



УДК 532.5:620.179.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-10-10

**КОНТАКТНЫЕ ЖИДКОСТИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ
АКУСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ
КОНТРОЛЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ**

В.В. Мурашов

доктор технических наук

А.С. Лаптев

Август 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – 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 тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех 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.

В.В. Мурашов¹, А.С. Лантев¹

КОНТАКТНЫЕ ЖИДКОСТИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ

Описаны ультразвуковые методы неразрушающего контроля и технической диагностики, требующие применения контактной жидкости для создания акустического контакта между преобразователем прибора и контролируемым изделием. Рассмотрены три группы контактных жидкостей и исследована предложенная ВИАМ контактная жидкость МБГ-1 на основе водного раствора поливинилового спирта. Приведены результаты экспериментальных исследований способов удаления контактной жидкости после окончания контроля.

Ключевые слова: *неразрушающий контроль, техническая диагностика, ультразвуковые методы, контактные жидкости, акустический контакт, клеевые соединения, полимерные композиционные материалы (ПКМ).*

V.V. Murashov, A.S. Laptev

CONTACT LIQUIDS FOR CREATION OF AN ACOUSTIC CONTACT AT ULTRASONIC CONTROL OF MULTI-LAYER STRUCTURES FROM PCM

Ultrasonic methods of non-destructive testing and technical diagnostics, which require application of contact liquids for creation of an acoustic contact between the converter of a test device and the product under control are described. Three groups of contact liquids are considered. The contact liquid MBG-1 based on aqueous solution of polyvinyl alcohol offered by VIAM was investigated. Results of pilot studies of methods to remove the contact liquid after the control procedure are given.

Keywords: *non-destructive testing, technical diagnostics, ultrasonic methods, contact liquids, acoustic contact, glued joints, polymer composite materials (PCM).*

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

Введение

Наиболее актуальной проблемой повышения надежности изделий авиационной техники является повышение их качества как главного показателя оценки надежности изделий ответственного назначения [1–6].

Для контроля качества многослойных клееных конструкций и изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) применяются как традиционные акустические методы (отражения, прохождения и др.), обычно реализуемые с использованием жидкости для создания акустического контакта между преобразователем прибора и изделием (иммерсионный, струйный, контактный варианты) [7–19], так и специальные низкочастотные акустические методы, реализуемые с использованием сухого точечного контакта преобразователя с объектом контроля [20–23] или эластичного протектора [24], соединенного с рабочим органом преобразователя, а также бесконтактные методы [25].

К методам первой группы относятся теневой метод (прохождения), эхо-метод (основной и реверберационный варианты) и метод вынужденных колебаний (резонансный метод) [26]. К специальным низкочастотным методам относятся импедансный, велосимметрический методы, метод свободных колебаний, акустико-топографический и акустико-эмиссионный методы [27–29].

Низкие удельные волновые сопротивления многих ПКМ позволяют улучшить акустическое согласование их с жидкостями по сравнению с таковыми для металлов [30]. 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 [31]. При этом уменьшается преломление на границе раздела «жидкость–изделие», что является фактором, благоприятным для контроля [30].

Факторами, затрудняющими применение методов первой группы, являются высокие коэффициенты затухания упругих колебаний в ПКМ, резкое отличие акустических свойств материалов слоев многослойных конструкций, а также шероховатость и кривизна поверхностей деталей и конструкций [32, 33]. 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 [34–36].

Особенностью многих ПКМ является недопустимость или нежелательность их смачивания жидкостями при контроле. Поэтому при применении теневого метода и основного варианта эхо-метода могут использоваться в качестве контактной среды эла-

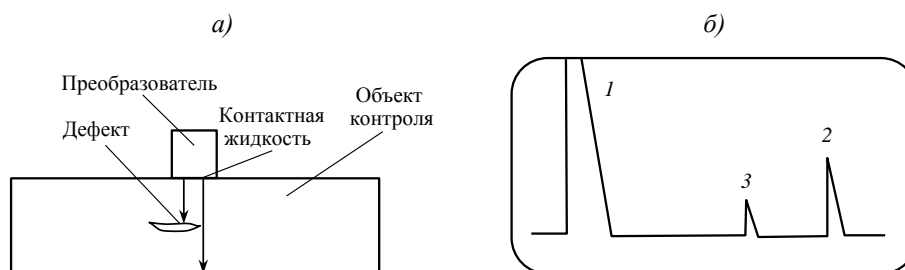
стичные (например, полиуретановые) прокладки [24] или специальные составы для создания акустического контакта преобразователя с контролируемым материалом. Реверберационный и резонансный методы контроля реализуются при смачивании конструкций из металлов и ПКМ со стороны металлического слоя, а также деталей из ПКМ, допускающих смачивание их поверхности контактными жидкостями [37–40].

