадью его соприкосновения с изделием и др.), а также тем, что произведение fh при контроле выбирается малым.

Строго говоря, волны, возбуждаемые в изделиях в форме пластин, плит и т. п., при контроле рассматриваемыми методами не являются нормальными волнами, так как теория этих волн построена только для изотропной среды, а контролируемые изделия являются, как правило, анизотропными слоистыми пластиками (углепластик, стеклопластик и др.), или представляют собой многослойные конструкции из различных по свойствам металлических и неметаллических материалов.

Однако дисперсионные кривые для фазовых и групповых скоростей волн, возбуждаемых в изделиях из ПКМ, подобны таковым для волн s_0 и a_0 в изотропных материалах. Поэтому волны, распро-

страняющиеся в конструкциях при их контроле акустическими низкочастотными методами, целесообразно называть симметричными или антисимметричными волнами нулевого порядка, памятуя об указанном выше отличии.

При контакте устройства, включающего жестко закрепленные на фиксированном расстоянии излучающий и приемный преобразователи, с поверхностями тонких пластин из ПКМ через слой контактной смазки в пластинах возбуждаются волны, дисперсионные кривые которых показаны на рис. 2.

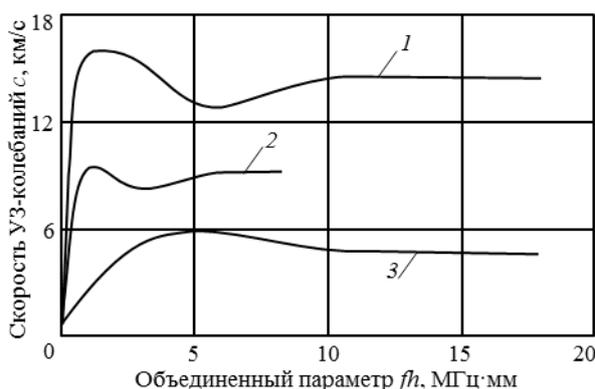


Рис. 2. Дисперсионные кривые зависимости групповой скорости c_{gr} распространения импульсов ультразвуковых колебаний в углепластике от объединенного параметра fh (произведения частоты колебаний на толщину изделия) вдоль (1 и 3) и поперек волокон (2) при структуре армирования $[0^\circ]$ (1 и 2) и $[0^\circ/90^\circ]$ (3)

Характер дисперсионных кривых волн, возбуждаемых в пластинах при выбранной авторами схеме возбуждения ультразвуковых волн, подобен волне s_0 (кривые 1 и 2 после максимума при $fh \geq 1,5$ МГц·мм) для изотропных материалов. Однако восходящие ветви кривых при $fh \leq 1,5$ МГц·мм подобны волне a_0 . Возбуждается волна (см. рис. 2), которая, видимо, является при малых значениях fh антисимметричной волной нулевого порядка a_0 , а при больших значениях fh – симметричной волной нулевого порядка s_0 .

Диапазон произведений fh , применимый для диагностики полимерных композитов, определяется по кривой $c_{gr} = \varphi(fh)$ и должен характеризоваться практическим отсутствием дисперсии скорости УЗ-колебаний (см. рис. 2). В этом случае при изменении толщины контролируемого изделия (или частоты УЗ-колебаний) групповая скорость волны не будет меняться и, следовательно, исключается погрешность, обусловленная дисперсией групповой скорости. Нижний предел частоты УЗ-колебаний ограничивается дисперсией групповой скорости – при толщине конструкции $h=4$ мм частота УЗ-колебаний f должна быть $\geq 2,5$ МГц, а при толщине конструкции $h=2$ мм частота УЗ-колебаний f должна быть ≥ 5 МГц, что находится на участке (см. рис. 2) с отсутствием дис-

персии групповой скорости УЗ-колебаний. На высоких частотах увеличивается затухание упругих колебаний в материале, что делает практически невозможным проведение измерений на частотах >10 МГц.

Описанные варианты велосиметрического метода реализуются с помощью российских приборов УВФД-1, работающего в режиме непрерывного излучения, и АД-10У, работающего в импульсном режиме. Представляют интерес прибор S2B Soudicator (фирмы Sperry, США) и прибор Mark II B Harmonic Bond Tester (фирмы Shurtronics, США), которые работают в импульсном режиме на частоте 25 кГц. В приборе Bondmaster (фирма Staveley, США) применена амплитудно-фазовая обработка принятого сигнала.

