

УДК 620.179.1:621.792.05

В.В. Мурашов¹**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СЛОИСТЫХ ПЛАСТИКОВ И МНОГОСЛОЙНЫХ КЛЕЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-87-93

Рассмотрены физические возможности и особенности низкочастотных акустических методов: импедансного, велосиметрического, свободных колебаний и акустико-топографического. Показано, что эти методы имеют преимущества при контроле изделий, выполненных из материалов с высоким уровнем затухания упругих колебаний, а также из гигроскопичных материалов. Приведены результаты исследования эквивалентных схем методов и рассмотрено влияние контактной гибкости сухого точечного контакта и фрикционных шумов на эксплуатационные характеристики каждого из рассматриваемых методов. Представлены результаты экспериментальных исследований и уточнены контролируемые толщины и чувствительность методов при контроле изделий из углепластиков.

Ключевые слова: акустические низкочастотные методы, импедансный метод, велосиметрический метод, метод свободных колебаний, акустико-топографический метод, чувствительность контроля, сухой точечный контакт, фрикционные шумы.

V.V. Murashov¹**RESEARCH AND IMPROVEMENT OF ACOUSTIC LOW-FREQUENCY CONTROL METHODS OF PRODUCTS FROM LAYERED PLASTICS AND MULTILAYERED GLUED OF CONSTRUCTIONS**

Physical opportunities and features of low-frequency acoustic methods are considered: mechanical impedance analysis, velocimetric, free vibration and acoustic-topographic. It is shown that these methods have advantages at control of the products executed from materials with high level of attenuation of elastic oscillations, and also from hygroscopic materials. Results of research of equivalent circuits of methods are given and influence of contact flexibility of the dry point contact and frictional noise on utilization properties of each of considered methods is considered. Results of pilot studies are provided and controlled thickness and sensitivity of methods are specified at control of products from CFRP.

Keywords: acoustic low-frequency methods, mechanical impedance analysis method, velocimetric method, free vibration method, acoustic-topographic method, testing sensitivity, dry point contact, frictional noise.

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

Широкое использование неметаллических материалов [1, 2] в самых различных конструкциях позволяет значительно снизить весовые показатели и требует обеспечения их высокого качества и надежности. Между тем при изготовлении, а также при эксплуатации изделий, выполненных из различных полимерных материалов, в них возможно появление дефектов [3–5], нарушающих заданное значение механических и физических характеристик (расслоения, трещины, раковины, поры и другие отклонения от сплошности материалов).

Для обнаружения нарушений сплошности полимерных материалов используют различные

методы дефектоскопии [6–8]. Перспективными методами контроля деталей из неметаллических материалов являются голографические, радиоволновые, тепловые методы, однако эти методы пока еще не нашли широкого применения в промышленности, так как практически отсутствуют серийно выпускаемые приборы для реализации таких методов.

Наиболее широко применяемыми и аппаратурно обеспеченными методами дефектоскопии неметаллических изделий являются акустические низкочастотные методы [9–11]. Однако существует проблема выбора методов дефектоскопии конкретных изделий ввиду различия эксплуатационных

возможностей таких методов. Основной задачей, решаемой в данной работе, является определение методов контроля различных деталей из слоистых пластиков и многослойных конструкций.

Данная работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.3. «Методы неразрушающих исследований и контроля» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Главным отличием изделий, изготовленных из полимерных композиционных материалов (ПКМ), является их многослойность. Иногда такие изделия делают полностью из пластиков, но чаще неметаллические слои комбинируются с металлическими или с другими неметаллическими слоями. В некоторых случаях металлические части конструкций соединяются с помощью клеев, герметиков и иных подобных материалов [12].

Расслоения материала и непрочности между различными частями конструкций являются типичными дефектами изделий из ПКМ и многослойных конструкций. Для выявления таких дефектов могут применяться различные ультразвуковые методы – например, эхо-метод, теневой и др. [13, 14]. Однако эти методы можно применять лишь тогда, когда контролируемое изделие можно смазывать контактными жидкостями.

