



Неразрушающий контроль клеевых соединений

В.В. Мурашов

Апрель 2008

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем 30 научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в 4 филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Клеи. Герметики. Технологии», № 7, 2008 г.

Электронная версия доступна по адресу: www.viam.ru/public

Неразрушающий контроль клеевых соединений

В.В. Мурашов

Всероссийский институт авиационных материалов

Рассмотрены достоинства и недостатки как традиционно применяемых, так и специальных низкочастотных акустических методов неразрушающего контроля многослойных клееных конструкций. Показаны виды дефектов клееных конструкций, выполненных с использованием полимерных композиционных материалов, которые можно выявлять импедансным методом при настройке прибора по контролируемой конструкции. Указаны методы и средства неразрушающего контроля клеевых соединений в многослойных конструкциях и приведены номера методических НТД, разработанных во ФГУП «ВИАМ».

Широкое применение клеев в авиастроении обусловлено тем, что они обеспечивают повышение надежности изделий и снижение их массы, экономию дорогостоящих и дефицитных материалов, ремонтоспособность соединений и улучшение их эксплуатационных и других важных свойств при одновременном упрощении технологии изготовления изделий. Клеи все шире используют 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.

Применение клееных слоистых и сотовых конструкций в авиастроении позволяет существенно повысить весовую эффективность техники, обеспечить ее акустическую прочность и высокую надежность [1]. Практически весь фюзеляж самолета Ил-96-300 является многослойной клееной конструкцией. Большое количество разнообразных сотовых

агрегатов с металлическими (из Al-сплава, Ti-сплава, стали) и неметаллическими (из полимерных композитов) обшивками и металлическими (из Al-сплава) и неметаллическими (из стеклопластика, полиамидной бумаги типа «Номекс» и др.) сотами применено на этом и других самолетах. Так, площадь клееных конструкций на самолете Ан-72 составляет приблизительно 250 м², на Ил-86 и Ту-154М – 2350 м², на Ил-96 и Ан-124 – 3000 м², а на Ту-204 – 5730 м². В связи с этим повышаются требования к контролю качества клееных конструкций и, прежде всего, к их надежности.

Для неразрушающего контроля многослойных клееных конструкций в условиях производства и эксплуатации применяют различные методы, основанные на взаимодействии проникающих излучений или физических полей с контролируемым объектом: акустические, радиационные, тепловые, оптические, электрические, радиоволновые и др. [2]. Среди методов контроля многослойных клееных конструкций, выполненных с применением полимерных композиционных материалов (ПКМ), акустические методы по объему применения занимают первое место. Эти методы основаны на взаимодействии упругих колебаний и волн широкого диапазона частот с контролируемой деталью или конструкцией [3].

Для контроля клеевых соединений с ПКМ применяют как традиционные акустические методы, так и специальные низкочастотные акустические методы, а также бесконтактные методы [3, 4]. В акустических методах (иммерсионный, струйный, контактный варианты) обычно используют жидкости для создания акустического контакта между преобразователем прибора и изделием. Низкочастотные акустические методы реализуются с использованием сухого точечного контакта преобразователя с объектом контроля или эластичного протектора, соединенного с рабочим органом преобразователя.

К методам первой группы относятся теневой метод (прохождения), эхометод (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 [2–6].

Низкие удельные волновые сопротивления многих ПКМ позволяют улучшить акустическое согласование их с жидкостями по сравнению с таковым для металлов [4, 7]. Этот фактор облегчает контроль деталей из ПКМ методами первой группы. Кроме того, скорость распространения упругих волн в изделиях из ПКМ обычно меньше, чем в металлах, что также облегчает контроль изделий из ПКМ в иммерсионном варианте, т.е. при погружении в жидкость. При этом уменьшается преломление на границе жидкость–изделие, что является фактором, благоприятным для контроля [4].

Факторами, затрудняющими применение методов первой группы, являются высокие коэффициенты затухания упругих колебаний в ПКМ, резкое отличие акустических свойств слоев многослойных конструкций, а также шероховатость и кривизна поверхностей деталей и конструкций [3, 6]. Последний фактор особенно проявляется при контактном варианте ввода и приема упругих колебаний. Для снижения затухания в деталях из ПКМ приходится снижать рабочую частоту, что приводит к снижению чувствительности [4, 8].