Рассмотрим упомянутые выше акустические методы контроля, требующие применения жидкости для создания акустического контакта между преобразователем прибора и изделием, подробнее.

Материалы и методы

Эхо-метод (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 [30]. В этом основном варианте эхо-метод применяется для выявления непрочлеев и расслоений в клееных конструкциях из ПКМ толщиной от 4–10 до 100–200 мм, причем за рубежом метод применяется шире, чем в России.

Принцип контроля эхо-методом показан на рисунке.



Прохождение импульса УЗК в дефектной и в доброкачественной зонах конструкции из ПКМ:

a – схема контроля эхо-методом; *б* – временная развертка (А-скан) пути прохождения ультразвукового импульса (*1* – зондирующий импульс (сигнал, посылаемый в объект контроля); *2* – сигнал, отраженный от противоположной поверхности (дна) объекта контроля; *3* – сигнал, отраженный от дефекта)

Методика контроля эхо-методом заключается в перемещении преобразователя дефектоскопа, прижатого к поверхности объекта контроля, смазанной контактной жидкостью, и наблюдении за экраном дефектоскопа, а также световым или звуковым сигналом, информирующем о нахождении преобразователя в зоне дефекта.

Для реализации эхо-метода применяются различные высокочастотные преобразователи: прямые совмещенные контактные, наклонные, содержащие в своей кон-

струкции призму, и раздельно-совмещенные. Для контроля ПКМ ввиду высокого затухания ультразвука в материале обычно используют низкочастотные преобразователи, которые отличаются от высокочастотных большими размерами и толщинами пьезоэлементов. Такие пьезоэлементы в низкочастотных преобразователях часто выполняются в виде пакетов из нескольких пьезопластин, электрически соединенных параллельно.

Для обнаружения дефектов в многослойных клееных конструкциях и изделиях из ПКМ, которые плохо выявляются эхо-методом, могут применяться и другие методы отражения, подробно описанные в работе [30]: эхо-зеркальный, дельта-метод, дифракционно-временной, реверберационный, ультразвуковая микроскопия, когерентный. Эти методы могут применяться для исследования видов и параметров дефектов. Возможности эхо-метода при дефектоскопии многослойных клееных конструкций и изделий из ПКМ рассмотрены в работе [30].

Методы отражения реализуются:

- контактным способом при прижатии преобразователя к поверхности объекта контроля, смоченной контактной жидкостью, или преобразователя с эластичным протектором;
- иммерсионным способом через слой воды путем погружения в иммерсионную ванну, при струйном контакте, при использовании локальной ванны или щелевого способа.

При контроле эхо-методом деталей и конструкций из неметаллических материалов большой толщины (как правило, контактным способом; иммерсионный способ применяется очень редко) приходится переходить на низкие частоты (обычно 200–1250 кГц), что обусловлено, как было указано выше, высоким затуханием УЗК в неметаллах. Переход на низкие частоты приводит к снижению чувствительности контроля эхо-методом.

В качестве контактных жидкостей для создания акустического контакта между преобразователем дефектоскопа и контролируемым изделием при ультразвуковом контроле контактным способом используются различные жидкости и вязкие вещества: вода, трансформаторное и машинное масла, глицерин, смесь карбоксиметилцеллюлозы с водой, смазка ЦИАТИМ-201 и другие вещества. Обладая определенными достоинствами эти жидкости и смазки имеют и существенные недостатки.

Вода обладает малой вязкостью и легко стекает с наклонных поверхностей или проникает в поры неметаллических материалов. Кроме того, вода вызывает коррозию контролируемых металлических элементов конструкций.

Различные масла, масло- и жиросодержащие составы зажиривают поверхность контролируемой детали и при последующих операциях покраски, склеивания, анодирования или каких-либо иных аналогичных технологических операциях требуют удаления этих веществ и обезжиривания поверхности контроля с последующим контролем качества обезжиривания.

Применение глицерина не всегда возможно из-за его химического взаимодействия с некоторыми покрытиями. Составы, включающие карбоксиметилцеллюлозу и воду, требуют их удаления после окончания контроля путем протирки поверхности проконтролированной детали сначала влажной, а затем сухой салфеткой, причем в некоторых случаях полностью удалить состав затруднительно.

В ВИАМ разработаны составы контактных жидкостей для ультразвуковой дефектоскопии, позволяющие проводить контроль как со стороны металлических, так и со стороны неметаллических элементов конструкций, в том числе выполненных из пористых материалов.