Кроме того, использование ультразвуковых методов дефектоскопии ограничивает то, что большинство полимерных материалов обладают большим затуханием упругих колебаний. В этих случаях эффективно применение низкочастотных акустических методов, не требующих погружения в жидкость контролируемых изделий или их смазывания. Эти методы значительно отличаются от методов, применяемых для контроля металлических деталей [15–18].

В данной работе исследованы возможности акустических низкочастотных методов контроля

[19–21], объединенные одним общим признаком: преобразователи имеют сухой точечный контакт с контролируемым объектом [22].

Сухой точечный контакт обладает значительной гибкостью C_k , которая определяет упругое сопротивление контактной зоны при колебаниях. Контактную зону на звуковых и низких ультразвуковых частотах можно рассматривать как сосредоточенное упругое сопротивление:

$$X_k = -\frac{1}{\omega C_k}, \quad (1)$$

где $\omega=2\pi f$ – круговая частота, f – частота.

Сопротивление X_k уменьшает чувствительность преобразователя к изменению импеданса контролируемой конструкции и ограничивает верхний предел частот упругих колебаний.

Упругое сопротивление Z_k , обусловленное контактной гибкостью [23], с импедансом Z_n объекта контроля соединено цепочкой, что соответствует параллельному соединению элементов Z_k и Z_n на эквивалентной схеме.

Эквивалентные схемы, представленные на рис. 1, построены в соответствии с системой электромеханических аналогий для излучающего и приемного преобразователей [24–26], нагруженных на объект контроля.

Преобразователь (рис. 1, а) при излучении упругих колебаний можно представить генератором силы \dot{F} с внутренним импедансом Z_n . Амплитуда колебательной скорости в зоне возбуждения изделия, которая определяет мощность вводимых колебаний, зависит от упругого сопротивления Z_k и уменьшается при уменьшении $|Z_k|$.

Приемный преобразователь (рис. 1, б) представлен механическим импедансом Z_n , а контролируемое изделие – генератором силы \dot{F} с внутренним сопротивлением Z_n . На выходе приемного преобразователя упругий импеданс Z_k уменьшает амплитуду скорости \dot{V}_n , определяющую напряжение.

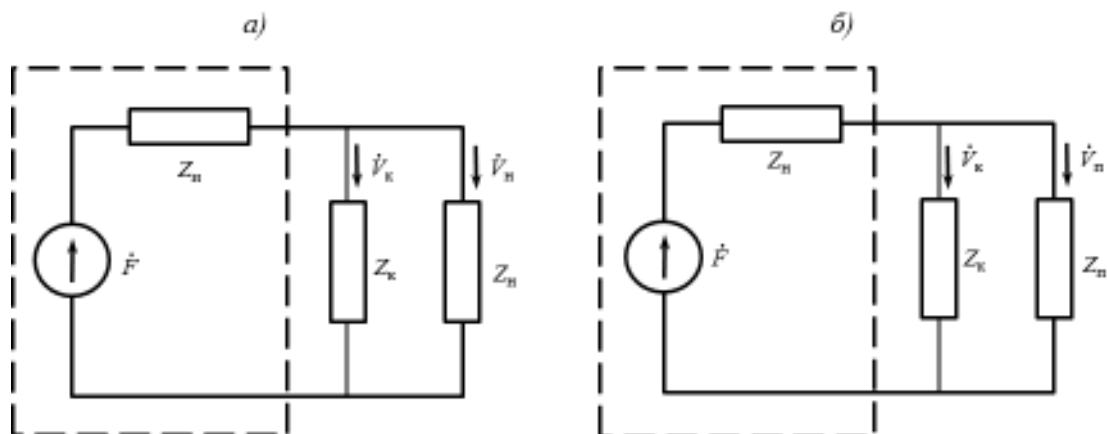


Рис. 1. Эквивалентные схемы излучающего (а) и приемного преобразователей (б)

