

УДК 620.179.1:678.061

В.В. Мурашов¹, М.В. Слюсарев¹

ДЕФЕКТОСКОПИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-12-12

Приведены результаты исследования эксплуатационных возможностей ультразвукового резонансного метода при контроле многослойных конструкций. Показано, что резонансный метод может быть использован для выявления дефектов клеевых соединений и расслоений в конструкциях из металлических и неметаллических материалов. Даны рекомендации по применению контактной среды на водной основе для создания акустического контакта между пьезоэлектрическим преобразователем дефектоскопа и контролируемым изделием.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, ультразвуковой резонансный метод, многослойные конструкции, дефекты клеевых соединений, расслоения материала, контактная среда.

Research results of operation capabilities of ultrasonic resonance method during multilayer constructions control are given. It is shown that the resonance method can be used for detection of glued joints defects and stratifications in constructions from metal and non-metallic materials. Recommendations about application of contact environment on water basis for acoustic contact between piezoelectric inverter of the defectoscope and controlled product are made.

Keywords: non-destructive testing, ultrasonic resonance method, multilayer constructions, defects of glued joints, material stratifications, coupling medium.

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

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

Эффективным средством повышения надежности летательных аппаратов являются неразрушающие методы выявления нарушений сплошности материалов и непроклеев в клеевых конструкциях [1–10], а также методы технической диагностики, позволяющие оценивать физико-механические свойства материалов непосредственно в контролируемых деталях и конструкциях без их разрушения [11–18].

Для выявления дефектов склейки типа непроклеев и расслоений в сотовых конструкциях из металлических и неметаллических материалов в настоящее время применяют в основном акустический импедансный метод [19–25], реализуемый с помощью современных дефектоскопов АД-42ИП, ИД-91М, ДАМИ-С и ранее выпускавшегося прибора АД-40И с использованием совмещенных преобразователей. Кроме импедансного метода в некоторых случаях для контроля сотовых агрегатов используются и другие низкочастотные акустические методы дефектоскопии: велосимметрический, свободных колебаний, эхо-метод, теневой [26–32].

Ультразвуковой резонансный метод может быть использован для выявления крупных локализованных в зоне склейки конструкции дефектов типа отсутствия сцеп-

ления обшивки с нижним слоем или с заполнителем. С его помощью может быть решена задача дефектоскопии многослойных клееных конструкций, представляющих собой соединенные тонкие листы (обшивка-дублер), склеенные с усилительной накладкой, а также листов одинаковой толщины и сотовых конструкций с металлическими обшивками толщиной до 5 мм, т. е. таких конструкций, которые трудно или невозможно контролировать другими неразрушающими методами контроля (например, методом свободных колебаний, акустическим импедансным методом и др.).

Целью данной работы является экспериментальное исследование эксплуатационных возможностей резонансного метода, который в некоторых случаях применяется для оценки прочности многослойных клееных конструкций [33], но может с успехом применяться и для дефектоскопии, т. е. для выявления дефектов клеевых соединений и расслоений, характеризующихся нарушением сплошности материала.

Материалы и методы

Физический принцип контроля ультразвуковым резонансным методом

Ультразвуковой резонансный метод, являющийся локальным методом вынужденных колебаний, основан на возбуждении в объекте контроля (ОК) упругих колебаний при плавном изменении их частоты. При совпадении частот вынужденных колебаний с собственными частотами ОК возникает резонанс в системе «преобразователь–ОК». Изменение толщины ОК вызывает смещение резонансных частот, а появление дефектов – исчезновение резонанса (при наклонном расположении к поверхности изделия дефекте) или изменение их частоты (при параллельном к поверхности дефекте) [34]. В таком варианте резонансным методом можно контролировать очень тонкие изделия, контроль которых невозможен эхо-методом.

Для контроля качества клеевых соединений в многослойных конструкциях резонансный метод может применяться в несколько измененном виде. В отличие от контактного резонансного толщиномера, где влияние пьезоэлемента на собственную частоту ОК стремятся ослабить путем уменьшения его волновой толщины, в данном случае основной колебательной системой служит именно пьезоэлемент, толщину которого необходимо выбирать близкой к полуволновой. Продольные колебания непрерывно меняющейся частоты в ОК возбуждаются недемпфированным пьезоэлементом преобразователя через тонкий слой контактной смазки. Частота вынужденных колебаний определяется толщиной пьезоэлемента и составляет от 30 до 500 кГц. Информативными параметрами контроля служат изменения резонансных частот Δf , а в некоторых случаях также и добротности системы «пьезоэлемент–изделие». Величина Δf определяется изменением входного механического импеданса ОК, вызванным присоединением к обшивке нижней части ОК и соединительной пленки клея. Величина Δf при постоянстве толщин всех соединяемых элементов определяется параметрами клеевого шва: толщиной l , модулем упругости E и плотностью ρ [34].