Разработанные жидкости по способу их удаления после окончания контроля можно разделить на три группы:

- удаляемые с поверхности изделия путем его протирки салфеткой;
- образующие после высыхания на поверхности изделия эластичную пленку, легко удаляемую путем отдира при захватывании ее за край пальцами руки;
- испаряющиеся и не требующие их удаления.

Для повышения производительности контроля за счет сокращения времени на вспомогательные операции, связанные с обезжириванием проконтролированной детали, предложено в качестве органической жидкости, входящей в контактный состав, использовать пропиленгликоль при следующем содержании компонентов в составе (% по массе):

- 85–99,5 пропиленгликоля;
- 0,5–15 этилового (бутилового) спирта.

Данный контактный состав обладает достаточной вязкостью и позволяет проводить контроль деталей с криволинейными поверхностями. Кроме того, состав обладает высокой смачивающей способностью, что позволяет обеспечить надежный акустический контакт между преобразователем и контролируемой деталью.

Оптимальная вязкость контактного состава на основе пропиленгликоля может быть получена путем варьирования содержания этилового (бутилового) спирта в составе – от 0,5 до 15% (по массе). Повышенная вязкость состава необходима при контроле

конструкций из материалов с повышенной пористостью, к которым относятся некоторые ПКМ.

После окончания контроля контактный состав стирается с поверхности детали салфеткой, причем наличие в составе этилового (бутилового) спирта улучшает впитываемость контактного состава в салфетку. Остатки контактного состава, не удаленные салфеткой, высыхают, причем обезжиривания поверхности детали не требуется.

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний пяти составов, содержащих крайние и средние количества компонентов, а также количества, выходящие за рамки предложенного интервала, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты определения эксплуатационных характеристик исследуемых составов контактных жидкостей

Свойства	Значения свойств для состава				
	1	2	3	4	5
Содержание компонентов, % (по массе):					
– пропиленгликоля	85,0	99,5	92,0	80,0	99,9
– этилового (бутилового) спирта	15,0	0,5	8,0	20,0	0,1
Вязкость при 20°C, (мН·с)/м ²	15,3	40,1	27,6	4,7	45,6
Поверхностное натяжение при 20°C, Н/м	27,2	32,9	29,1	22,7	47,3

Составы 4 и 5 не могут быть использованы в качестве контактных жидкостей в связи с тем, что состав 4 имеет малую вязкость и легко растекается по поверхности контролируемого объекта, а состав 5 недостаточно смачивает поверхность объекта контроля, что создает большие неудобства при контроле.

Существенным достоинством пропиленгликоля, применяемого в качестве контактной жидкости, является то, что пропиленгликоль не сорбируется в пористом материале, не уменьшает прочностных и других эксплуатационных характеристик конструкций из ПКМ, не ухудшает адгезионные свойства поверхности конструкции, что позволяет проводить, например, окраску изделия после удаления остатков пропиленгликоля без специального обезжиривания проконтролированной поверхности конструкции. Имеется акт испытания образцов из углепластика, выдержанных в пропиленгликоле. Рекомендовано после проведения контроля углепластиковых деталей и конструкций с использованием пропиленгликоля в качестве контактной жидкости проводить сушку объектов контроля при температуре 80°C в течение 1,5 ч.

Основным достоинством другой жидкости, предложенной в ВИАМ [41, 42], является то, что после неполного ее высыхания на поверхности проконтролированного изделия образуется тонкая эластичная пленка, которая легко удаляется отслаиванием.

Контактная жидкость МБГ-1 представляет собой водный раствор поливинилового спирта с небольшими добавками ингибитора коррозии.

Оптимальная для данной задачи вязкость контактной жидкости может быть получена путем варьирования содержания поливинилового спирта в воде – от 5 до 10% (с увеличением содержания поливинилового спирта вязкость раствора увеличивается).

Для контроля изделий из материалов с невысокой коррозионной стойкостью в раствор вводится ингибитор, предотвращающий коррозию испытываемых изделий. Тип ингибитора и его концентрация выбираются в зависимости от материала контролируемого изделия. Например, при контроле изделий с верхним слоем из алюминиевых сплавов в качестве ингибитора коррозии может быть использован ингибитор Г2 – метанитробензоатгексаметиленамин (МРТУ 602-367 Уральского химического завода, г. Пермь), а при контроле изделий с верхним слоем из стали – нитрит натрия технический (ГОСТ 19906). Очевидно, что при контроле изделий из неметаллических материалов, стеклопластиков, высокомолекулярных полимерных композиционных материалов, текстолитов и т. п. вводить ингибитор в состав контактной жидкости не следует.

