

УДК 620.179

В.В. Мурашов¹, С.И. Трифонова¹**КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ВРЕМЕННЫМ СПОСОБОМ ВЕЛОСИМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА**

doi: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-86-90

Рассматриваются особенности временного варианта ультразвукового велосиметрического метода при контроле конструкций и деталей из полимерных композиционных материалов и факторы, ограничивающие чувствительность контроля. Показано, что отличие рассматриваемого способа от временного теневоего метода заключается в том, что увеличение времени прохождения импульса упругих колебаний через контролируемый материал определяется не только увеличением пройденного им пути, но и уменьшением скорости его распространения, связанным с трансформацией типа волн.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, ультразвуковой велосиметрический метод, временной способ, нормальные волны, фазовая скорость, групповая скорость.

Features of PCM structures and components tests using ultrasonic time-of-flight velocimetric technique and some – factors limiting the control sensitivity are considered in this paper. It is shown that the difference between the considered technique and the through transmission method is an increase in time of the elastic waves pulse passing through the tested material, which is determined not only by an increase of the passed path, but also by a decrease of the propagation velocity caused by transformation of the wave type.

Keywords: polymer composite material, ultrasonic velocimetric technique, time-of-flight technique, normal waves, phase velocity, group velocity.

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

К основным задачам авиастроения относится обеспечение высокого качества деталей и конструкций из различных материалов, в том числе выполненных из полимерных композиционных материалов (ПКМ), так как безопасность полетов на летательных аппаратах зависит от нескольких факторов, одним из которых является надежность авиационной техники. Надежность изделий ответственного назначения в значительной степени зависит от качества их изготовления [1–11].

Среди акустических методов неразрушающего контроля многослойных клееных конструкций и изделий из ПКМ [12–18] особое место занимают специальные низкочастотные методы [19–21]. Отличительными особенностями этих методов контроля являются сухой контакт рабочего органа преобразователя дефектоскопа с контролируемой конструкцией в небольшой по площади зоне (0,01–0,5 мм²) в одной или двух точках, использование звукового и низкочастотного ультразвукового диапазонов (обычно до 150 кГц), а также возбуждение в контролируемых конструкциях в основном нормальных волн, например антисимметричных волн нулевого порядка или им подобных [22].

Область применения специальных низкочастотных методов, к которым относятся импедансный, велосиметрический методы и метод свободных колебаний, – обнаружение расслоений в деталях и конструкциях из ПКМ, выявление зон нарушения соединений в многослойных клееных конструкциях из ПКМ на основе углеродных, борных, стеклянных, органических волокон (угле-, боро-, стекло-, органопластиков и т. п.), в комбинированных клееных конструкциях, содержащих металлические и неметаллические слои, а также выявление нарушений сплошности в слоях из ПКМ и в полуфабрикатах перед склеиванием конструкции [23–26]. Этими методами также могут быть выявлены дефекты в неметаллических покрытиях (например, теплозащитных) и зоны нарушения клевого соединения между покрытиями и силовым металлическим или неметаллическим каркасом.

Основными преимуществами специальных низкочастотных методов контроля перед другими методами неразрушающего контроля многослойных клееных конструкций из ПКМ являются [22, 27–29]:

– отсутствие необходимости смачивания конструкций или погружения их в жидкость, что поз-

воляет проводить контроль деталей и агрегатов из гигроскопичных материалов;

– кривизна поверхности контролируемых конструкций обычно не является препятствием для проведения контроля, причем возможен контроль как выпуклых, так и вогнутых деталей;

– возможность контроля деталей, выполненных из анизотропных материалов с различной шероховатостью поверхности.

Следует также отметить простоту аппаратуры для реализации специальных низкочастотных методов, простоту методики контроля и возможность механизации контроля конструкций, обычно контролируемых этими методами [19, 30–32].

Методы и материалы

При ультразвуковом временном способе велосиметрического метода неразрушающего контроля с прохождением нормальных волн используется влияние расслоений на время прохождения импульсов упругих колебаний от излучающего вибратора к приемному, расположенному соосно с противоположной стороны стенки детали из ПКМ.

В доброкачественной зоне конструкции (рис. 1) энергия передается в виде продольной волны L , а в зоне расслоения – в виде антисимметричной волны нулевого порядка a_0 . Признаком нарушения сплошности материала служит увеличение времени прохождения сигнала в зоне данного расслоения по сравнению со временем прохождения в доброкачественной зоне, так как, во-первых, волна a_0 проходит, огибая дефект, большой путь и, во-вторых, скорость распространения волны a_0 меньше скорости распространения продольной волны.