Режим, при котором используется изменение собственной частоты преобразователя, назван режимом А. При контроле соединений обшивки с сотовым заполнителем применяют режим В. В этом случае признаком дефекта является увеличение амплитуды резонансного пика, которое обусловлено уменьшением перехода части энергии в сотовый заполнитель и соответствующим ростом добротности системы «пьезоэлемент–ОК».

Результаты и обсуждение

Исследования эксплуатационных возможностей ультразвукового резонансного метода дефектоскопии, реализуемого с помощью прибора АД-21Р [34], проводили на образцах многослойных (двух- и трехслойных) конструкций с искусственными и естественными

дефектами. Образцы многослойных конструкций представляли собой склеенные листы из алюминиевых сплавов толщиной 1 и 2 мм и толщиной 4; 1 и 2 мм (рис. 1).

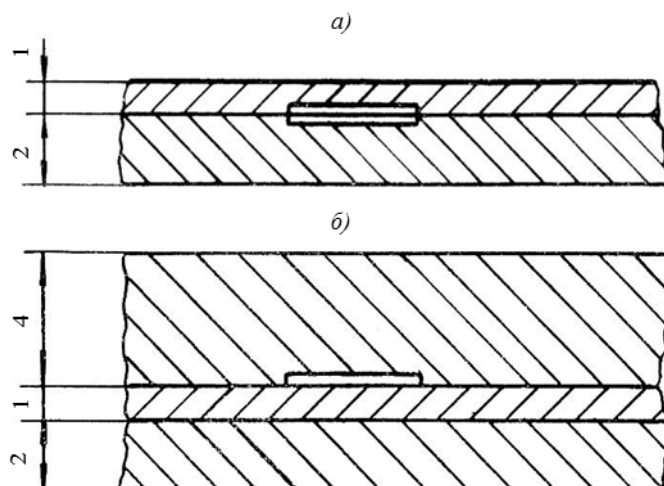


Рис. 1. Образцы двухслойной (а) и трехслойной (б) конструкции с искусственными дефектами

В производственных условиях предполагается пооперационный контроль клееклепаных конструкций после склеивания листов толщиной 1 и 2 мм до и после клепки. При этом до клепки доступ к ОК возможен с обеих сторон конструкции, а после клепки – только со стороны листа толщиной 2 мм. В соответствии с этим образцы имели искусственные дефекты диаметром от 1 до 30 мм, имитирующие непроклеи и расслоения клеевых соединений. Искусственные дефекты в образцах трехслойных конструкций выполняли в виде просверленных отверстий в листе толщиной 4 мм.

Результаты исследований показали, что чувствительность (наименьший диаметр выявляемого дефекта) резонансного метода дефектоскопии зависит от типа преобразователя и определяется диаметром его пьезоэлемента (рис. 2).

По оси абсцисс на графике $\Delta f(D)$ отложены значения диаметра D искусственного дефекта в образце, а по оси ординат – изменения значений резонансной частоты системы «преобразователь–изделие» в зоне дефектов по сравнению с резонансной частотой преобразователя с нагрузкой, аналогичной нагрузке на лист, толщина которого равна толщине верхнего листа конструкции (рис. 1, а).

При уменьшении диаметра дефекта величина Δf_p становится отличной от нуля в том случае, когда диаметр пьезоэлемента преобразователя практически соизмерим с диаметром дефекта. Дефект нельзя отличить от зоны пониженной прочности клеевого соединения, если диаметр дефекта меньше диаметра пьезоэлемента.

Точность выявления границ дефектов определяется с помощью графика изменения резонансной частоты системы «пьезоэлемент–изделие» по диаметру дефекта, при построении которого учитывается изменение положения центра пьезоэлемента относительно центра дефекта (рис. 3).