В отличие от масло- и жиросодержащих веществ (машинное или трансформаторное масло, мазут, глицерин и др.), применяемых в настоящее время при ультразвуковой дефектоскопии, контактная жидкость МБГ-1 не замасливает поверхность контролируемого изделия, что особенно важно при контроле изделий, подлежащих последующей окраске, склеиванию, анодированию или другим подобным технологическим операциям.

Оценка результатов испытаний контактной жидкости проведена по разбросу показаний прибора при многократных отрыве и прижатии преобразователя к поверхности контролируемого изделия через испытываемую жидкость. В связи с тем, что контактная жидкость МБГ-1 высыхает сравнительно медленно (0,5–1 ч в зависимости от толщины слоя), то изменений параметров контроля (резонансной частоты, амплитуды сигнала и т. п.), связанных с изменением смачивающей способности, вязкости или каких-либо других параметров контактной жидкости, не наблюдалось.

Контактная жидкость МБГ-1 безопасна для операторов, проводящих контроль, не является горючим веществом. Компоненты контактной жидкости дешевы и не являются дефицитными материалами.

Для улучшения технологических свойств контактной жидкости на основе водного раствора поливинилового спирта путем ослабления сцепления пленки, образующейся после высыхания контактной жидкости, с поверхностью контролируемой конструкции, а также для повышения надежности акустического контакта путем увеличения смачивающей способности контактной жидкости, предложено дополнительно в состав на основе водного раствора поливинилового спирта с ингибитором коррозии ввести гидрофобизирующую кремнийорганическую жидкость ГКЖ-136-41 (этилгидридполисилоксановую жидкость) и поверхностно-активное вещество (ПАВ), например, АГМ-9 или алкамон ОС-2, при следующем соотношении компонентов, % (по массе):

- 5–10 поливинилового спирта;
- 0,5–1,0 ингибитора коррозии;
- 0,1–3,0 этилгидридполисилоксановой жидкости;
- 0,1–1,0 ПАВ (АГМ-9 или алкамона ОС-2);
- остальное – вода.

Гидрофобизирующая кремнийорганическая жидкость ГКЖ-136-41 (этилгидридполисилоксановая жидкость, ГОСТ 10834–76) введена в состав для ослабления сцепления пленки, образующейся после высыхания контактной жидкости, с поверхностью изделия. Ее концентрация выбирается экспериментально в зависимости от адгезионных свойств поверхности контролируемой конструкции.

В качестве ПАВ может быть использовано любое ПАВ, допустимое по экологическим соображениям. Например, можно использовать жидкость АГМ-9 (γ -аминопропилтриэтоксисилан, ТУ 6-02-724), которая, кроме того, способствует отверждению поливинилового спирта при высыхании контактной жидкости, или катионоактивное ПАВ – алкамон ОС-2 (ГОСТ 10106).

Для проведения испытаний подготовлено пять составов, содержащих крайние и средние количества компонентов, а также количества, выходящие за рамки предложенных интервалов (табл. 2).

Таблица 2

Составы с различным содержанием компонентов для определения эксплуатационных характеристик контактных жидкостей

Компонент	Содержание компонентов, % (по массе), в составе				
	1	2	3	4	5
Поливиниловый спирт	5,0	10,0	8,0	4,0	11,0
Ингибитор коррозии	0,8	1,0	0,5	1,1	0,4
Этилгидридполисилоксановая жидкость ГКЖ-136-41	1,5	0,1	3,0	0,05	3,1
ПАВ	0,5	0,1	1,0	0,05	1,1
Вода дистиллированная	92,2	88,8	87,5	94,8	84,4

Результаты испытаний указанных в табл. 2 составов подтверждаются актом испытаний. Составы 1–3 обладают достаточной вязкостью и высокой смачивающей способностью, что обеспечивает стабильный акустический контакт преобразователя прибора с контролируемой конструкцией, не вызывают коррозии металлических элементов конструкций и позволяют легко удалять образующуюся после высыхания состава пленку отслаиванием, путем захвата пальцами за край пленки. В отдельных случаях пленка отслаивается после высыхания и оператору достаточно смести ее с поверхности конструкции щеткой-сметкой.

После высыхания состава 4 на поверхности детали образуется пленка, удалить которую путем отдира не представляется возможным ввиду ее высокой адгезии к поверхности детали. После высыхания состава 5 и образования пленки последняя была удалена, причем на поверхности остались следы этилгидридполисилоксановой жидкости, которые потребовалось удалять с помощью салфетки.

После использования контактной жидкости на основе водного раствора поливинилового спирта и ГКЖ-136-41 при последующих операциях окрашивания, склеивания и т. п. требуется обезжиривание поверхности контроля для улучшения ее адгезионных свойств.

