

В.В. Мурашов¹, Е.И. Косарина¹, А.С. Генералов¹

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И МНОГОСЛОЙНЫХ КЛЕЕНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассмотрены акустические и рентгеновские методы неразрушающего контроля, имеющие наибольшее применение для контроля деталей и клееных конструкций из полимерных композиционных материалов. Указаны области применения данных методов, типы приборов для реализации методов и нормативно-техническая документация по методикам неразрушающего контроля.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, нарушения сплошности, физико-механические свойства материала, неразрушающий контроль, акустические методы контроля, рентгеновские методы контроля.

V.V. Murashov¹, E.I. Kosarina¹, A.S. Generalov¹

QUALITY CONTROL OF AVIATION PARTS MADE FROM POLYMER COMPOSITE MATERIALS AND MULTILAYERED ADHERED CONSTRUCTIONS

Some acoustic and x-ray methods of nondestructive testing most widely used for control of parts and adhered constructions made from polymeric composite materials are considered. Scopes of the given methods, types of devices for implementation of these methods and specifications and technical documentation for nondestructive testing are described.

Keywords: polymer composite materials, discontinuities, physical and mechanical properties of materials, nondestructive testing, acoustic methods of quality control, x-ray quality control.

¹ Федеральное 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

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят все большее применение для деталей ответственного назначения летательных аппаратов. В авиационной технике особенно значительным является рост объема применения высокомодульных ПКМ – углепластиков, стеклопластиков, органопластиков, углерод-углеродных материалов, а также ПКМ, в которых слои волокнистого материала чередуются со слоями фольги и различных гибридных ПКМ.

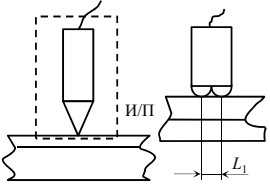
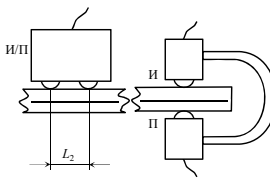
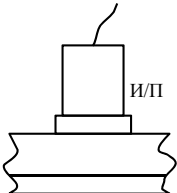
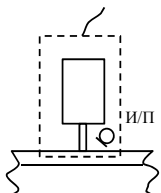
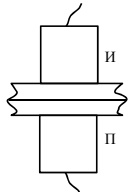
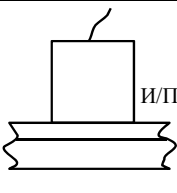
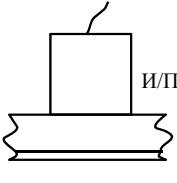
В настоящее время отсеки фюзеляжа, кессона и панели крыла, детали механизации крыла, носки кия и стабилизатора, панели стабилизатора и кия, детали конструкции вертолета, лопадки компрессоров, вентиляторов, винтов, усиливающие накладки корпуса, оболочки монолитной и трехслойной конструкции и многие другие детали самолета выполняются из ПКМ, в том числе из углепластика ВКУ-17КЭ0,1 и стеклопластика ВПС-37К10, формуемых из клеевых препрегов, получаемых по расплавной технологии.

Среди методов контроля деталей из ПКМ и многослойных клееных конструкций акустические методы по объему применения занимают первое место. Эти методы основаны на взаимодействии упругих колебаний и волн широкого диапазона частот с контролируемой деталью или конструкцией [1, 2].

Для неразрушающего контроля и диагностики клеевых соединений с ПКМ применяются как традиционные акустические методы, обычно реализуемые с использованием жидкости для создания акустического контакта между преобразователем прибора и изделием (иммерсионный, струйный, контактный варианты), так и специальные низкочастотные акустические методы, реализуемые с использованием сухого точечного контакта преобразователя с объектом контроля или эластичного протектора, соединенного с рабочим органом преобразователя, а также бесконтактные методы [1–3].

В таблице указаны области применения различных реально применяемых в настоящее время в России акустических методов контроля и ориентировочно представлены типы контролируемых клееных конструкций, а также показаны схемы расположения преобразователей приборов при контроле.