Отсчет времени прохождения производится по переднему фронту импульса. Упругая волна, определяющая передний фронт принятого сигнала, проходит от излучателя к приемнику кратчайшим путем. Сигналы, связанные с отражением от краев и переходных сечений детали, не оказывают влияния на передний фронт принятого сигнала, так как при импульсном излучении к началу очередного цикла упругие волны, возбужденные в изделии предшествующими импульсами, успевают практически полностью затухнуть. Поэтому временной способ велосиметрического метода свободен от интерференционных помех.

Существенное отличие рассматриваемого способа от временного теневого метода, применяемого для контроля огнеупорных материалов, заключается в том, что увеличение времени прохождения импульса упругих колебаний через контролируемый материал определяется не только увеличением пройденного им пути, но и уменьшением скорости распространения, связанным с трансформацией типа волн. В разделенных расслоением слоях материала скорость волны a_0 зависит от толщины слоев, причем передний фронт импульса распространяется с групповой скоростью. Время задержки принятого сигнала относительно начала цикла определяется выражением:

$$t = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{c_{грi}}, \quad (1)$$

где l_i – длина пути, пройденного волной со скоростью $c_{грi}$; n – число участков пути с постоянными (на этих участках) скоростями распространения волн.

Скорость $c_{гр}$ можно найти как экспериментальным путем, по формуле

$$c_{гр} = \frac{l}{t}, \quad (2)$$

так и графически (зная дисперсионную кривую фазовой скорости c_ϕ , построенную по экспериментальным данным), используя соотношение [33]:

$$c_{гр} = c_\phi - \lambda \frac{dc_\phi}{d\lambda}. \quad (3)$$

Экспериментальный путь определения $c_{гр}$ в данных условиях сложнее графического.

Для графического построения зависимости $c_{гр} = \varphi(f/h)$ необходимо по графику $c_\phi = \varphi(f/h)$ построить вспомогательную кривую $c_\phi = \varphi(\gamma)$, где $\gamma = \lambda/h$ – объединенный параметр (рис. 2). Путем графического дифференцирования этой кривой находим производную $\frac{dc_\phi}{d\gamma} = h \frac{dc_\phi}{d\lambda}$.

Формула (3) с учетом введенного обозначения примет вид:

$$c_{гр} = c_\phi - \gamma \frac{dc_\phi}{d\gamma}. \quad (4)$$

Зная c_ϕ , γ и $\frac{dc_\phi}{d\gamma}$ по формуле (4) находим групповую скорость.

На рис. 3 представлены зависимости фазовой и групповой скоростей распространения волны a_0 от объединенного параметра f/h в стеклопластике (в направлении основы), а на рис. 4 – вспомогательный график, на котором построена дисперсионная кривая фазовой скорости волны a_0 в том же материале. Кривая групповой скорости $c_{гр}$ имеет характерный максимум, в зоне которого связь между $c_{гр}$ и f/h неоднозначна, поэтому контроль импульсным вариантом метода должен производиться на восходящем участке кривой, т. е. при малых значениях f/h . Как и в изотропных материалах [34], для волны нулевого порядка (a_0) $c_{гр} > c_\phi$, причем $c_{гр}$ и c_ϕ меньше, чем скорость продольной волны c_l .

При распространении импульсов в дисперсионных средах ($c_\phi \neq c_{гр}$) полярность первой полуволны может меняться [35]. Для устранения связанной с этим погрешности определения времени запаздывания принятого сигнала в приемном тракте прибора достаточно использовать двухтактное детектирование.

Экспериментальные исследования возможностей и особенностей временного способа велосиметрического метода проводили на образцах с искусственными и естественными нарушениями сплошности в виде непроклеев. В работе использовали приспособление для соосного перемещения вибраторов, имеющих контакт с объектом