Особенностью многих ПКМ является недопустимость или нежелательность их смачивания жидкостями при контроле. Поэтому при применении теневого метода и основного варианта эхометода могут использоваться в качестве контактной среды эластичные (например, полиуретановые) прокладки [9] или специальные составы для создания акустического контакта преобразователя с контролируемым материалом [10]. Реверберационный и резонансный методы контроля реализуются при смачивании конструкций из металлов и ПКМ со стороны металлического слоя, а также деталей из ПКМ, допускающих смачивание их поверхности контактными жидкостями [6].

Рассмотрим упомянутые выше акустические методы контроля подробнее.

Теневой метод (прохождения) реализуется, как правило, двумя способами: амплитудным и временным. При контроле амплитудным способом нарушения сплошности обнаруживают по ослаблению или исчезновению принимаемого сигнала, при контроле временным способом – по увеличению времени прохождения сигнала, так как путь ультразвуковых колебаний (УЗК) при огибании зоны материала с резко отличающимся характеристическим импедансом увеличивается [11]. Метод используют для обнаружения зон нарушения соединений в многослойных конструкциях и выявления расслоений, пустот, зон повышенной пористости и т.п. в деталях и конструкциях из ПКМ.

В последние 10–15 лет теневой метод в практике контроля неметаллических деталей и конструкций стали применять значительно чаще, что обусловлено возможностью его использования для контроля конструкций из гигроскопичных материалов. Применение катящихся и бесконтактных преобразователей (в последнем случае – при передаче энергии через воздух) позволяет существенно повысить производительность контроля, хотя и при некоторой потере чувствительности по сравнению с применением преобразователей, контакт которых с конструкцией осуществляется через жидкость.

Достоинство теневого метода – высокая достоверность, так как метод не имеет глубинной неконтролируемой зоны. Недостатки метода – необходимость двухстороннего доступа к контролируемой конструкции, что не всегда возможно (например, в условиях эксплуатации изделия), а также зависимость результатов контроля от акустического контакта и несоосности преобразователей [12], возникающей при контроле крупногабаритных изделий. Для обеспечения соосного расположения преобразователей при контроле таких изделий используют конструкции в виде скоб или специальные системы ориентации [13].

Эхометод (метод отражения) заключается в посылке в контролируемую деталь преобразователем ультразвукового импульса и

приеме тем же или другим преобразователем отраженных от структурных неоднородностей и от противоположной поверхности детали (дна) сигналов. По временной развертке можно различать отраженные сигналы и фиксировать время их прихода [3]. В этом основном варианте эхометод применяют для выявления непроклеев и расслоений в клееных конструкциях из ПКМ толщиной от 4–10 до 100–200 мм, причем за рубежом метод применяют шире, чем в России.

При контроле эхометодом деталей и конструкций из неметаллических материалов большой толщины приходится переходить на низкие частоты (обычно 200–1250 кГц), что обусловлено высоким затуханием УЗК в неметаллах. Переход на низкие частоты приводит к снижению чувствительности контроля эхометодом. Для контроля эхометодом деталей большой толщины разработан прибор УД 2-16.

Реверберационный метод контроля (метод многократных отражений), называемый также эхореверберационным методом и являющийся разновидностью ультразвукового импульсного эхометода, в последнее время находит все более широкое применение в нашей стране и за рубежом для контроля качества клеевых соединений в многослойных конструкциях [14, 15]. Этот метод использует влияние зоны нарушения соединения между слоями с различными значениями характеристических импедансов и коэффициентов затухания упругих волн на количество и скорость уменьшения амплитуд многократно отраженных импульсов в слое с меньшей величиной коэффициента затухания.

В ряде случаев реверберационный метод является недостаточно эффективным из-за трудности расшифровки результатов контроля. Изображения эхоимпульсов на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) прибора, многократно отраженных в контролируемой конструкции, зачастую сливаются, причем количество и скорость уменьшения амплитуд эхоимпульсов установить затруднительно.

Возможности реверберационного метода существенно расширяются при использовании спектрального анализа эхоимпульсов, прошедших через клеевой слой или отраженных от зоны нарушения соединения [16]. Спектральный вариант реверберационного метода [17] основан на регистрации изменения формы огибающей амплитудного спектра эхоимпульсов в зависимости от качества соединения.