За критерий выявляемости дефектов следует принять наибольшую разность значений резонансной частоты системы «пьезоэлемент–изделие» при установке пьезоэлемента в бездефектной зоне и в зоне дефекта. По этому критерию выбирается сторона контроля многослойных конструкций и тип преобразователя. Так, наилучшая выявляемость дефектов наблюдается при контроле двухслойных конструкций со стороны листа толщиной 1 мм преобразователем с номинальной частотой 300 кГц, а трехслойных – со стороны листа толщиной 2 мм преобразователем с номинальной частотой 150 кГц.

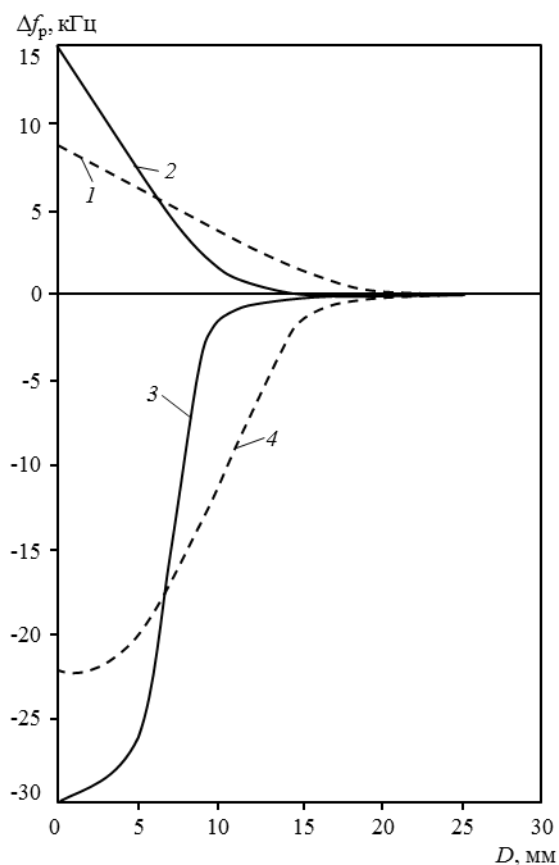


Рис. 2. Зависимость изменения резонансной частоты системы «преобразователь–изделие» от диаметра дефекта при контроле преобразователями с номинальными частотами 300 (—) и 150 кГц (- - -) двухслойной конструкции со стороны слоя толщиной 1 (1, 3) и 2 мм (2) и трехслойной конструкции со стороны слоя толщиной 2 мм (4)

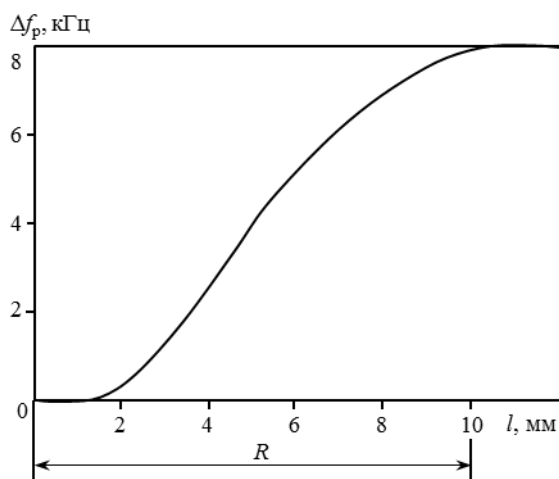


Рис. 3. Изменение резонансной частоты системы «преобразователь–изделие» по радиусу дефекта

При отсутствии доступа с этих сторон контроль двухслойных конструкций целесообразно осуществлять со стороны листа толщиной 2 мм преобразователем с номинальной частотой 300 кГц, а трехслойных конструкций – со стороны листа толщиной 4 мм преобразователем с номинальной частотой 150 кГц.

При испытаниях двухслойных конструкций частота системы «пьезоэлемент–изделие» увеличивается или уменьшается в зависимости от типа преобразователя или толщины листа, т. е. величина Δf_p будет принимать как положительные, так и отрицательные значения, что определяется упругими и инерционными свойствами клеевого соединения.

На рис. 4 изображены типичные тарировочные кривые для оценки прочности при сдвиге τ в зависимости от резонансной частоты f_p системы «пьезоэлемент–изделие» для различных преобразователей или при контроле конструкции с различных сторон. Так, при установке на двухслойную конструкцию в бездефектной зоне преобразователей с номинальными частотами 300 и 150 кГц со стороны листа толщиной 1 мм резонансная частота системы будет равна f_p' и f_p'' соответственно (за начало отсчета принята резонансная частота преобразователей в дефектной зоне f_p^0). Этим значениям резонансных частот при контроле двухслойной конструкции с различных сторон соответствует прочность при сдвиге τ_1 .