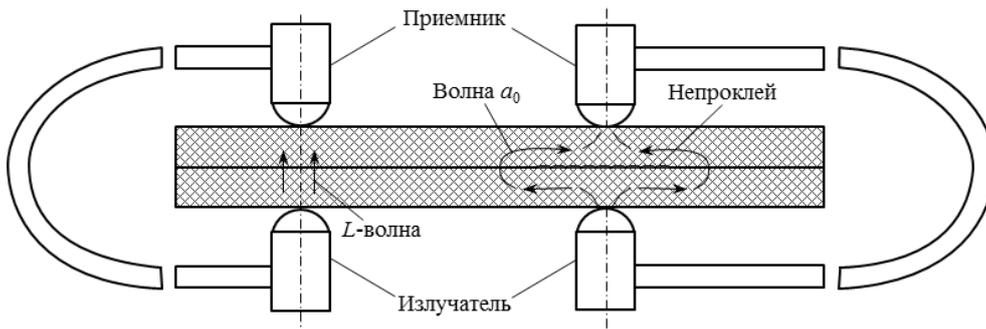


Рис. 1. Принцип временного метода с использованием нормальных волн: L – продольная волна; a_0 – антисимметричная волна нулевого порядка

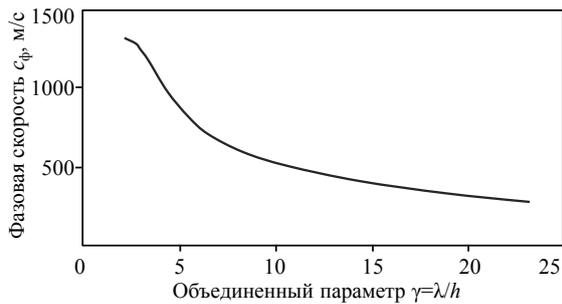


Рис. 2. Зависимость фазовой скорости c_{ϕ} распространения волны нулевого порядка a_0 от параметра λ/h в плите из текстолита в направлении преимущественной ориентации наполнителя

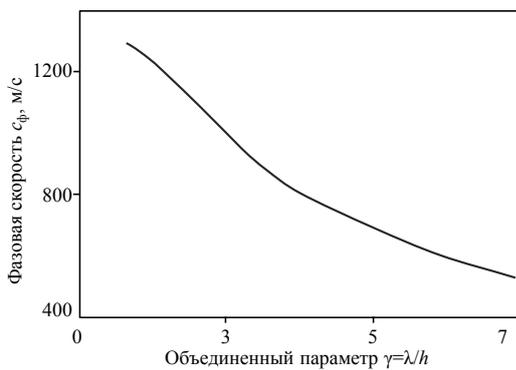


Рис. 4. Дисперсионная кривая фазовой скорости волны нулевого порядка a_0 в образце из стеклопластика в ортогональном направлении

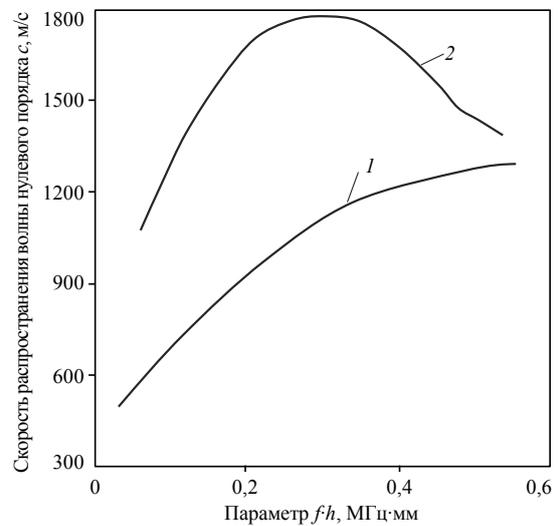


Рис. 3. Зависимости фазовой 1 и групповой 2 скоростей распространения волны нулевого порядка a_0 от параметра $f \cdot h$ в стеклопластике, определенные в направлении основы

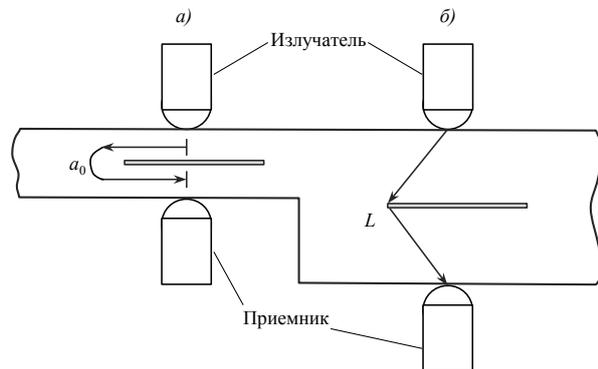


Рис. 5. Схема прохождения сигнала при контроле материалов временным велосимметрическим методом (а) и временным теневым методом (б): L – продольная волна; a_0 – антисимметричная волна нулевого порядка

контроля в небольшой по площади зоне без применения контактной смазки. Рабочая частота вибраторов составляла 25, 40 и 60 кГц.