Акустические методы контроля деталей и клееных конструкций из ПКМ

Метод контроля	Вариант метода	Схема расположения преобразователя(ей) на конструкции при контроле	Область применения метода
Импедансный	Изгибных и продольных волн		Выявление расслоений в монолитных и слоистых конструкциях из ПКМ и непрочлеен между обшивками и элементами жесткости или легким наполнителем
Собственных колебаний	Вынужденных колебаний (резонансный)		Выявление дефектов соединений между элементами многослойных конструкций, в особенности в тех случаях, когда толщина обшивки, со стороны которой проводится контроль, равна или больше толщины каркаса. Оценка прочности клеевых соединений
	Свободных колебаний		Контроль качества соединения неметаллического слоя с высоким затуханием упругих колебаний в нем (резиноподобные материалы, различные теплозащитные покрытия и т. п.) и металлического или неметаллического каркаса
Прохождения	Теневой		Контроль монолитных, слоистых и сотовых конструкций с толстыми (свыше 7 мм) обшивками из ПКМ и сотами из полиамидной бумаги
	Велосимметрический		Контроль соединений между неметаллическими и металлическими слоями конструкции при одностороннем или двухстороннем доступе к ней
Отражения	Реввербационный		Обнаружение дефектов соединений между металлическим слоем и неметаллом или легким наполнителем (между каркасом и клеевой вспенивающейся композицией)
	Эхометод		Выявление дефектов в монолитных конструкциях и в клеевых соединениях толсто-стенных конструкций (свыше 5–10 мм)

Примечание: И – излучающий преобразователь; П – приемный преобразователь; И/П – раздельно-совмещенный преобразователь (излучатель и приемник совмещены в одном корпусе, но акустически изолированы друг от друга); L – база контроля (расстояние между излучающим и приемным преобразователями); $L_1 \ll L_2$.

К методам первой группы относятся теневой метод (прохождения), эхометод (основной и реверберационный варианты) и метод вынужденных колебаний (резонансный метод). К специальным низкочастотным методам относятся импедансный, велосиметрический методы, метод свободных колебаний, вибрационно-топографический и вибрационно-тепловой методы [1, 2].

Акустико-топографический и акустико-тепловой методы, не имеющие в настоящее время должного аппаратного обеспечения, в таблице не представлены. Рассмотрим упомянутые выше акустические методы контроля подробнее.

Теневой метод (прохождения) реализуется, как правило, двумя способами: амплитудным и временным. При контроле амплитудным способом нарушения сплошности обнаруживают по ослаблению или исчезновению принимаемого сигнала, при контроле временным способом – по увеличению времени прохождения сигнала, так как путь УЗ колебаний при огибании зоны материала с резко отличающимся характеристическим импедансом увеличивается [1]. Метод используют для обнаружения зон нарушения соединений в многослойных конструкциях и выявления расслоений, пустот, зон повышенной пористости и т. п. в деталях и конструкциях из ПКМ [1–3].

Достоинства теневого метода – высокая достоверность, так как метод не имеет глубинной неконтролируемой зоны. Недостатки метода – необходимость двухстороннего доступа к контролируемой конструкции, что не всегда возможно (например, в условиях эксплуатации изделия), а также зависимость результатов контроля от акустического контакта и несоосности преобразователей [3], возникающей при контроле крупногабаритных изделий. Для обеспечения соосного расположения преобразователей при контроле таких изделий используют конструкции в виде скоб или специальные системы ориентации.

Эхометод (метод отражения) заключается в посылке в контролируемую деталь преобразователем ультразвукового импульса и приеме тем же или другим преобразователем отраженных от структурных неоднородностей и от противоположной поверхности детали (дна) сигналов. По временной развертке можно различать отраженные сигналы и фиксировать время их прихода. В этом основном варианте эхометод применяется для выявления расслоений, трещин, воздушных пузырей в конструкциях из ПКМ толщиной от 4–10 мм до 100–200 мм, причем за рубежом [1, 4] метод применяется шире, чем в России.

При контроле эхометодом деталей и конструкций из неметаллических материалов большой толщины приходится переходить на низкие частоты (обычно 200–1250 кГц), что обусловлено высоким затуханием УЗ колебаний в неметаллах. Переход на низкие частоты приводит к снижению чувствительности контроля эхометодом.