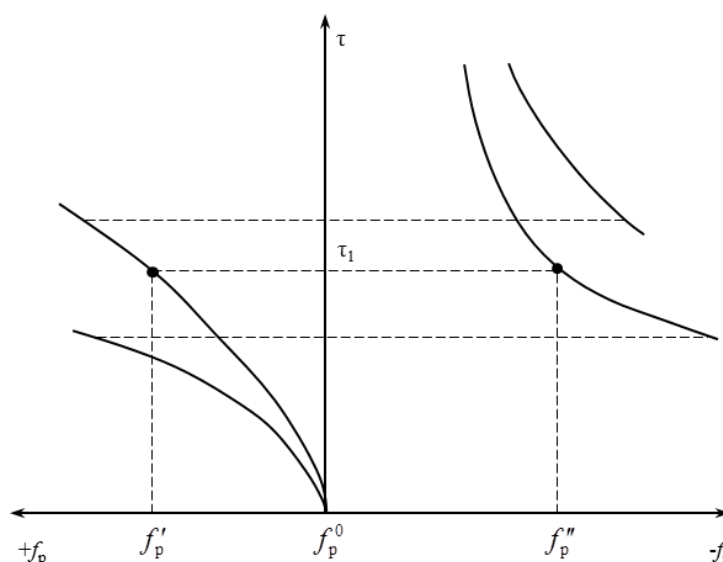


Рис. 4. Типичные тарировочные кривые для оценки прочности при сдвиге в зависимости от изменения резонансной частоты системы «преобразователь–многослойная конструкция»

Выявляемость дефектов будет определяться значениями $\Delta f_p' = f_p' - f_p^0$ и $\Delta f_p'' = f_p'' - f_p^0$. В первом случае в бездефектной зоне $f_p' > f_p^0$ (т. е. Δf_p уменьшается от положительного значения до нуля), а во втором случае $f_p'' < f_p^0$ (т. е. Δf_p увеличивается от отрицательного значения до нуля).

*Контактная среда для создания акустического контакта
между пьезоэлектрическим преобразователем дефектоскопа
и контролируемым изделием*

Особенностью ультразвукового резонансного метода дефектоскопии является необходимость применения контактной среды для создания акустического контакта между преобразователем резонансного дефектоскопа и контролируемой конструкцией. Для этой цели используются различные контактные смазки, в состав которых входят масла и другие жиросодержащие вещества, глицерин, вода, смесь карбоксиметилцеллюлозы с водой и др.

К недостаткам контактных смазок можно отнести замасливание поверхности конструкции, невозможность контроля вертикально ориентированных стенок, коррозионные повреждения металлических элементов конструкций; трудоемкость операций по удалению составов после окончания контроля и др.

В ВИАМ предложен контактный состав на основе водного раствора поливинилового спирта, образующий на поверхности конструкции после неполного высыхания эластичную пленку, как правило, удаляемую отслаиванием путем захвата пальцами руки за край пленки [35].

Данный контактный состав не замасливает поверхности контролируемого изделия, что не требует обезжиривания изделия после контроля; обладает достаточной вязкостью и высокой смачивающей способностью, что обеспечивает стабильный акустический контакт преобразователя дефектоскопа с изделием; не вызывает коррозию металлических изделий и легко удаляется после контроля, так как после неполного высыхания на поверхности изделия образуется тонкая эластичная пленка, которая ввиду ее малой адгезии к поверхности изделия легко удаляется отслаиванием.

Заключение

1. Ультразвуковой резонансный метод может с успехом применяться для выявления дефектов клеевых соединений типа непроклеев и расслоений в многослойных конструкциях из металлических и неметаллических материалов. Применение резонансного метода особенно целесообразно при контроле клеевых конструкций с толстым верхним слоем ($>1,5$ мм), т. е. в тех случаях, когда применение акустического импедансного метода не эффективно.

2. Для реализации резонансного метода дефектоскопии следует применять отечественный прибор АД-10Р, превосходящий по своим техническим характеристикам голландский прибор Bondtester-80 и ранее выпускавшийся отечественный прибор УП-20Р («Фенол-2»).