Такой же эффект как при проведении контроля с использованием состава на основе поливинилового спирта достигается при применении веществ для создания лакокрасочных покрытий на основе водных латексов, используемых для консервации техники при хранении. В Санкт-Петербургском НПО «Пигмент» серийно выпускается состав ИС-ВА, который изготавливается на основе водной дисперсии модифицированного поливинилацетата, не содержит органических растворителей и, в случае необходимости, может разбавляться водой (например, водопроводной). После использования для неразрушающего контроля в качестве контактной жидкости состав высыхает, образуя на поверхности эластичную легко удаляемую пленку. В НПО «Пигмент» опытными партиями выпускаются и другие составы на основе водных латексов для консервации техники, которые могут быть использованы в качестве контактных жидкостей: АК-535П, ИС-КЧ-51, «Карболатс», «Нитролатс» и др.

Для создания акустического контакта при ультразвуковой дефектоскопии в основном металлических деталей без лакокрасочных покрытий предложено применять чистый моноэтиловый эфир этиленгликоля (этилцеллозольв), который легко испаряется и не требует удаления после окончания контроля.

Этилцеллозольв представляет собой бесцветную жидкость, обладает достаточной вязкостью и хорошо смачивает поверхность контролируемой конструкции. Основными достоинствами этой жидкости, наряду с высоким качеством акустического контакта, являются ее высокие технологические свойства, обусловленные высокой упругостью пара, характеризующей скорость испарения жидкости. Следует также отметить, что этилцеллозольв обладает моющим эффектом и не вызывает коррозионных поражений. К недостаткам жидкости следует отнести то, что работы с ней следует проводить в помещении, оснащенном вытяжной вентиляцией.

Заключение

Предложены составы и разработаны рекомендации по применению контактных жидкостей, предназначенных для создания акустического контакта между преобразователем ультразвукового прибора и конструкцией, при оценке физико-механических характеристик ПКМ, а также при контроле резонансным, реверберационным и другими методами ультразвукового контроля в контактном варианте. Показана эффективность применения предложенных авторами составов при контроле конструкций из ПКМ (стекло-, углепластиков и других пористых материалов). Применение этих составов позволяет повысить надежность акустического контакта и сократить время, расходуемое на вспомогательные операции по удалению жидкости после контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники //Авиационные материалы и технологии. 2001. №1. С. 3–8.
2. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад //Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
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. 2013. №4. Ст. 04 (viam-works.ru).
5. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
6. 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.

7. Smith R.A., Nelson L.J. et al. Automation of control and estimation of parameters of defects in parts of the PCM //Insight. 2009. V. 51. №2. P. 82–87.
8. Мурашов В.В., Мишуров К.С. Оценка прочностных характеристик углепластиков акустическим методом //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 81–85.
9. Мурашов В.В. Определение физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов акустическими методами //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 465–475.
10. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефектоскопия и диагностика полимерных композиционных материалов акустическими методами /В кн. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 342–347.
11. Мурашов В.В. К вопросу определения упругих и прочностных свойств полимерных композиционных материалов акустическим комплексным методом //Деформация и разрушение материалов. 2014. №11. С. 39–45.
12. Bobrov V.T., Rozlovenko S.G., Murashov V.V. Materials characterization //Testing. Diagnostics. 2010. №2. P. 42–44.
13. 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.
14. Мурашов В.В. Контроль многослойных клееных конструкций акустико-тепловым методом //Клеи. Герметики. Технологии. 2014. №9. С. 36–40.
15. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль клеевых соединений //Клеи. Герметики. Технологии. 2008. №7. С. 21–28.
16. Мурашов В.В. Определение состава и плотности конструкционных углепластиков лазерно-акустическим способом ультразвукового контроля //Материаловедение. 2014. №11. С. 24–29.
17. Nagem R.J., Seng J.M., Williams J.H. Residual life predictions of composite aircraft structures via nondestructive testing. Part 1: Prediction methodology and via nondestructive //Materials Evaluation. 2000. V. 58. №9. P. 1065–1074.
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. Мурашов В.В., Алексахин В.М. Контроль прочности зоны соединения элементов интегральных конструкций из полимерных композитов ультразвуковым методом //Клеи. Герметики. Технологии. 2014. №7. С. 15–19.
20. Мурашов В.В. Выявление зон отсутствия адгезионного соединения слоев в многослойных конструкциях //Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №3. С. 29–31.
21. Мурашов В.В. Акустические методы и средства контроля изделий из полимерных материалов //Дефектоскопия. 1990. №9. С. 46–52.
22. Мурашов В.В., Генералов А.С. Контроль многослойных клееных конструкций низкочастотными акустическими методами //Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 59–67.
23. Бакунов А.С., Мурашов В.В., Сысоев А.М. Контроль лопастей воздушного винта средствами низкочастотной акустики //Контроль. Диагностика. 2012. №6. С. 72–74.
24. Семеренко А.В. Ультразвуковой контроль изделий из композиционных материалов, применяющихся в авиационной отрасли промышленности //Территория NDT. 2014. №4. С. 57–61.
25. 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. 31–36, 41–42.
26. Rose J. Achievements and prospects of development of the ultrasonic waveguide method of control //Materials Evaluation. 2010. V. 68. №5. P. 494–500.
27. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль заготовок и деталей из углерод-углеродного композиционного материала для многоразового космического корабля «Буран» //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 05 (viam-works.ru).
28. Мурашов В.В. Контроль многослойных клееных конструкций из полимерных композиционных материалов //Клеи. Герметики. Технологии. 2011. №10. С. 16–23.
29. Мурашов В.В., Мишуров К.С. Определение пористости углепластиков в авиационных конструкциях ультразвуковым методом //Авиационные материалы и технологии. 2015. №2. С. 88–92.
30. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. /Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. Ультразвуковой контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение. 2006. 864 с.