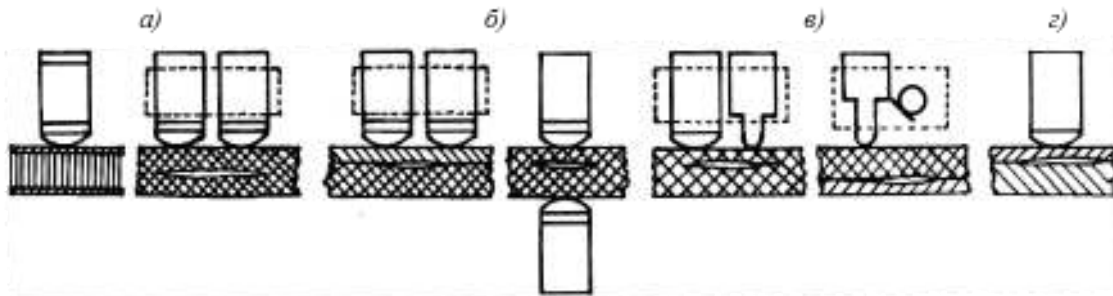


Рис. 2. Условное изображение рассматриваемых методов и их вариантов:

a – импедансный метод; *б* – велосиметрический метод; *в* – метод свободных колебаний; *г* – акустико-топографический метод

На рис. 2 схематически представлены исследуемые методы и их варианты, а на рис. 3 – эквивалентные схемы преобразователей различных дефектоскопов.

На рис. 3, *a* представлена эквивалентная схема, соответствующая импедансному методу, реализуемому с совмещенным преобразователем [27]. Здесь *M* – звукопровод, на концах которого размещены излучающий и приемный пьезоэлементы. При рассмотрении эквивалентной схемы совмещенного преобразователя видно, что упругое сопротивление зоны контакта Z_k , которое определяется контактной гибкостью, шунтирует импеданс контролируемого изделия Z_n как при излучении упругих колебаний, так и при их приеме, т. е. оказывает значительное влияние на характеристики такого преобразователя. При $|Z_n| \gg |Z_k|$ изменение Z_n практически не меняет общей акустической нагрузки преобразователя. Поэтому импедансным методом, реализуемым с совмещенным преобразователем, выявляются дефекты, расположенные на глубине не более середины стенки изделия.

Из эквивалентной схемы раздельно-совмещенного преобразователя (рис. 3, *б*) видно, что сопротивление, обусловленное контактной гибкостью, не играет столь существенной роли, так как даже при $|Z_{ни}| \gg |Z_{кн}|$ изменение $Z_{ни}$ будет сопровождаться изменением колебательной скорости $\dot{V}_{ни}$, а значит, и связанных с ней величин $\dot{V}_{кн}$ и \dot{V}_n . Все это приводит к тому, что глубина залегания выявляемого дефекта в пластиках увеличивается до 20–25 мм.

Если над дефектом расположен только приемный вибратор, то в зоне излучения увеличения амплитуды колебаний $\dot{V}_{ни}$ не происходит, так как импеданс $Z_{ни}$ не меняется. Более того, вследствие отражения части энергии на расположенной между вибраторами границе раздела доброкачественной и дефектной зон амплитуда волны в зоне дефекта уменьшается. При расположении в дефектной зоне только излучающего вибратора колебательная скорость $\dot{V}_{ни}$ растет, но из-за значительного отражения от границы раздела дефектной и доброкачественной зон амплитуда колебаний в месте нахождения приемного вибратора практически не увеличивается. Следовательно, при разделении излучателя и приемника снижается чувствительность метода к близко расположенным дефектам.

Для велосиметрического метода база преобразователя должна быть порядка длины волны в контролируемом объекте и составлять 25 мм (преобразователь ПФ прибора АД-10У). Это связано с тем, что при контроле фазовым способом велосиметрического метода вызываемое дефектом изменение фазы пропорционально базе преобразователя. Если база будет маленькой, то изменение фазы будет недостаточным для уверенной регистрации дефекта. Таким образом, чувствительность фазового способа велосиметрического метода ниже, чем чувствительность импедансного метода.