Для исследования характеристик временного способа в двухстороннем и одностороннем вариантах разработана и собрана установка, позволяющая измерять время запаздывания принятого сигнала относительно начала излучаемого в контролируемое изделие импульса. На осциллограммах, иллюстрирующих изменение времени прохождения импульса ультразвуковых колебаний при изменении положения вибраторов относительно краев несплошностей в различных материалах, хорошо заметно изменение фазы переднего фронта импульса, обусловленное различием скоростей $c_{\text{ф}}$ и $c_{\text{тр}}$. Если преобразователи смещаются к границе непрочлея, время прохождения импульса уменьшается, стремясь к времени задержки в доброкачественной зоне образца.

Измерения времени прохождения ультразвуковых импульсов выполнены и на ряде других материалов с искусственными расслоениями или непрочлеями. Несплошности в материалах исследованных конструкций увеличивают время распространения с 44 до 791%, что вполне достаточно для их четкого обнаружения.

Глубина залегания одинаковых по размерам и форме несплошностей конструкций мало сказывается на времени прохождения ультразвукового импульса. С ее увеличением скорость распространения волн в зоне над непрочлеем возрастает, а под непрочлеем уменьшается. Суммарное время прохождения ультразвукового импульса при этом почти не меняется.

В некоторых случаях (например, при контроле плит из стеклопластика большой толщины) время, рассчитанное по графику групповых скоростей (кривая 2 на рис. 3), больше времени, определенного экспериментальным путем. Это объясняется тем, что при расположении расслоения в середине толщины материала при контроле тонких листов реализуется рассматриваемый временной способ (рис. 5), а при контроле участков большой толщины – временной теневой метод.

Для контроля временным способом несущие частоты импульсов целесообразно выбирать в пределах 20–70 кГц. Частоты <20 кГц нежелательны, так как в этом диапазоне лежит спектр фрикционных шумов, возникающих при движении приемного вибратора вследствие шероховатости поверхностей контролируемых конструкций

[36]. Кроме того, с уменьшением несущей частоты передний фронт импульса становится более пологим, что снижает точность измерения времени запаздывания принятого сигнала. При частотах >70 кГц ухудшается передача энергии через сухой точечный контакт [37] и в некоторых материалах эти частоты сильно затухают.

Результаты и заключение

Рассмотрены особенности временного варианта ультразвукового велосимметрического метода при контроле конструкций и деталей из ПКМ и факторы, ограничивающие чувствительность контроля. Показано, что отличие рассматриваемого способа от временного теневого метода заключается в том, что увеличение времени прохождения импульса упругих колебаний через контролируемый материал определяется не только увеличением пройденного им пути, но и уменьшением скорости его распространения, связанным с трансформацией типа волн.

Изучен вопрос о возможности применения временного способа для контроля конструкций при одностороннем доступе, когда излучающий и приемный преобразователи расположены в общем корпусе, причем оси вибраторов перпендикулярны к поверхности контролируемого изделия, а расстояние между осями постоянное. В этом случае во всех зонах контролируемой конструкции энергия от излучателя к приемнику передается волной a_0 , а изменение времени распространения в зоне непрочлея может быть определено по дисперсионной кривой для групповой скорости (см. рис. 3).

Очевидно, что характер дисперсионной кривой для групповой скорости менее благоприятен для контроля, чем соответствующей кривой для фазовой скорости. Достоверное выявление несплошностей материала возможно только при работе на восходящем участке дисперсионной кривой, а для групповой скорости этот участок существенно уже, чем для фазовой скорости. Это заставляет снижать несущую частоту применяемых импульсов, что нежелательно по приведенным выше причинам. Эксперименты подтверждают эти соображения, поэтому использование временного велосимметрического способа для контроля конструкций рассматриваемых типов при одностороннем доступе к ним нецелесообразно.

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.
2. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефектоскопия и диагностика полимерных композиционных материалов акустическими методами /В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 342–347.
3. Мурашов В.В., Алексашин В.М. Контроль прочности зоны соединения элементов интегральных конструкций из полимерных композитов ультразвуковым методом //Клеи. Герметики. Технологии. 2014. №7. С. 15–19.
4. Kablov E., Murashov V., Romyantsev A. Diagnostics of Polymer Composites by Acoustic Methods //Ultrasound. Kaunas: Tecnologija. 2006. №2. P. 7–10.
5. 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.