Реверберационный метод контроля (метод многократных отражений), называемый также эхореверберационным методом, являющийся разновидностью ультразвукового импульсного эхометода, в последнее время находит все более широкое применение в нашей стране и за рубежом для контроля качества клеевых соединений в многослойных конструкциях [1]. Этот метод использует влияние зоны нарушения соединения между слоями с различными значениями характеристических импедансов и коэффициентов затухания упругих волн на количество и скорость уменьшения амплитуд многократно отраженных импульсов в слое с меньшей величиной коэффициента затухания.

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

К недостаткам реверберационного метода относятся трудность или невозможность выявления зон нарушения соединения в том случае, когда клеевой слой прилега-

ет к обшивке, со стороны которой проводится контроль (непроклей между клеевым слоем и внутренним элементом конструкции), а также трудность выявления зон нарушения соединения в конструкциях с очень тонкими обшивками и с обшивками из материалов с высоким затуханием в них упругих колебаний. Общим недостатком метода является возможность контроля, как правило, только комбинированных конструкций типа металл–пластик с небольшой кривизной, причем при контроле применяется контактная жидкость.

Метод вынужденных колебаний (резонансный метод), применяемый для контроля многослойных конструкций из ПКМ, является разновидностью резонансного метода, используемого для толщинометрии и контроля металлических деталей [5]. Признаком нарушения сплошности при контроле таким модифицированным резонансным методом служит изменение резонансной частоты нагруженного на конструкцию пьезопреобразователя. Дополнительным признаком нарушения сплошности может служить изменение добротности системы пьезоэлемент–изделие.

Резонансный метод может применяться для контроля клееных конструкций в тех случаях, когда применение других методов (например, импедансного) не эффективно. Так, резонансным методом выявляются нарушения сплошности двухслойных материалов при одностороннем доступе со стороны более толстого слоя [1, 2].

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

Импедансный метод реализуется при одностороннем доступе к контролируемому агрегату и применяется в двух вариантах: с использованием совмещенного и с использованием раздельно-совмещенного преобразователя [1–3].

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

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

Велосиметрический метод основан на влиянии структурных неоднородностей на скорость распространения упругих волн в контролируемой конструкции, а также на изменении пути волны между излучателем и приемником, вызванном наличием таких неоднородностей [1, 2]. Метод реализуется как при одностороннем, так и при двухстороннем вариантах контроля, при этом в изделии могут возбуждаться как непрерывные, так и импульсные колебания частотой 20–60 кГц, которые распространяются в виде антисимметричных волн нулевого порядка (*мода a_0*) и (или) продольных волн.

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

Одностороннему варианту метода свойственна глубинная неконтролируемая зона, прилегающая к поверхности, противоположной поверхности ввода УЗ колебаний. Она составляет 20–40% от толщины стенки конструкции. Двухсторонний вариант ме-

тогда не имеет глубинной неконтролируемой зоны, поэтому при контроле этим вариантом метода можно выявлять нарушения сплошности во всем сечении конструкции.

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

Метод свободных колебаний основан на ударном возбуждении импульсов свободно затухающих упругих колебаний в контролируемой конструкции (или ее части) и анализе параметров принятого сигнала. Признаком нарушения сплошности является изменение спектра упругих колебаний конструкции в зоне контроля и изменение амплитуды, частоты или фазы спектральных составляющих сигнала. Предложен вариант метода, при реализации которого признаком нарушения сплошности является изменение параметров колебаний бойка, а именно амплитуды и ширины спектра его собственных колебаний [1, 2, 4]. В практике контроля ПКМ используют чаще всего локальный вариант метода.

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

Акустико-топографический метод основан на возбуждении в контролируемой конструкции упругих колебаний и регистрации распределения их амплитуд на поверхности конструкции [1]. Метод применяется для выявления нарушений сплошности соединения слоев в многослойных паяных, а в некоторых случаях и клееных конструкциях. В качестве индикатора для обнаружения и фиксации различия в уровне колебаний исследуемых зон поверхности контролируемой конструкции обычно применяются тонкодисперсные порошки, а также пасты и суспензии.

Акустико-эмиссионный метод основан на регистрации акустических волн, возникающих при пластической деформации участка контролируемого объекта. Метод применяется для контроля деталей из ПКМ и многослойных клееных конструкций [1, 2]. Следует отметить, что этот метод в промышленности имеет ограниченное применение, что объясняется необходимостью нагружения контролируемой детали или конструкции и сложностью методики контроля. За рубежом метод используют гораздо шире, чем в нашей стране [4].