Недостатками временного способа велосиметрического метода [28] являются необходимость

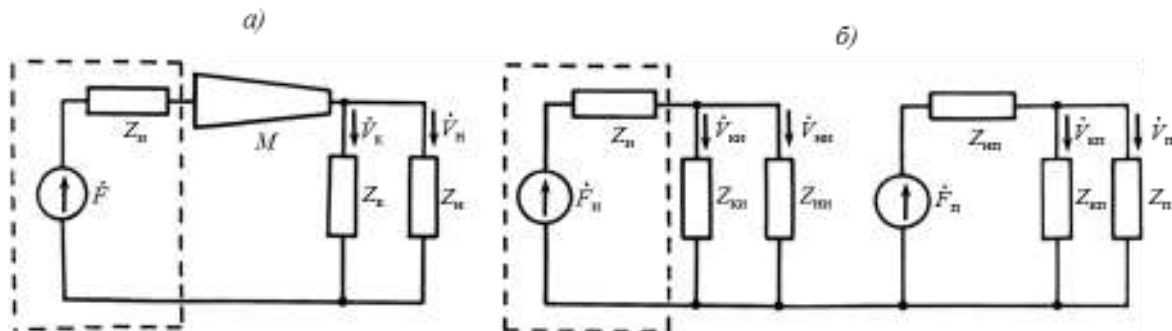


Рис. 3. Эквивалентные схемы совмещенного (*a*) и раздельно-совмещенного преобразователей (*б*)

обеспечения двухстороннего доступа к объекту контроля, а также использование специального устройства для соосного размещения преобразователей с разных сторон контролируемого изделия по нормали к его поверхности.

Метод свободных колебаний [29, 30] позволяет выявлять нарушения сплошности материала на значительной глубине (до 20–40 мм), а также отличается возможностью контроля объектов из материалов с высоким затуханием упругих колебаний и малым модулем упругости (например, резины, пенопласты и др.). Это связано с двумя факторами: при контроле в объекте контроля возбуждаются мощные колебания и отделенная дефектом в виде расслоения или непрочекля часть изделия колеблется на собственной резонансной частоте. Следует отметить, что такой дефект, как правило, нельзя свести ни к одному из трех типовых случаев – зажатая, опертая и свободная на краях пластина. Только в случае неглубоко расположенных крупных дефектов приближенно можно рассматривать их как пластины, зажатые по контуру.

Основная частота зажатой по контуру пластины диаметром D и толщиной h определяется выражением [31–33]

$$f_0 = \frac{1,88h}{D^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}, \quad (2)$$

где E , μ и ρ – модуль упругости, коэффициент Пуассона и плотность материала пластины соответственно.

Для реальных дефектов формула (2) имеет ограниченное применение при анализе характеристик метода свободных колебаний, однако, как показывает практика, при реальных условиях закрепления границ дефектного участка величина f_0 с ростом h и E и уменьшением D и ρ увеличивается, хотя и по другому закону. Ввиду трудностей теоретического анализа свободных колебаний бездефектных и дефектных зон изделий основным способом исследования характеристик метода свободных колебаний является эксперимент.

Метод свободных колебаний [34] реализуется при использовании пьезоэлектрических или микрофонных приемных преобразователей. Недостатками преобразователей с пьезоэлектрическими приемниками являются влияние на результаты контроля фрикционных шумов, возникающих при перемещении преобразователя по поверхности контролируемой конструкции, а также неравномерность их амплитудно-частотной характеристики.

Упругие колебания изделия в зоне контроля в преобразователе с микрофонным приемником передаются к микрофону по воздуху. Для уменьшения потерь микрофоны располагают вблизи зон возбуждения изделия. Основными преимуществами микрофонного приемника являются его бесконтактность и, соответственно, возможность

контроля изделий с шероховатой поверхностью, недостатком – возможное влияние шумов в районе проведения контроля.