6. Bobrov V.T., Rozlovenko S.G., Murashov V.V. Materials characterization // *Testing, Diagnostics*. 2010. №2. P. 42–44.
7. Мурашов В.В. Определение физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов акустическими методами // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 465–475.
8. Сорокин К.В., Мурашов В.В. Интеллектуальные углеродные пластики с интегрированными оптическими сенсорами на основе волоконных брэгговских решеток для диагностики преддефектного состояния материала // В сб. докладов XX Всероссийской науч.-технич. конф. по неразрушающему контролю и технической диагностике. М.: Экспоцентр. 2014. С. 339–342 (CD-диск).
9. Способ определения прочности соединения деталей интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов: пат. 2262099 Рос. Федерация; опубл. 10.10.2005.
10. Murashov V.V. Glued Joint Strength Diagnostics // *Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials*. 2009. V. 2. №1. P. 64–70.
11. Генералов А.С., Мурашов В.В., Далин М.А., Бойчук А.С. Диагностика полимерных композитов ультразвуковым реверберационно-сквозным методом // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №1. С. 42–47.
12. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ // *Авиационная промышленность*. 2009. №4. С. 36–46.
13. Петрова А.П., Лукина Н.Ф. Клеи для многоразовой космической системы // *Труды ВИАМ*. 2013. №4. Ст. 04 (viam-works.ru).
14. 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.
15. Murashov V.V. Types of Production and Operational Defects of the Multilayer Glue Constructions and Polymer Composite Materials Products and Methods to Detect them // In: 5-th European-American Workshop on Reliability of NDT. Berlin. 2013 (CD-диск).
16. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Ч. 2. Методы выявления дефектов монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // *Контроль. Диагностика*. 2007. №5. С. 31–36, 41–42.
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. Rose J. Achievements and prospects of development of the ultrasonic waveguide method of control // *Materials Evaluation*. 2010. V. 68. №5. P. 494–500.
19. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение. 2006. С. 129–140.
20. Murashov V.V. Attestation of Glued Articles by Acoustic Impedance Method // *Polymer Science. Ser. D: Glues and Sealing Materials*. 2010. V. 3. №4. P. 267–273.
21. Murashov V.V. Control of Laminated Structures by the Acoustic Free Vibration Method // *Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials*. 2012. V. 5. №4. P. 341–345.
22. Мурашов В.В., Генералов А.С. Контроль многослойных клееных конструкций низкочастотными акустическими методами // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №2. С. 59–67.
23. 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.
24. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль заготовок и деталей из углерод-углеродного композиционного материала многоразового космического корабля «Буран» // *Труды ВИАМ*. 2013. №4. Ст. 05 (viam-works.ru).
25. Бакунов А.С., Мурашов В.В., Сысоев А.М. Контроль лопастей воздушного винта средствами низкочастотной акустики // *Контроль. Диагностика*. 2012. №6. С. 72–74.
26. Murashov V.V. Nondestructive Testing of Glued Joints // *Polymer Science. Series D: Glues and Sealing Materials*. 2009. V. 2. №1. P. 58–63.
27. 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.
28. 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.
29. 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.
30. Карабутов А.А., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б., Резников А.В. Применение ND:YAG-лазера с диодной накачкой в неразрушающем ультразвуковом контроле графито-эпоксидных композитов // *Контроль. Диагностика*. 2002. №11. С. 24–29.
31. Способ определения физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов в конструкциях ультразвуковым методом: пат. 2196982 Рос. Федерация; опубл. 20.01.2003.
32. Способ определения физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов и устройство для его осуществления: пат. 2214590 Рос. Федерация; опубл. 20.10.2003.
33. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука. 1966. С. 84–87.
34. Ермолов И.Н., Вопилкин А.Х., Бадалян В.Г. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии (краткий справочник). М.: Эхо+. 2000. 108 с.
35. Ланге Ю.В., Мурашов В.В. Ультразвуковой временной метод неразрушающего контроля многослойных конструкций с использованием нормальных волн // *Дефектоскопия*. 1977. №2. С. 13–18.
36. Murashov V.V. Control of Multilayer Glued Constructions of Polymeric Composite Materials // *Polymer Science. Series D. Glues and Sealing Materials*. 2012. V. 5. №2. P. 109–115.
37. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение. 1991. 272 с.