Точные рекомендации по методам и средствам контроля в некоторых случаях могут быть выданы только по результатам опробования на образцах или натуральных конструкциях с искусственными или естественными дефектами.

В настоящее время в ВИАМ создано новое научное направление в диагностике физико-механических свойств и состава ПКМ, позволяющее определять упругие и прочностные свойства, пористость, плотность, содержание матрицы и наполнителя, степень отверждения матрицы углепластиков в конструкциях планера самолета и других изделиях ответственного назначения лазерно-акустическим способом УЗ контроля путем использования корреляционных уравнений, параметрами которых являются ам-

плитудные, временные и спектральные характеристики принятых акустических сигналов, определяемые непосредственно в конструкции без ее разрушения. Исследована информативность принимаемых акустических сигналов, прошедших через материал, предложены способы их комплексирования, обеспечивающие повышение точности определения физико-механических свойств материала. Показано, что для повышения информативности параметров диагностики целесообразно использовать методику широкополосной акустической спектроскопии с целью получения частотных зависимостей коэффициента затухания и скорости ультразвуковых волн и трансформации этих зависимостей при изменении состава материала [6, 7].

Использование лазерного возбуждения импульсов упругих колебаний длительностью не более 0,05 мкс дает возможность проводить спектральный анализ принятых акустических сигналов в широкой полосе частот – от 0,1 до 10 МГц, что позволяет повысить точность и достоверность диагностики свойств и состава ПКМ неразрушающим методом. Установлено, что основными критериями выбора одиночного или комплексного параметра диагностики при оценке физико-механических характеристик и состава ПКМ являются коэффициент корреляции (или корреляционного отношения) [8, 9] и критерий надежности этого коэффициента.

Рентгеновский метод. Наряду с акустическими методами неразрушающего контроля (НК) в некоторых случаях принципиально возможно применение радиационного контроля, в частности *рентгенографического*. При правильном выборе режимов и параметров контроля достигают высокого качества рентгеновских снимков как по чувствительности, так и по разрешающей способности. Все же рентгенографический метод имеет недостатки, которые диктуют поиск альтернативы ему. Непопулярность рентгенографического метода объясняется следующим: во-первых, прежде всего, его высокая трудоемкость, связанная с фотообработкой экспонированной радиографической пленки, во-вторых, высокая стоимость серебросодержащей радиографической пленки. Рентгеновский метод способен надежно выявлять «объемные» дефекты. В дефектоскопии к «объемным» относятся дефекты, имеющих размеры одного порядка во всех направлениях, в отличие от «плоскостных» дефектов, у которых размер в одном из направлений на 1–3 порядка меньше, чем в остальных. Расслоения, часто встречающиеся в конструкциях из ПКМ, представляет собой «плоскостные» дефекты, поэтому гарантированное обнаружение обусловлено ориентацией конструкции по отношению к пучку излучения. На рисунке условно показана различная ориентация плоскостного дефекта (1–4) внутри «монолитного» тела объекта контроля (ОК), ограниченного криволинейной поверхностью, просвечиваемого пучком рентгеновского излучения, и распределение мощности доз излучения за объектом контроля. Например, для расслоения 3 центральный луч ориентирован параллельно плоскости расслоения и попадает в его раскрытие. С точки зрения полезной информации это наиболее благоприятное расположение дефекта по отношению к пучку излучения, в то время как дефект 2 по отношению к пучку излучения расположен наименее благоприятно. Радиационный контраст его изображения минимален. Если объекты контроля невелики по своим габаритам, рентгенографический контроль необходимо проводить за несколько экспозиций, что делает его еще более трудоемким и дорогостоящим [10, 11].