3. При контроле многослойных клеевых конструкций резонансным методом для создания акустического контакта преобразователя дефектоскопа с контролируемой конструкцией целесообразно использовать состав на основе водного раствора поливинилового спирта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. М.: ВИАМ, 2001. Вып. «Методы испытаний и контроля качества металлических и неметаллических материалов». С. 3–8.
3. 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. Каблов Е.Н., Минаков В.Т., Аниховская Л.И. Клеи и материалы на их основе для ремонта конструкций авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2002. №1. С. 61–65.
5. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
6. Неразрушающий контроль: справочник / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2006. Т. 3. Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. 864 с.

7. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций // Клеи. Герметики. Технологии. 2005. №1. С. 21–27.
8. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой // Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 17–20.
9. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль клеевых соединений // Клеи. Герметики. Технологии. 2008. №7. С. 21–28.
10. Murashov V.V. Nondestructive Testing of Glued Joints // Polymer Science. Series D. Glues and Sealing Materials. 2009. V. 2. №1. P. 58–63.
11. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2007. №4. С. 23–32.
12. Kablov E., Murashov V., Rumyantsev A. Diagnostics of Polymer Composites by Acoustic Methods // Ultrasound. Kaunas: Technologija. 2006. №2. P. 7–10.
13. Мурашов В.В. Определение физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов акустическими методами // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 465–475.
14. 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.
15. Карабутов А.А., Мурашов В.В., Подымова Н.Б. Диагностика слоистых композитов с помощью лазерного оптико-акустического преобразователя // Механика композитных материалов. Рига. 1999. Т. 35. №1. С. 125–134.
16. Karabutov A.A., Murashov V.V., Podymova N.B., Oraevsky A.A. Nondestructive characterization of layered composite materials with a laser optoacoustic sensor // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering Nondestructive Evaluation of Materials and Composites II. San Antonio, TX. 1998. P. 103–111.
17. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Диагностика состава и свойств полимерных композитов в деталях и конструкциях // Контроль. Диагностика. 2008. №8. С. 13–17.
18. Mishurov K.S., Murashov V.V. Determination of the Composition and Density of Polymer Composite Materials in Details and Constructions by Nondestructive Methods // Polymer Science. Series D. 2016. V. 9. №2. P. 176–180.
19. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций акустическим импедансным методом // Клеи. Герметики. Технологии. 2010. №3. С. 13–20.
20. Мурашов В.В. Контроль монолитных и клееных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическим импедансным методом // Авиационная промышленность. 2009. №3. С. 43–48.
21. Murashov V.V. Identification of Areas of Absence of Adhesive Bonding between Layers in Multilayer Structures // Polymer Science. Series D. Glues and Sealing Materials. 2014. V. 7. №1. P. 46–48.
22. Мурашов В.В. Неразрушающие методы контроля качества клеевых соединений // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №9. С. 20–26.
23. 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.
24. Murashov V.V. Control of Glued Structures by the Electromagnetic Acoustic Variant of the Impedance Method // Polymer Science. Series D. Glues and Sealing Materials. 2014. V. 7. №2. P. 136–139.
25. Murashov V.V. Control of Multilayer Constructions by Spectral Acoustic-Impedance Defectoscopy // Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials. 2014. V. 7. №2. P. 133–135.
26. Мурашов В.В., Генералов А.С. Контроль многослойных клееных конструкций низкочастотными акустическими методами // Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 59–67.

27. Бакунов А.С., Мурашов В.В., Сысоев А.М. Контроль лопастей воздушного винта средствами низкочастотной акустики // Контроль. Диагностика. 2012. №6. С. 72–74.
28. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций акустическим методом свободных колебаний // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. №4. С. 40–44.
29. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций из разнородных материалов ультразвуковым реверберационным методом // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. №12. С. 18–22.
30. Мурашов В.В., Трифонова С.И. Контроль качества полимерных композиционных материалов ультразвуковым временным способом велосиметрического метода // Авиационные материалы и технологии. 2015. №4. С. 86–90.
31. Мурашов В.В., Трифонова С.И. Контроль клеевых соединений в конструкциях и изделиях из ПКМ ультразвуковым теневым методом // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. №5. С. 15–23.
32. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций акустико-топографическим методом // Клеи. Герметики. Технологии. 2016. №3. С. 21–27.
33. Murashov V.V. Glued Joint Strength Diagnostics // Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials. 2009. V. 2. №1. P. 64–70.
34. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.
35. Мурашов В.В., Лаптев А.С. Контактные жидкости для создания акустического контакта при ультразвуковом контроле многослойных конструкций из ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №8. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-10-10.