К недостаткам реверберационного метода относятся: трудность или невозможность выявления зон нарушения соединения в том случае, когда клеевой слой прилегает к обшивке, со стороны которой проводится контроль (непроклей между клеевым слоем и внутренним элементом конструкции); трудность выявления зон нарушения соединения в конструкциях с очень тонкими обшивками и с обшивками из материалов с высоким затуханием в них упругих колебаний. Общим недостатком метода является возможность контроля, как правило, только комбинированных клеевых конструкций типа металл–пластик с небольшой кривизной, причем при контроле применяется контактная жидкость.

Метод вынужденных колебаний (резонансный метод), применяемый для контроля многослойных конструкций из ПКМ, является разновидностью резонансного метода, используемого для толщинометрии и контроля металлических деталей. Признаком нарушения сплошности при контроле таким модифицированным резонансным методом служит изменение резонансной частоты нагруженного на конструкцию пьезопреобразователя. Дополнительным признаком нарушения сплошности может служить изменение добротности системы пьезоэлемент–изделие.

Резонансный метод может применяться для контроля клеевых конструкций в тех случаях, когда применение других методов (например, импедансного) не эффективно. Так, резонансным методом выявляют нарушения сплошности двухслойных материалов при одностороннем доступе со стороны более толстого слоя [18].

Недостатками резонансного метода контроля являются затруднительность или невозможность контроля криволинейных конструкций, а также необходимость смачивания поверхности конструкции при контроле.

Импедансный метод реализуется при одностороннем доступе к контролируемому агрегату и применяется в двух вариантах: с использованием совмещенного и с использованием отдельно-совмещенного преобразователя [3–5].

Метод основан на различии механических импедансов бездефектного и дефектного участков конструкции. Механический импеданс Z_n конструкций в точке приложения возмущающей силы F определяется отношением этой силы к вызываемой ею колебательной скорости V и является комплексной величиной [4]:

$$Z_n = \frac{F}{V} = R_n + jX_n = |Z_n| e^{j\varphi},$$

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

Среди акустических методов контроля качества в настоящее время по объему внедрения импедансный метод занимает третье место, уступая лишь эхометоду и теневому методу, а по объему внедрения для контроля клееных конструкций – первое место. Подавляющая часть, например, сотовых клееных конструкций контролируется именно импедансным методом.

Первый (основной) вариант импедансного метода характеризуется высокой чувствительностью (наименьшая площадь выявляемого нарушения сплошности в наиболее благоприятных условиях составляет $0,07 \text{ см}^2$), но сравнительно малой глубиной залегания выявляемых несплошностей (наибольшая толщина обшивки из алюминиевых сплавов – 2,5 мм, из ПКМ – 7 мм, иногда до 10 мм). К недостаткам этого варианта метода можно отнести наличие большой глубинной неконтролируемой зоны [3, 4].

Вторым вариантом импедансного метода выявляются нарушения сплошности в ПКМ на глубине до 15 мм, что значительно превышает возможности основного варианта импедансного метода. Это обусловлено тем, что контактная гибкость при разделении функции излучения и приема УЗК не оказывает столь сильного влияния на характеристики импедансного метода [5]. Однако в отличие от основного варианта импедансного метода второй вариант метода менее чувствителен к близко залегающим нарушениям сплошности.

Для реализации импедансного метода в настоящее время выпускают приборы ДАМИ-С, ИД-91М, АД-42ИМ. В Англии по типу российских импедансных приборов разработаны приборы типа Acoustic Flaw Detector (фирма «Inspection Instruments [NDT]LTD»), которые по своим эксплуатационным характеристикам не превосходят российские аналоги. 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.

Американский прибор Harmonic Bond Tester (фирма «Shartronics Corp.») позволяет реализовать импедансный метод контроля в интересном варианте: возбуждение упругих колебаний в контролируемой конструкции осуществляется электромагнитно-акустическим (ЭМА) способом, прием – на микрофон. Таким образом, непосредственного контакта рабочего органа преобразователя прибора с поверхностью контролируемого объекта не происходит, что позволяет по сравнению с контактным вариантом импедансного метода повысить скорость перемещения преобразователя при контроле (а, следовательно, производительность контроля) и дает возможность выявлять расслоения, часто «захлопываемые» при контактном контроле (т.е. расположенные близко к поверхности, со стороны которой проводится контроль).