Метод свободных колебаний основан на ударном возбуждении импульсов свободно затухающих упругих колебаний в контролируемой конструкции (или ее части) и анализе параметров принятого сигнала. Признаком нарушения сплошности является изменение спектра упругих колебаний конструкции в зоне контроля и изменение амплитуды, частоты или фазы спектральных составляющих сигнала [28].

Акустический метод свободных колебаний применяется для выявления дефектов в деталях из неметаллических материалов и зон нарушения клеевых соединений между элементами многослойных конструкций, имеющих различные металлические и неметаллические слои с высоким коэффициентом затухания упругих колебаний и малым модулем упругости (элементы конструкций из органопластика, резины, ТЭП).

Спектр $\dot{S}(j\omega)$ принятого сигнала (на выходе преобразователя прибора) определяется как

$$\dot{S}(j\omega) = \dot{S}_0(j\omega)\dot{K}(j\omega), \quad (5)$$

где $\dot{S}_0(j\omega)$ – спектр импульса, формируемый при ударе бойка по поверхности контролируемого материала; $\dot{K}(j\omega)$ – обобщенный коэффициент передачи акустического тракта (материала) и приемника преобразователя. Точки над символами обозначают, что данные значения являются комплексными величинами.

Коэффициент $\dot{K}(j\omega)$ зависит от параметров конструкции, особенно ее контролируемого участка, а также от параметров приемного преобразователя. Обобщенный коэффициент передачи $\dot{K}(j\omega)$ может быть представлен в виде

$$\dot{K}(j\omega) = \dot{Y}(j\omega)\dot{P}(j\omega), \quad (6)$$

где $\dot{Y}(j\omega)$ – коэффициент передачи конструкции; $\dot{P}(j\omega)$ – коэффициент передачи приемника преобразователя.

Коэффициент $\dot{P}(j\omega)$ охватывает также участок акустического тракта, связывающий собственно преобразователь с контролируемым материалом и

входную электрическую цепь усилителя. При применении пьезоэлектрического приемника таким звеном является гибкость зоны его контакта с материалом, в случае микрофонного приемника – воздушный промежуток между микрофоном и материалом [15].

Величина $\dot{P}(j\omega)$ мало зависит от свойств контролируемого объекта (кроме случая, когда толщина отделенного расслоением слоя незначительна) и обычно для приемника данного типа может считаться постоянной.

Вид зависимости $\dot{Y}(j\omega)$ для доброкачественных и некачественных зон различен, поэтому зона отсутствия сцепления слоев материала изменяет спектр сигнала на выходе приемного преобразователя.

Импульс силы, действующей на материал при ударе по его поверхности бойка электромагнитного вибратора, может иметь различную форму. Так, при контроле слоистых пластиков (наиболее типичный случай использования метода свободных колебаний) форму ударно возбуждаемых импульсов можно аппроксимировать функцией

$$F(t) = F_m \frac{\sin^2\left(\frac{\pi t}{\tau}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi}{a}\right)} \exp\left[\frac{\pi}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{a}\right)}\left(\frac{1}{a} - \frac{t}{\tau}\right)\right], \quad (7)$$

где F_m – амплитуда силы; t – продолжительность распространения импульсов упругих колебаний; τ – длительность соударения ($0 \leq t \leq \tau$); $a = \tau/\tau_n$; τ_n – время нарастания силы от нуля до максимального значения. Формула (7) получена из формулы (12) работы [29].

Такой импульс можно условно считать «колокольным» (при $a=2$) или близким к таковому. При ударе по материалу в зоне с уменьшенным модулем упругости или в зоне с уменьшенным механическим импедансом (вследствие наличия в этой зоне изделия несплошности или уменьшения его толщины) продолжительность соударения возрастает, а амплитуда силы уменьшается. Передний фронт такого импульса становится более пологим, а задний фронт уменьшается по экспоненте с меньшим коэффициентом. При этом изменяется длительность импульса: $\tau_2 > \tau_1$. Изменение длительности соударения вызывает изменение спектра – чем длиннее импульс, тем уже его спектр.

Амплитуда спектральной плотности импульса, когда $\tau_n = \tau/2$, может быть представлена в виде [30]:

$$S_0(f) = F_m \tau \left| \frac{\sin(\pi f \tau)}{\pi f \tau [1 - (f\tau)^2]} \right| \quad (8)$$

С ростом частоты амплитуды спектральных составляющих резко уменьшаются.