31. Zeighami M., Hohorvar F. Control of glue joints by immersion method of reflection //Materials Evaluation. 2009. №8. P. 945–954.
32. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Определение прочности соединения деталей интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов ультразвуковым методом //Контроль. Диагностика. 2006. №4. С. 45–51.
33. 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.
34. Karabutov A.A., Murashov V.V., Oraevsky A.A., Podymova N.B. Nondestructive characterization of layered composite materials with a laser optoacoustic sensor /In: Nondestructive Evaluation of Materials and Composites II. San Antonio: Published by SPIE – The International Society for Optical Engineering. 1998. V. 3396. P. 103–111.
35. Способ определения физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов и устройство для его осуществления: пат. 2214590 Рос. Федерация; опубл. 20.10.2003. Бюл. №29.
36. Kablov E., Murashov V., Rummyantsev A. Diagnostics of Polymer Composites by Acoustic Methods //Ultrasound. Kaunas: Technologija. 2006. №2. P. 7–10.
37. Способ определения прочностных характеристик полимерных композиционных материалов: пат. 2461820 Рос. Федерация; опубл. 20.09.2012. Бюл. №26.
38. Способ определения степени полимеризации композиционных материалов: пат. 2274856 Рос. Федерация; опубл. 20.04.2006. Бюл. №11.
39. Способ определения прочности соединения деталей интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов: пат. 2262099 Рос. Федерация; опубл. 10.10.2005. Бюл. №28.
40. Способ определения физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов в конструкциях ультразвуковым методом: пат. 2196982. Рос. Федерация; опубл. 20.01.2003. Бюл. №2.
41. Контактная жидкость для ультразвукового контроля: а.с. 534684 СССР; опубл. 05.11.1976. Бюл. №41.
42. Мурашов В.В., Батизат В.П., Гуляева В.В. Контактная жидкость для ультразвукового контроля //Дефектоскопия. 1978. №5. С. 99–100.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Kontrol' kachestva materialov – garantija bezopasnosti jekspluatacii aviacionnoj tehniki [Quality control of materials – security accreditation of operation of aviation engineering] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2001. №1. S. 3–8.
2. Kablov E.N. Shestoj tehnologicheskij ukklad [Sixth technological way] //Nauka i zhizn'. 2010. №4. S. 2–7.
3. Lukina N.F., Dement'eva L.A., Petrova A.P., Serezhenkov A.A. Konstrukcionnye i termostojkie klei [Constructional and heat-resistant glues] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 328–335.
4. Petrova A.P., Lukina N.F. Klei dlja mnogorazovoj kosmicheskoy sistemy [Glues for reusable space system] //Trudy VIAM. 2013. №4. St. 04 (viam-works.ru).
5. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials science] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik. 2008. №3. S. 2–14.
6. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on implementation «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2015. №1 (34). S. 3–33.
7. Smith R.A., Nelson L.J. et al. Automation of control and estimation of parameters of defects in parts of the PCM //Insight. 2009. V. 51. №2. P. 82–87.
8. Murashov V.V., Mishurov K.S. Ocenka prochnostnyh harakteristik ugleplastikov akusticheskim metodom [Assessment of strength characteristics ugleplastikov acoustic method] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2015. №1 (34). S. 81–85.
9. Murashov V.V. Opredelenie fiziko-mehaničeskikh harakteristik i sostava polimernyh kompozicionnyh materialov akustičeskimi metodami [Definition of physicomechanical characteristics and composition of polymeric composite materials acoustic methods] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 465–475.
10. Murashov V.V., Rumjancev A.F. Defektoskopija i diagnostika polimernyh kompozicionnyh materialov akustičeskimi metodami [Defektoskopija and diagnostics of polymeric composite materials by acoustic methods] /V kn. 75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007: Jubilejnyj nauch.-tehnič. sb. M.: VIAM. 2007. S. 342–347.
11. Murashov V.V. K voprosu opredelenija uprugih i prochnostnyh svojstv polimernyh kompozicionnyh materialov akustičeskim kompleksnym metodom [To question of deter-