Акустико-топографический метод [35] применяется чаще всего для выявления дефектов в многослойных паяных, сварных или клееных сотовых конструкциях, причем лучшие результаты получаются при выявлении дефектов паяных и сварных конструкций. Основным преимуществом акустико-топографического метода является высокая производительность контроля и визуализация его результатов с помощью мелкодисперсного порошка (например, ликоподия).

При контроле сварных и паяных конструкций с небольшой толщиной верхнего листа (до 1 мм) чувствительность акустико-топографического метода в 2–3 раза превышает чувствительность при контроле другими акустическими методами, однако при увеличении толщины верхнего листа она резко падает.

Чувствительность акустико-топографического метода, определяемая как наименьший диаметр выявляемого дефекта, может быть определена по формуле

$$d = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 0,2S^2 h}{f}} \sqrt[4]{\frac{E}{12\rho(1-\mu^2)}}, \quad (3)$$

где S – площадь дефекта; h – глубина залегания дефекта.

Возбуждение упругих колебаний в объекте контроля можно производить как с помощью магнитострикционного излучателя, так и с помощью электромагнитного вибратора.

Состояние поверхности контролируемой конструкции может влиять на характеристики исследуемых методов. Для преобразователей, у которых имеется с контролируемой конструкцией точечный сухой контакт, характерен особый вид помех – фрикционные шумы, которые представляют собой дополнительную составляющую электростатического сигнала на измерительном пьезоэлементе преобразователя, возникающую при ударе наконечника пьезоэлектрического преобразователя с выступающими неровностями шероховатой поверхности контролируемой конструкции. При наложении этой составляющей на основной сигнал она играет роль помехи, затрудняющей контроль.

Спектр фрикционных шумов обычно весьма широкий, однако большая его часть находится в области звуковых частот. Поэтому импедансный метод, реализуемый с применением совмещенного преобразователя, сильно зависит от уровня фрикционных шумов.

При контроле конструкций с большой шероховатостью поверхности целесообразно использовать реализуемые с более высокочастотным раздельно-совмещенным преобразователем импедансный или велосимметрический фазовый методы, потому что на фазу вышеупомянутые

факторы не оказывают существенного влияния. При контроле методом свободных колебаний в таких случаях следует использовать преобразователь с микрофонным приемником.

Результаты

Для экспериментальных исследований возможности выявления дефектов различными низкочастотными акустическими методами из слоистых пластиков изготовлены образцы с искусственными дефектами, имитирующими расслоения. Образцы представляли собой плиты из углепластика ВКУ-17КЭ0,1 размером 220×220 мм и толщиной 8 мм.

Для образования дефектов в виде непроклеев и расслоений в образцы при изготовлении заложены вырезанные из фольги тонкие вкладыши из нержавеющей стали. Вкладыши, имеющие форму треугольника, закладывали в середину толщины плиты. Для того чтобы вкладыши можно было легко удалить, их закладывали так, чтобы часть вкладыша выступала за кромку образца. Кроме того, для облегчения их удаления на вкладыши наносили антиадгезионный состав.

Образцы исследовали импедансным методом с применением совмещенного (прибор АД-42И [36]) и раздельно-совмещенного преобразователей (приборы АД-10У [37] и АД-64М [38, 39]). Результаты исследований представлены на рис. 4, а. Видно, что наибольшей чувствительностью обладает дефектоскоп АД-42И. Наименьшая протяженность дефекта, выявляемая этим дефектоскопом, составляет 15 мм. Анализ данных на рис. 4, а позволяет заключить, что чувствительность приборов АД-10У и АД-64М практически одинакова, наименьший размер выявляемого дефекта составляет 20 мм.

После проведения специальной обработки образцов из углепластика они стали более жесткими

и при этом более пористыми [40]. Исследование образцов после обработки показало, что приборы с раздельно-совмещенными преобразователями при контроле обладают большей чувствительностью [41]. Результаты исследования образцов после обработки представлены на рис. 4, б.