Следует отметить, что импедансным методом с использованием ЭМА-способа возбуждения упругих колебаний можно контролировать лишь конструкции с электропроводящим (как правило, металлическим) верхним слоем, что существенно снижает область применения описываемого метода. В отдельных случаях возможен контроль конструкций с обшивками из углепластика.

Возбуждение упругих колебаний возможно и с помощью газа, выходящего из сопла в корпусе преобразователя. Реализуемый при этом газодинамический метод является вариантом импедансного метода.

Велосиметрический метод основан на влиянии структурных неоднородностей на скорость распространения упругих волн в контролируемой конструкции, а также на изменении пути волны между излучателем и приемником, вызванном наличием таких неоднородностей [3]. 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 распространяются в виде антисимметричных волн нулевого порядка (мода a_0) и (или) продольных волн [4].

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

Неметаллические материалы часто весьма неоднородны и их упругие свойства на разных участках неодинаковы. Поэтому скорость распространения упругих изгибных волн зависит от количества связующего и распределения его по объему материала, пористости и других микроструктурных отклонений. Это затрудняет контроль велосиметрическим методом с использованием одностороннего варианта, поскольку в зонах без макроструктурных отклонений (нарушений сплошности) показания фазометра прибора меняются. Иногда эти изменения настолько велики, что

контроль с использованием одностороннего варианта метода оказывается невозможным.

Одностороннему варианту метода свойственна глубинная неконтролируемая зона, прилегающая к поверхности, противоположной поверхности ввода УЗК. Она составляет 20–40% от толщины стенки конструкции. Двухсторонний вариант метода не имеет глубинной неконтролируемой зоны, поэтому при контроле этим вариантом метода можно выявлять нарушения сплошности во всем сечении конструкции.

Велосиметрическому методу свойственна краевая (интерференционная) неконтролируемая зона, обусловленная интерференцией бегущей волны, распространяющейся от излучающего преобразователя к приемному, с волнами, отраженными от границ и переходных сечений изделия, обогнувшими конструкцию по окружности и т.п. Интерференционные помехи затрудняют контроль небольших (менее 500×500 мм) деталей и конструкций, не содержащих сильно поглощающих упругие колебания неметаллических слоев. По той же причине не выявляются нарушения сплошности вблизи краев и зон резкого изменения сечений контролируемых изделий. Двухсторонний вариант метода существенно меньше подвержен влиянию интерференционных помех.

Описанные варианты велосиметрического метода реализуются с помощью отечественных приборов УВФД-1, работающего в режиме непрерывных излучений, и АД-10У, работающего в импульсном режиме. Представляют интерес прибор S2B Sondicator (фирмы «Sperry», США) и прибор Mark IIВ 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 [3–5]. Предложен вариант метода, при реализации которого признаком нарушения сплошности является изменение параметров колебаний бойка, а именно амплитуды и ширины спектра его собственных колебаний [19]. В практике контроля ПКМ используют чаще всего локальный вариант метода.

Простейший вариант метода свободных колебаний – простукивание – широко применяют с древнейших времен до настоящего времени для выявления пустот, трещин, качества склеивания и т.п. [4]. Существенным недостатком простукивания, ограничивающим его применение, является субъективность оценки результатов контроля. Чаще всего метод свободных колебаний применяют для контроля конструкций, содержащих резиноподобные слои, т.е. слои из материалов с большим затуханием упругих колебаний и низким модулем Юнга. К недостаткам метода относится то, что при контроле даже со стороны неметаллического слоя производится шум.

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.

В США разработан дефектоскоп [20] для контроля многослойных конструкций методом свободных колебаний. Однако ЭЛТ, используемая для индикации дефектов, не устраняет субъективности оценки результатов контроля.

Акустико-топографический метод основан на возбуждении в контролируемой конструкции упругих колебаний и регистрации распределения их амплитуд на поверхности конструкции [21]. Метод применяют для

выявления нарушений сплошности соединения слоев в многослойных паяных, а в некоторых случаях и клееных конструкциях. В качестве индикатора для обнаружения и фиксации различия в уровне колебаний исследуемых зон поверхности контролируемой конструкции обычно применяют тонкодисперсные порошки, а также пасты и суспензии [22].