- mination of elastic and strength properties of polymeric composite materials acoustic complex method] //Deformacija i razrushenie materialov. 2014. №11. S. 39–45.
12. Bobrov V.T., Rozlovenko S.G., Murashov V.V. Materials characterization //Testing. Diagnostics. 2010. №2. P. 42–44.
 13. Murashov V.V., Kosarina E.I., Generalov A.S. Kontrol' kachestva aviacionnyh detalej iz polimernyh kompozicionnyh materialov i mnogoslojnyh kleenych konstrukcij [Quality control of aviation details from polymeric composite materials and multi-layer kleeny designs] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №3. S. 65–70.
 14. Murashov V.V. Kontrol' mnogoslojnyh kleenych konstrukcij akustiko-teplovym metodom [Control of multi-layer kleeny designs by akustiko-thermal method] //Klei. Germetiki. Tehnologii. 2014. №9. S. 36–40.
 15. Murashov V.V. Nerazrushajushhij kontrol' kleevykh soedinenij [Non-destructive testing of glued joints] //Klei. Germetiki. Tehnologii. 2008. №7. S. 21–28.
 16. Murashov V.V. Opredelenie sostava i plotnosti konstrukcionnyh ugleplastikov lazerno-akusticheskim sposobom ul'trazvukovogo kontrolja [Definition of structure and density constructional ugleplastikov in the laser and acoustic way of ultrasonic control] //Materialovedenie. 2014. №11. S. 24–29.
 17. Nagem R.J., Seng J.M., Williams J.H. Residual life predictions of composite aircraft structures via nondestructive testing. Part 1: Prediction methodology and via nondestructive //Materials Evaluation. 2000. V. 58. №9. P. 1065–1074.
 18. Murashov V.V., Rumjancev A.F. Diagnostika sostava i svojstv polimernyh kompozitov v detaljah i konstrukcijah [Diagnostics of structure and properties of polymeric composites in details and designs] //Kontrol'. Diagnostika. 2008. №8. S. 13–17.
 19. Murashov V.V., Aleksashin V.M. Kontrol' prochnosti zony soedinenija jelementov integral'nyh konstrukcij iz polimernyh kompozitov ul'trazvukovym metodom [Control of durability of zone of connection of elements of integral designs from polymeric composites ultrasonic method] //Klei. Germetiki. Tehnologii. 2014. №7. S. 15–19.
 20. Murashov V.V. Vyjavlenie zon otsutstvija adgezionnogo soedinenija sloev v mnogoslojnyh konstrukcijah [Identification of zones of lack of adhesive connection of layers in multi-layer designs] //Klei. Germetiki. Tehnologii. 2013. №3. S. 29–31.
 21. Murashov V.V. Akusticheskie metody i sredstva kontrolja izdelij iz polimernyh materialov [Acoustic methods and control facilities of products from polymeric materials] //Defektoskopija. 1990. №9. S. 46–52.