Анализ данных на рис. 4, б позволяет заключить, что приборы АД-10У и АД-64М значительно лучше, чем дефектоскоп АД-42И выявляют дефекты, заложенные в образцах. Минимальный размер дефекта, выявляемого прибором АД-10У, составляет 20 мм, а прибором АД-64М равен 17 мм. Дефектоскоп АД-42И при перемещении преобразователя от основания треугольного дефекта к его вершине начинает выявлять дефект только в том месте, где его протяженность составляет 40 мм и значительно сокращает площадь выявляемого дефекта.

Кроме описанных контрольных образцов, дополнительно изготовили еще один образец из углепластика ВКУ-17КЭ0,1 размером 220×220 мм и толщиной 25 мм. На глубине 20 мм от одной из поверхностей образца в этом образце заложили дефект в виде расслоения. Данный образец исследовали всеми ранее перечисленными специальными акустическими методами, кроме акустико-топографического метода. Дефект выявили только одним методом – спектральным вариантом метода свободных колебаний с помощью дефектоскопа АД-64М с использованием преобразователя, снабженного микрофонным приемником.

Обсуждение и заключения

В процессе работы с целью определения области применения рассмотренных специальных низкочастотных акустических методов исследованы эквивалентные схемы, построенные в соответствии с системой электромеханических аналогий,

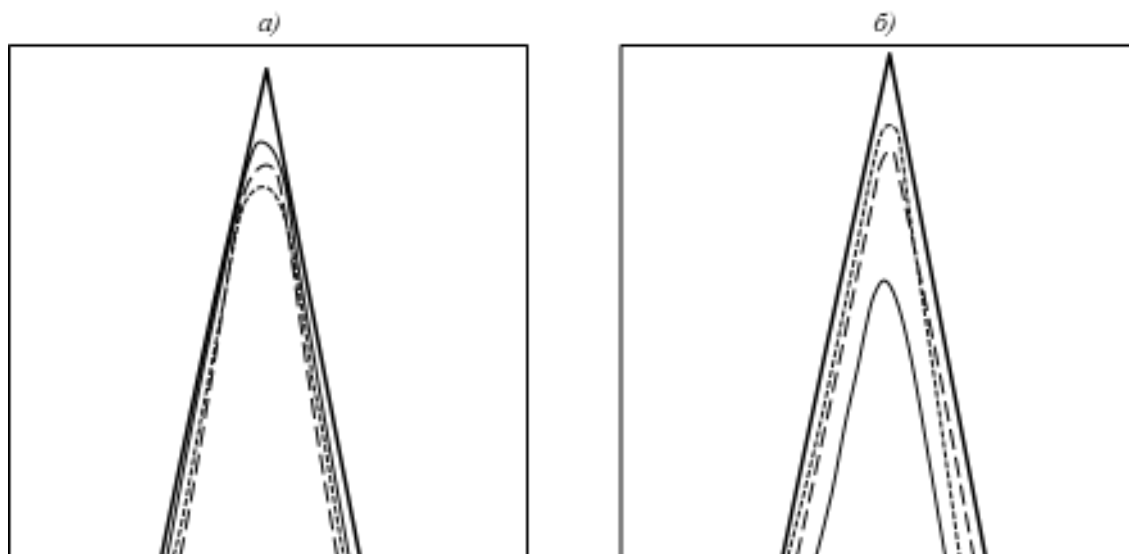


Рис. 4. Результаты исследования приборами АД-42И (—), АД-64М (---) и АД-10У (- - -) образцов из необработанного (а) и обработанного (б) углепластика ВКУ-17КЭ0,1

для излучающего и приемного преобразователей рассматриваемых методов. Показано, что амплитуда колебательной скорости изделия в зоне возбуждения, определяющая вводимую мощность упругих колебаний, зависит от сопротивления Z_k , обусловленного контактной гибкостью, и уменьшается с уменьшением модуля $|Z_k|$. Упругий импеданс Z_k уменьшает амплитуду скорости V_p , определяющую напряжение на выходе приемного преобразователя. Исследование влияния контактной гибкости сухого точечного контакта показало, что упругий импеданс Z_k уменьшает чувствительность преобразователя к изменению импеданса контролируемой конструкции.