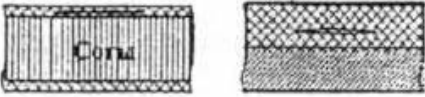

Акустико-эмиссионный метод основан на регистрации акустических волн, возникающих при пластической деформации участка контролируемого объекта. Метод применяют для контроля деталей из ПКМ и многослойных клееных конструкций [23]. Следует отметить, что этот метод в промышленности имеет ограниченное применение, что объясняется необходимостью нагружения контролируемой детали или конструкции и сложностью методики контроля. За рубежом метод используют гораздо шире, чем в нашей стране.

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.

Конструкции, показанные в табл. 1, можно с успехом контролировать акустическим импедансным методом. Способ контроля акустическим импедансным методом, реализуемый в варианте настройки дефектоскопа по рабочим стандартным образцам (PCO), позволяет выявлять дефекты с высокой достоверностью, но не лишен и недостатков. Основной из них – необходимость изготовления и аттестации, как правило, большого количества PCO для настройки дефектоскопа.

Таблица 1.

Виды дефектов клееных конструкций, выполненных с использованием ПКМ

Наименование дефекта	Схематичное изображение конструкции
Неприклеи в слоистых, сотовых и других конструкциях с заполнителем	
Расслоения в обшивках и деталях клееных сотовых и слоистых конструкций из ПКМ	
Инородные включения (полимерные пленки, бумага и пр.) в сотовых конструкциях	
Подмятие сотового заполнителя (потеря устойчивости)	

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

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

Термин «безобразцовая настройка» обозначает настройку прибора непосредственно на контролируемой конструкции без применения РСО и употребляется для краткости.

Безобразцовую настройку допускается применять только при условии предварительно опробованной методики контроля конструкций данного типа и наличии всей необходимой информации о контролируемой конструкции (толщины обшивки, координаты зон изменения толщин, высота сотового заполнителя, координаты элементов жесткости и др.).

Во ФГУП «ВИАМ» разработана производственная инструкция ПИ 1.2.696–2003 «Неразрушающий контроль деталей и конструкций из полимерных композиционных материалов акустическим импедансным методом без применения рабочих стандартных образцов для настройки приборов», позволяющая во многих случаях отойти от необходимости

использования образцов для настройки приборов при контроле акустическим импедансным методом.

Таблица 2.

Методы и средства контроля клееных конструкций акустическими методами

Метод	Вариант метода	Типы приборов, фирмы и страны-изготовители	НТД «ВИАМ» по методике неразрушающего контроля
Импедансный	Изгибных и продольных волн	ИД-91М («АКА-Контроль», Москва), АД-42ИМ (МНПО «Спектр», Москва), ИД-401 и АД-701М («Контроль. Измерения. Диагностика», Москва), ДАМИ-С («Votum», Молдова), AFD-1000 («Stavely», США), BondaScope 2100 («NDT Instruments», США), Laminar 200 («Sonatest», Великобритания)	ПИ 1.2.696–2003; ПИ 1.2А.522–99
Собственных колебаний	Вынужденных колебаний (резонансный)	АД-21Р и УП-20Р (Фенол-2) (ПО «Волна», Новгород), Bondtester («Fokker», Нидерланды)	ТР 1.2.936–87
	Свободных колебаний	АДС-60С, АД-50У и АД-64М (МНПО «Спектр», Москва), АД-701М («Контроль. Измерения. Диагностика», Москва)	ПИ 1.2А.215–99
Прохождения	Теневой	УД2В-П, УД2Н-П (НПЦ «Кропус», Ногинск; НПП «Технотест-М», Москва), УД2-12 (ПО «Волна», Новгород; НПП «Технотест-М», Москва; «Константа», Санкт-Петербург), УД2-16 (ПО «ЧРПЗ», СССР), УД4-Т («Votum», Молдова), UFD-S («Sonatest», Великобритания)	ТР 1.2.660–86; ТР 1.2.1660–2000
	Велосиметрический	АД-10У (ПО «Волна», Новгород), Sondikator S-2В («Sperry», США), Harmonic bondtester Mark II («Shurtronics», США), MIZ-21 Sra («Zetec», США), Bondmaster («Stavely», США)	ПИ 956–76
Отражения	Реверберационный	УД2В-П (НПЦ «Кропус», Ногинск; НПП «Технотест-М», Москва), УД2-12 (ПО «Волна», Новгород; НПП «Технотест-М», Москва; «Константа», Санкт-Петербург), УД4-Т («Votum», Молдова), UFD-S («Sonatest», Великобритания)	ТР 1.2.137–79
	Эхометод	УД2В-П, УД2Н-П (НПЦ «Кропус», Ногинск; НПП «Технотест-М», Москва), УД2-70 («Луч», Москва), УДЛ-2М (ОК «Винфин», Москва), УД2-12 (ПО «Волна», Новгород; НПП «Технотест-М», Москва; «Константа», Санкт-Петербург), УД2-16 (ПО «ЧРПЗ», СССР), УД4-Т («Votum», Молдова), UFD-S («Sonatest», Великобритания)	ТР 1.2.1660–2000