В МНПО «Спектр» разработаны три модели прибора для реализации метода свободных колебаний: АД-50У, АД-60С и АД-64М. Первый и второй приборы снабжены простейшим спектроанализатором, состоящим из 12-ти газоразрядных трубок, показывающих амплитуду сигнала в определенном частотном диапазоне. Прибор АД-64М

является компьютеризированным вариантом прибора, облегчающим выбор оптимального варианта настройки.

Разработанные в ВИАМ нормативно-технические документы (производственные инструкции, технологические рекомендации, методические материалы и т. п.) содержат методические указания по выявлению различных дефектов многослойных клееных конструкций и ПКМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
2. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Сереженков А.А. Конструкционные и термостойкие клеи //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 328–335.
3. Петрова А.П., Лукина Н.Ф. Клеи для многоразовой космической системы //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 04 (viam-works.ru).
4. Rose J. Achievements and prospects of development of the ultrasonic waveguide method of control //Materials Evaluation. 2010. V. 68. №5. P. 494–500.
5. 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.
6. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль заготовок и деталей из углерод-углеродного композиционного материала многоразового космического корабля «Буран» //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 05 (viam-works.ru).
7. Murashov V.V. Nondestructive Testing of Glued Joints //Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials. 2009. V. 2. №1. P. 58–63.
8. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций //Клеи. Герметики. Технологии. 2005. №1. С. 21–27.
9. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль клеевых соединений //Клеи. Герметики. Технологии. 2008. №7. С. 21–28.
10. Generalov A.S., Boichuk A.S., Murashov V.V. Ultrasonic Strength Monitoring of Carbon Fiber Reinforced Plastics Based on Adhesive Prepregs //Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials. 2013. V. 6. №2. P. 143–147.
11. Murashov V.V. Glued Joint Strength Diagnostics //Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials. 2009. V. 2. №1. P. 64–70.
12. Генералов А.С., Мурашов В.В., Далин М.А., Бойчук А.С. Диагностика полимерных композитов ультразвуковым реверберационно-сквозным методом //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 42–47.
13. Мурашов В.В. Определение физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов акустическими методами //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 465–475.
14. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. /Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. 2-ое изд., испр. М.: Машиностроение. 2006. 864 с.
15. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение. 1991. 272 с.
16. Сорокин К.В., Мурашов В.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Прогнозирование развития дефектов в конструкциях из ПКМ способом определения изменений жесткости при актировании материала //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 20–22.
17. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Ч. 2. Методы выявления дефектов монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов //Контроль. Диагностика. 2007. №5. С. 31–36, 41–42.
18. Способ определения прочности соединения деталей интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов: пат. 2262099 Рос. Федерация; опубл. 10.10.2005. Бюл. №26.
19. Мурашов В.В. Контроль монолитных и клееных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическим импедансным методом //Авиационная промышленность. 2009. №3. С. 43–48.
20. 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.
21. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций акустическим импедансным методом //Клеи. Герметики. Технологии. 2010. №3. С. 13–20.
22. Мурашов В.В. Выявление зон отсутствия адгезионного соединения слоев в многослойных конструкциях //Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №3. С. 29–31.
23. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций электромагнитно-акустическим способом импедансного метода //Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №9. С. 35–39.
24. Мурашов В.В. Контроль многослойных конструкций спектральным способом акустического импедансного метода дефектоскопии //Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №6. С. 19–22.

-
25. Murashov V.V. Control of Multilayer Glued Constructions of Polymeric Composite Materials //Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials. 2012. V. 5. №2. P. 109–115.
 26. Мурашов В.В. Контроль многослойных клееных конструкций из полимерных композиционных материалов //Клеи. Герметики. Технологии. 2011. №10. С. 16–23.
 27. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука. 1966. С. 84–87.
 28. Murashov V.V. Control of Laminated Structures by the Acoustic Free Vibration Method //Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials. 2012. V. 5. №4. P. 341–345.
 29. Ланге Ю.В., Устинов Е.Г. Акустические импульсы ударного возбуждения изделий //Дефектоскопия. 1982. №10. С. 81–87.
 30. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. М.: Мир. 1971. 309 с.