Проведенные экспериментальные исследования на образцах позволили уточнить толщины контролируемых изделий и чувствительность специальных низкочастотных акустических методов. Анализ результатов работы позволяет сделать следующие заключения.

1. Импедансный метод, реализуемый с использованием совмещенного преобразователя, обладает высокой чувствительностью к близкорасполо-

женным дефектам, но позволяет контролировать только объекты малой толщины. Импедансный метод, реализуемый с раздельно-совмещенным преобразователем, обладает меньшей чувствительностью к близкорасположенным дефектам, но позволяет контролировать объекты вдвое большей толщины, чем при контроле импедансным методом, реализуемым с раздельно-совмещенным преобразователем.

2. Фазовый вариант велосиметрического метода имеет преимущество при контроле объектов из неметаллических материалов с шероховатыми поверхностями. Временной вариант велосиметрического метода отличается отсутствием неконтролируемых (мертвых) зон по толщине объекта контроля.

3. Метод свободных колебаний имеет преимущество при контроле изделий с малым импедансом и высоким уровнем затухания упругих колебаний.

4. Акустико-топографический метод обладает высокой производительностью, особенно при контроле паяных конструкций с малой толщиной верхнего листа.

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. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. №2 (14). С. 16–21.
3. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. №5. С. 8–18.
4. Murashov V.V. Types of Production and Operational Defects of the Multilayer Glue Constructions and Polymer Composite Materials Products and Methods to Detect them // *Proceedings 5th European-American Workshop on Reliability of NDT (Berlin, Germany, Oct. 7–10 2013)*. URL: <http://www.nde-reliability.de/Proceedings/Posters> (дата обращения: 16.10.2018).
5. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Комарова О.А., Гуняева А.Г. Конструкционные углепластики, модифицированные наночастицами // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 277–286.
6. Gunasekera A.M. Monitoring of impact damage products from PCM // *Materials Evaluation*. 2010. Vol. 68. No. 8. P. 880–887.
7. Murashov V.V. Nondestructive Testing of Glued Joints // *Polymer Science. Series D. Glues and Sealing Materials*, 2009. Vol. 2. No. 1. P. 58–63.
8. Мурашов В.В. Применение ультразвукового резонансного метода для выявления дефектов клееных конструкций // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. №1 (50). С. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-88-94.
9. Мурашов В.В. Контроль и диагностика многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами. М.: Спектр, 2016. 244 с.
10. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций акустическим импедансным методом // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2010. №3. С. 13–20.
11. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.
12. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Сереженков А.А. Конструкционные и термостойкие клеи // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 328–335.
13. Барынин В.А., Будадин О.Н., Кульков А.А. Современные технологии неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов. М.: Спектр, 2013. 243 с.
14. Rose J.L., Soley L.E. Ultrasonic guided waves for anomaly detection in aircraft components // *Materials Evaluation*. 2000. Vol. 58. No. 9. P. 1080–1086.
15. Nagem R.J., Seng J.M., Williams J.H. Residual life predictions of composite aircraft structures via nondestructive testing. Part 2: Degradation modeling and residual life prediction // *Materials Evaluation*. 2000. Vol. 58. No. 11. P. 1310–1319.

16. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 544 с.
17. Петрова А.П. Клеящие материалы. Справочник / под ред. Е.Н. Каблова, С.В. Резниченко. М.: Редакция журнала «Каучук и резина», 2002. 196 с.
18. Smith R.A., Nelson L.J. et al. Automation of control and estimation of parameters of defects in parts of the PCM // *Insight*. 2009. Vol. 51. No. 2. P. 82–87.
19. Мурашов В.В. Применение вариантов акустического импедансного метода для контроля деталей из ПКМ и многослойных клееных конструкций // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 469–482. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-S-469-482.
20. Ланге Ю.В. Акустический спектральный метод неразрушающего контроля // *Дефектоскопия*. 1978. №3. С. 7–14.
21. Ланге Ю.В. Низкочастотные акустические методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций // *Контроль. Диагностика*. 2004. №2. С. 39–41.
22. Ланге Ю.В., Устинов Е.Г. Акустические импульсы ударного возбуждения изделий // *Дефектоскопия*. 1982. №10. С. 81–87.
23. Ланге Ю.В., Теумин И.И. О динамической гибкости сухого точечного контакта // *Дефектоскопия*. 1971. №2. С. 49–60.
24. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Ультразвуковой контроль // *Неразрушающий контроль: справочник / под общ. ред. В.В. Клюева*. М.: Машиностроение, 2006. Т. 3. 864 с.
25. Скучик Е. Основы акустики. М.: Мир, 1976. Т. 1. 520 с.
26. Барышев С.Е. Спектральная плотность последовательности эхо-сигналов // *Дефектоскопия*. 1974. №2. С. 19–25.
27. Ланге Ю.В. Электрическое моделирование пьезопреобразователей низкочастотных акустических дефектоскопов // *Дефектоскопия*. 1979. №11. С. 20–26.
28. Мурашов В.В., Грифонов С.И. Контроль качества полимерных композиционных материалов ультразвуковым временным способом велосимметрического метода // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №4 (37). С. 86–90. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-86-90.
29. Мурашов В.В., Яковлева С.И. Применение акустического метода свободных колебаний для контроля конструкций, содержащих слои из неметаллических материалов // *Контроль. Диагностика*. 2017. №10. С. 28–35.
30. Бакунов А.С., Мурашов В.В., Сысоев А.М. Контроль лопастей воздушного винта средствами низкочастотной акустики // *Контроль. Диагностика*. 2012. №6. С. 72–74.
31. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. М.: Мир, 1971. С. 309.
32. Вайнберг Д.В. Справочник по прочности, устойчивости и колебаниям пластин. Киев: Будівельник, 1973. С. 260.
33. Иофе В.К., Янпольский А.А. Расчетные графики и таблицы по электроакустике. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1954. С. 98.
34. Меркулов Л.Г., Токарев В.А. Физические основы спектрального метода измерения затухания ультразвуковых волн в материалах // *Дефектоскопия*. 1970. №4. С. 3–11.
35. Бирюкова Н.П., Китайгородский Ю.И. Физические основы акустико-топографического метода // *Сб. докл. VII Всесоюз. науч.-технич. конф. «Неразрушающий контроль материалов, изделий и сварных соединений»*. М.: НИИИИ, 1974. С. 107.
36. Ланге Ю.В., Воропаев С.И., Ермолаев В.П., Мужижкий В.Ф. Возможности контроля многослойных конструкций импедансным дефектоскопом АД-42И // *Заводская лаборатория*. 1993. №10. С. 19–21.
37. Ланге Ю.В., Виноградов Н.В., Цорин Е.И. и др. Низкочастотный акустический дефектоскоп для контроля армированных пластиков и клееных конструкций // *Дефектоскопия*. 1977. №1. С. 115–119.
38. Ланге Ю.В., Воропаев С.И., Мужижкий В.Ф. и др. Применение спектрального анализа в низкочастотных акустических дефектоскопах // *Дефектоскопия*. 1995. №10. С. 74–83.
39. Ланге Ю.В. О работе пьезоприемника акустического спектрального дефектоскопа // *Дефектоскопия*. 1978. №7. С. 67–77.
40. Ашкенази Е.К. Анизотропия машиностроительных материалов. Л.: Машиностроение, 1969. С. 37–39.
41. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. С. 84–87.