Примечание. Типы приборов указаны ориентировочно. Для контроля могут быть использованы и другие приборы, позволяющие реализовать данный метод контроля.

В табл. 2 указаны методы и средства неразрушающего контроля изделий из ПКМ и многослойных конструкций, которые позволяют выявлять дефекты типа нарушения сплошности (расслоения, непроклеи, трещины, воздушные полости, инородные включения и т.п.), а также даны номера методических нормативно-

технических документов, которые можно запросить в ВИАМ. 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.

Список литературы:

1. Петрова А.П. Клеящие материалы: Справочник // Под ред. Е.Н. Каблова, С.В. Резниченко. М.: Ред. журн. «Каучук и резина». 2002. С. 5–174.
2. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций // Клеи. Герметики. Технологии. 2005. №1. С. 21–27.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль: 2-е изд., испр. / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. М.: Машиностроение, 2006. 864 с.
4. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение. 1991. 272 с.
5. Ланге Ю.В. // Контроль. Диагностика. 2004. №2. С. 39–41.
6. Мурашов В.В. // Дефектоскопия. 1990. №9. С. 46–52.
7. Nondestructive Testing Handbook: 2-nd ed. V. 7: Ultrasonic Testing. American Society for Nondestructive Testing. 1991. 893 p.
8. Nagem R.J., Seng J.M., Williams J.H. // Materials Evaluation. 2000. V. 58. N 9. P. 1065–1074.
9. Бархатов В.А., Нестерова Л.А. // Дефектоскопия. 1994. №11. С. 70–77.
10. А. с. 1533504. Материал для создания акустического контакта при ультразвуковом контроле / В.В. Мурашов. Л.И. Нагорная. В.И. Косткин. Приоритет от 02.03.1988.
11. Крюков И.И. // Дефектоскопия. 1992. №12. С. 13–23.
12. Ермолов И.Н., Ермолов М.И. Ультразвуковой контроль. М.: НПО ЦНИИТМАШ, 1993. С. 15–28.
13. А. с. 1309698. Система ориентации преобразователей дефектоскопа / В.В. Мурашов, В.И. Косткин, Г.А. Любашов. Приоритет от 15.06.1983.
14. Nagem R.J., Seng J.M., Williams J.H. // Materials Evaluation. 2000. V. 58. N 11. P. 1310–1319.
15. Papadaris E.P. // Materials Evaluation. 1978. V. 36. N 2. P. 37–40.
16. Chamders J.K., Tucker J.R. // Insight. 1999. V. 41.

17. А. с. 819688. Ультразвуковой способ контроля качества соединений в многослойных клееных конструкциях / В.В. Мурашов, В.Н. Токтуева, С.Д. Мастеров и др. Приоритет от 29.04.1977.
18. Мурашов В.В. // Сб.: Неразрушающие методы контроля: Вып. 3. М.: ВИАМ, 1985. С. 46–51.
19. А. с. 630577. Способ дефектоскопии изделий / В.В. Падейский, В.В. Мурашов, С.Е. Барышев. Приоритет от 14.08.1975.
20. NDT International. 1982. V. 15. N 2. P. 103.
21. Бирюкова Н.П., Макаров А.Н. // Сб. тез. докл. X Всесоюз. науч.-техн. конф.: Неразрушающие физические методы и средства контроля: Кн. 1. Львов. 1984. С. 88.
22. А. с. 938136. Индикаторная паста / В. В. Мурашов. Приоритет от 15.04.1980.
23. Roget J. Acoustic emission: Valuable applications and future trends // Non-Destruct. Test.: Proc. 4th Eur. Conf., London, 13–17 Sept., 1987. Oxford etc., 1988. V. 4. P. 3038–3092.