22. Murashov V.V., Generalov A.S. Kontrol' mnogoslojnyh kleenyh konstrukcij nizkочastotnymi akusticheskimi metodami [Control of multi-layer kleeny designs by low-frequency acoustic methods] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №2. S. 59–67.
23. Bakunov A.S., Murashov V.V., Sysoev A.M. Kontrol' lopastej vozdušnogo vinta sredstvami nizkочastotnoj akustiki [Control of blades of air screw by means of low-frequency acoustics] //Kontrol'. Diagnostika. 2012. №6. S. 72–74.
24. Semerenko A.V. Ul'trazvukovoj kontrol' izdelij iz kompozicionnyh materialov, primenjajushhija v aviacionnoj otrasli promyshlennosti [Ultrasonic control of products from the composite materials which are applying in aviation industry] //Territorija NDT. 2014. №4. S. 57–61.
25. Murashov V.V., Rumjancev A.F. Defekty monolitnyh detalej i mnogoslojnyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov i metody ih vyjavlenija. Chast' 2. Metody vyjavlenija defektov monolitnyh detalej i mnogoslojnyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov [Defects of monolithic details and multi-layer designs from polymeric composite materials and methods of their identification. Part 2. Methods of detection of defects of monolithic details and multi-layer designs from polymeric composite materials] //Kontrol'. Diagnostika. 2007. №5. S. 31–36, 41–42.
26. Rose J. Achievements and prospects of development of the ultrasonic waveguide method of control //Materials Evaluation. 2010. V. 68. №5. P. 494–500.
27. Murashov V.V. Nerazrushajushhij kontrol' zagotovok i detalej iz uglerod-uglerodnogo kompozicionnogo materiala dlja mnogorazovogo kosmicheskogo korablja «Buran» [Non-destructive testing of preparations and details from carbon - carbon composite material for the reusable Snow-storm spacecraft] //Trudy VIAM. 2013. №4. St. 05 (viam-works.ru).
28. Murashov V.V. Kontrol' mnogoslojnyh kleenyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov [Control of multi-layer kleeny designs from polymeric composite materials] //Klei. Germetiki. Tehnologii. 2011. №10. S. 16–23.
29. Murashov V.V., Mishurov K.S. Opredelenie poristosti ugleplastikov v aviacionnyh konstrukcijah ul'trazvukovym metodom [Determination of porosity ugleplastikov in aviation designs ultrasonic method] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2015. №2. S. 88–92.
30. Nerazrushajushhij kontrol': Spravochnik: V 8 t. [Non-destructive testing] /Pod obshh. red. V.V. Kljueva. T. 3. I.N. Ermo-lov, Ju.V. Lange. Ul'trazvukovoj kontrol'. 2-e izd., ispr. M.: Mashinostroenie. 2006. 864 s.
31. Zeighami M., Hohorvar F. Control of glue joints by immersion method of reflection //Materials Evaluation. 2009. №8. P. 945–954.

32. Murashov V.V., Rumjancev A.F. Opredelenie prochnosti soedinenija detalej integral'nyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov ul'trazvukovym metodom [Determination of durability of connection of details of integral designs from polymeric composite materials ultrasonic method] //Kontrol'. Diagnostika. 2006. №4. S. 45–51.
33. Murashov V.V., Rumjancev A.F., Ivanova G.A., Fajzrahmanov N.G. Diagnostika struktury, sostava i svojstv polimernyh kompozicionnyh materialov [Diagnostics of structure, structure and properties of polymeric composite materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2008. №1. S. 17–24.
34. Karabutov A.A., Murashov V.V., Oraevsky A.A., Podymova N.B. Nondestructive characterization of layered composite materials with a laser optoacoustic sensor /In: Nondestructive Evaluation of Materials and Composites II. San Antonio: Published by SPIE – The International Society for Optical Engineering. 1998. V. 3396. P. 103–111.
35. Sposob opredelenija fiziko-mehanicheskikh harakteristik polimernyh kompozicionnyh materialov i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija [Way of definition of physicomechanical characteristics of polymeric composite materials and the device for its implementation]: pat. 2214590 Ros. Federacija; opubl. 20.10.2003. Bjul. №29.
36. Kablov E., Murashov V., Rummyantsev A. Diagnostics of Polymer Composites by Acoustic Methods //Ultrasound. Kaunas: Technologija. 2006. №2. P. 7–10.
37. Sposob opredelenija prochnostnyh harakteristik polimernyh kompozicionnyh materialov [Way of definition of strength characteristics of polymeric composite materials]: pat. 2461820 Ros. Federacija; opubl. 20.09.2012. Bjul. №26.
38. Sposob opredelenija stepeni polimerizacii kompozicionnyh materialov [Way of definition of polymerization degree of composite materials]: pat. 2274856 Ros. Federacija; opubl. 20.04.2006. Bjul. №11.
39. Sposob opredelenija prochnosti soedinenija detalej integral'nyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov [Way of determination of durability of connection of details of integral designs from polymeric composite materials]: pat. 2262099 Ros. Federacija; opubl. 10.10.2005. Bjul. №28.
40. Sposob opredelenija fiziko-mehanicheskikh harakteristik i sostava polimernyh kompozicionnyh materialov v konstrukcijah ul'trazvukovym metodom [Way of definition of physicomechanical characteristics and composition of polymeric composite materials in designs ultrasonic method]: pat. 2196982. Ros. Federacija; opubl. 20.01.2003. Bjul. №2.
41. Kontaktnaja zhidkost' dlja ul'trazvukovogo kontrolja [Contact liquid for ultrasonic control]: a.s. 534684 SSSR; opubl. 05.11.1976. Bjul. №41.

42. Murashov V.V., Batizat V.P., Guljaeva V.V. Kontaktnaja zhidkost' dlja ul'trazvukovogo kontrolja [Contact liquid for ultrasonic control] //Defektoskopija. 1978. №5. S. 99–100.