В этом случае целесообразно применение *рентгеноскопического метода*, основанного на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в световое изображение рентгенооптического преобразователя, причем получаемое изображение анализируют в процессе контроля. Главное достоинство этого метода заключается в том, что световое изображение на выходном экране становится достаточно качественным как только плотность потока энергии фотонов достигнет определенного значения. Качество светотеневого изображения ОК зависит от характеристик излучения и радиационно-оптического преобразователя, причем при рентгеноскопическом кон-

троле значения некоторых характеристик (плотность потока энергии излучения, ее спектральный состав, коэффициент усиления яркости радиационно-оптического преобразователя, его коэффициент передачи контраста и пр.) можно изменять в процессе анализа светотеневого изображения. Добиться наилучшего качества этого изображения можно, не зная оптимальных параметров рентгеноскопической системы и не прибегая ни к каким расчетам. Простота оптимизации качества светотеневых изображений дает оператору возможность увеличивать размеры изображения ОК; осуществлять перемещение ОК по линии «источник–преобразователь», его поворот или смещение, чтобы подобрать оптимальное направление излучения относительно ОК. В рентгенографическом методе такие вариации привели бы к большому числу экспозиций, а следовательно, к большому расходу радиографической пленки и возрастанию трудоемкости контроля. Если ОК неоднороден по плотности или имеет переменную толщину и трудно анализировать отдельные детали светотеневого изображения, можно использовать подвижные фильтры, регулирующие мощность дозы излучения, взаимодействующей с преобразователем, или последовательно увеличивать энергию фотонов, изучая области ОК с разной степенью поглощения [12]. Наиболее эффективен рентгеноскопический метод контроля на наличие неравноплотных зон, рассредоточенных по всему объему. В настоящее время разработаны рентгеноскопические установки, позволяющие проводить контроль с удовлетворительной чувствительностью. Эффективность применения рентгеноскопического контроля возможна при наличии механического сканирующего устройства, позволяющего быстро изменять схему контроля. Как правило, эти устройства специфичны; их особенности определены конструкцией и габаритами объектов контроля.

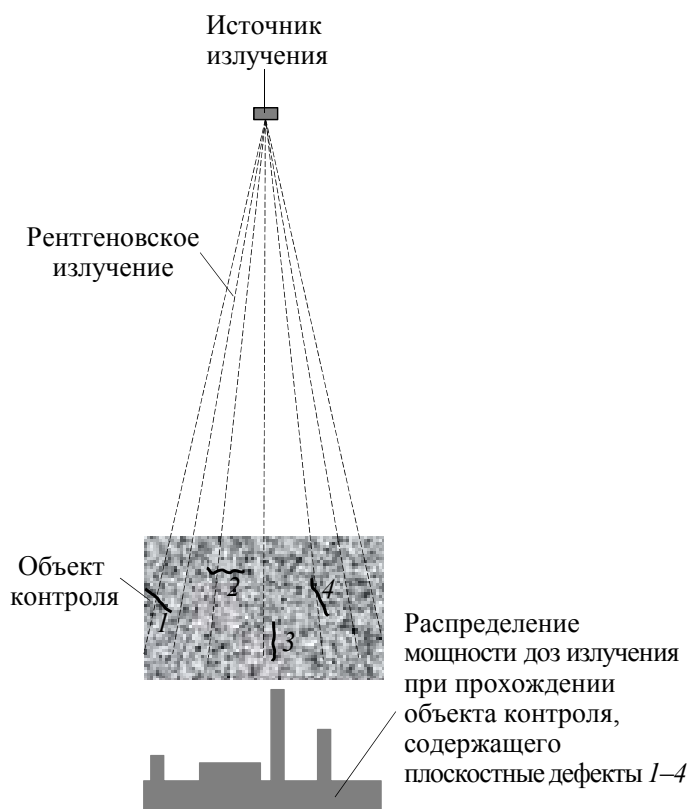


Схема формирования полезной информации о наличии «плоскостных» дефектов при рентгеновском контроле

Таким образом, проведен анализ методов неразрушающего контроля, пригодных для оценки качества деталей из ПКМ и многослойных клееных конструкций, составлен перечень акустических методов НК с указанием области их применения, а также указана область применения рентгеноскопического контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль: Справочник в 8 т. /Под общ. ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение. 2006. 864 с.
2. Ланге Ю.В. Низкочастотные акустические методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций //Контроль. Диагностика. 2004. №2. С. 39–41.
3. Мурашов В.В. Контроль монолитных и клееных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическим импедансным методом //Авиационная промышленность. 2009. №3. С. 43–48.
4. Nondestructive Testing Handbook. 2-nd ed. V. 7: Ultrasonic Testing //American Society for Nondestructive Testing. 1991. 893 p.
5. 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 (107). С. 31–36, 41–42.
6. 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.
7. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Диагностика состава и свойств полимерных композитов в деталях и конструкциях //Контроль. Диагностика. 2008. №8. С. 13–17.
8. Мурашов В.В. Определение физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов акустическими методами //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 465–475.
9. 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.
10. Степанов А.В., Косарина Е.И., Саввина Н.А. Радиографические технические пленки РТ-К и РТ-7. Результаты их испытаний //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 37–42.
11. Неразрушающий контроль. Качество изображений при радиографии. Часть 1: Индикаторы качества изображения проволочного типа //Стандарт Российского науч.-технич. сварочного общества. М. 6 с.
12. Степанов А.В., Косарина Е.И., Саввина Н.А., Усачев В.Е. Макро- и микропористость в сплавах на основе алюминия и никеля, обнаружение ее рентгеноскопическими методами неразрушающего контроля //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 423–430.

REFERENS LIST

1. Nerazrushajushhij kontrol' [Nondestructive control]: Spravochnik v 8 t. /Pod obshh. red. V.V. Kljueva. 2-e izd., ispr. T. 3. Ul'trazvukovoj kontrol'. M.: Mashinostroenie. 2006. 864 s.
2. Lange Ju.V. Nizkochastotnye akusticheskie metody i sredstva nerazrushajushhego kontrolja mnogoslojnyh konstrukcij [Low-frequency acoustic methods and means of nondestructive control of multilayered designs] //Kontrol'. Diagnostika. 2004. №2. S. 39–41.
3. Murashov V.V. Kontrol' monolitnyh i kleenyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov akusticheskim impedansnym metodom [Control of monolithic and glued designs from polymeric composite materials an acoustic impedance method] //Aviacionnaja promyshlennost'. 2009. №3. S. 43–48.
4. Nondestructive Testing Handbook. 2-nd ed. V. 7: Ultrasonic Testing //American Society for Nondestructive Testing. 1991. 893 p.
5. 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 multilayered designs from polymeric composite materials and methods of their identification. Part 2. Methods of detection of defects of monolithic details and multilayered designs from polymeric composite materials] //Kontrol'. Diagnostika. 2007. №5 (107). S. 31–36, 41–42.
6. Murashov V.V., Rumjancev A.F., Ivanova G.A., Fajzrahmanov N.G. Diagnostika struktury, sostava i svojstv polimernyh kompozicionnyh materialov [Diagnostics of structure, composition and properties of polymeric composite materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2008. №1. S. 17–24.
7. Murashov V.V., Rumjancev A.F. Diagnostika sostava i svojstv polimernyh kompozitov v detaljah i konstrukcijah [Diagnostics of ingredients and properties of polymeric composites in details and designs] //Kontrol'. Diagnostika. 2008. №8. S. 13–17.
8. Murashov V.V. Opredelenie fiziko-mehaničeskikh harakteristik i sostava polimernyh kompozicionnyh materialov akustičeskimi metodami [Definition of physicomechanical characteristics and structure of polymeric composite materials acoustic methods] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 465–475.
9. Generalov A.S., Murashov V.V., Dalin M.A., Bojchuk A.S. Diagnostika polimernyh kompozitov ul'trazvukovym reverberacionno-skvoznym metodom [Diagnostics of polymeric composites by an ultrasonic reverberation and through method] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 42–47.
10. Stepanov A.V., Kosarina E.I., Savvina N.A. Radiograficheskie tehničeskie plenki RT-K i RT-7. Rezul'taty ih ispytanij [Radio graphic technical films RT-K and RT-7. Results of their tests] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 37–42.
11. Nerazrushajushhij kontrol'. Kachestvo izobrazhenij pri radiografii. Chast' 1: Indikatory kachestva izobrazhenija provolochnogo tipa [Nondestructive control. Quality of images at a radiographic analysis. Part 1: Indicators of quality of the image of wire type] //Standart Rossijskogo nauch.-tehnič. svarožnogo obshhestva. M. 6 s.
12. Stepanov A.V., Kosarina E.I., Savvina N.A., Usachev V.E. Makro- i mikroporistost' v splavah na osnove aljuminija i nikelja, obnaruzhenie ee rentgenoskopičeskimi metodami nerazrushajushhego kontrolja [Makro- and microporosity in alloys on the basis of aluminum and nickel, detection by its fluoroscopic methods of nondestructive control] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 423–430.