

М.А. Далин¹, А.С. Генералов¹, А.С. Бойчук¹, Д.С. Ложкова¹

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Изложены результаты работы в области ультразвукового неразрушающего контроля штамповок дисков турбин ГТД, а также элементов конструкций, изготовленных из полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: *ультразвуковой неразрушающий контроль, ультразвуковые фазированные решетки, чувствительность, эхо-импульсный метод, фазовый велосиметрический метод, реверберационно-сквозной метод, вероятность обнаружения дефектов.*

М.А. Dalin¹, А.С. Generalov¹, А.С. Boychuk¹, D.S. Lozhkova¹

BASIC DEVELOPMENT TENDENCIES OF ACOUSTIC NON-DESTRUCTIVE CONTROL METHODS

The research work results in the field of the ultrasonic non-destructive control of GTE turbine disks die forgings as well as structural elements made of polymer composites are given in the present paper.

Keywords: *ultrasonic non-destructive control, ultrasonic phase lattices, sensibility, echo-pulse method, reverberation pass-through method, fault revealing probability.*

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

Повышающиеся требования к ресурсным характеристикам ответственных деталей авиационной техники, а также появляющиеся новые приборы и средства неразрушающего контроля (НК) вызывают необходимость непрерывного совершенствования существующих и разработки новых методик акустического контроля. Лабораторией НК в тесном сотрудничестве с лабораториями-разработчиками материалов за последние годы был выполнен ряд работ по разработке и внедрению новых методик и средств контроля заготовок деталей двигателя, а также деталей планера самолета, изготовленных из полимерных композиционных материалов (ПКМ).

Благодаря разработке новых способов литья и термомеханической обработки деформируемых жаропрочных сплавов, обеспечивающих регламентированную равномерную кристаллическую структуру, появилась возможность повысить чувствительность ультразвукового контроля (УЗК) штамповок дисков турбин ГТД из этих материалов. В результате выполнения работ по разработке технологии УЗК с повышенной чувствительностью заготовок дисков из жаропрочных никелевых сплавов с регламентированной структурой, полученных из слитков ВГНК, была выпущена методика по УЗК заготовок дисков из деформируемых жаропрочных никелевых сплавов типа ВЖ175, характеризующаяся чувствительностью, соответствующей выявлению контрольного отражателя $\varnothing 0,8$ мм, что существенно лучше применявшейся на тот момент чувствительности (рис. 1). Такой контроль проводится в настоящее время на ОАО «Ступинский металлургический комбинат» для заготовок дисков из сплава ВЖ175У.

Проведенная научно-исследовательская работа по разработке технологии НК деталей и агрегатов сложной формы из композиционных материалов положила начало ряду разработок в области эхо-импульсного ультразвукового контроля ПКМ [1]. Ре-

результатом данной НИР был выпуск методики УЗК вафельных и ребристых панелей из углепластика КМУ-7э. В процессе внедрения указанная методика была существенно доработана и в настоящее время успешно внедрена на четырех предприятиях для контроля агрегатов новых военных и гражданских самолетов.



Рис. 1. Ультразвуковой контроль заготовок дисков из деформируемых жаропрочных никелевых сплавов типа ВЖ175 с помощью автоматизированной установки



Рис. 2. Ультразвуковой контроль углепластиковой панели, подкрепленной ребрами, низкочастотным акустическим велосимметрическим методом

Широкое применение ПКМ в силовых конструкциях перспективного ближне-среднемагистрального самолета МС-21 вызвало необходимость разработки соответствующих методик НК. Основным несущим элементом конструкции крыла и оперения МС-21 стали панели, подкрепленные стрингерами (ребрами). Задача их НК была решена: разработанная технология эхо-импульсного УЗК ребристых панелей из ПКМ позволяет при производстве выявлять внутренние дефекты размером 10 мм, что вполне соответствует требованиям конструкторов – такое расслоение (по расчетам) не снижает надежность конструкции и не будет увеличиваться в размере в течение всего срока эксплуатации МС-21. В дальнейшем была решена задача поиска расслоений в ребрах, непрочнее в соединениях углепластиковых деталей, некоторых других элементов конструкции, расположенных в труднодоступных местах самолета МС-21. Для этой цели был предложен низкочастотный акустический велосимметрический метод [1], который хорошо зарекомендовал себя при выявлении расслоений во внутренних стенках агрегата с очень низкой контроледоступностью (рис. 2). Одновременно было разработано, опробовано и запатентовано оригинальное устройство для НК подобных элементов конструкций. Совсем недавно начались исследования, направленные на разработку технологии НК деталей из ПКМ с сотовым наполнителем низкочастотным методом при минимальном количестве настроечных образцов. В рамках данных исследований предполагается решить задачу снижения количества и стоимости стандартных образцов для настройки при контроле сотовых конструкций.

Дальнейшее развитие эхо-импульсного метода контроля ПКМ – использование для контроля ультразвуковых фазированных решеток (ФР) [2]. Это недорогое оборудование позволяет существенно повысить достоверность и чувствительность ручного контроля крупногабаритных панелей при достижении высокой производительности (до 60 м²/ч) без использования автоматизированных установок, что позволяет проводить контроль в условиях эксплуатации. Применение ФР является одной из ключевых тенденций развития УЗК, поэтому лаборатория была оснащена самым современным оборудованием – дефектоскопом с фазированными решетками.

После проведения научно-технических исследований по контролю интегральных конструкции из ПКМ, в том числе создания специализированных оснасток, позволяющих контролировать панели с криволинейной поверхностью как выпуклой, так и вогнутой, была разработана методика и составлена технологическая рекомендация по УЗК конструкций из углепластика с использованием ФР. В технологической рекомендации описывается процедура проведения ручного УЗК крупногабаритных элементов конструкций из углепластика на основе расплавных, в том числе клеевых, препрегов с использованием линейных и секторных ФР. С использованием разработанной технологии можно проводить НК таких конструкций из углепластика, как монолитные панели (детали с плоскопараллельными поверхностями) и панели с выпуклой поверхностью с радиусом кривизны не менее 250 мм, элементы жесткости (стрингеры, ребра), монолитные зоны трехслойных сотовых панелей. Толщины контролируемых изделий – от 2 до 35 мм. Чувствительность контроля благодаря применению данной технологии эквивалентна выявлению контрольного отражателя $\varnothing 5$ мм, а производительность контроля достигает 40 м²/ч. Результаты контроля по данной методике сохраняются в виде С-скана, что позволяет в дальнейшем анализировать полученные результаты контроля на компьютере с использованием специального программного обеспечения. На рис. 3 представлен результат контроля образца с искусственными дефектами в виде плоскодонных отражателей разных размеров, расположенных на разных глубинах.

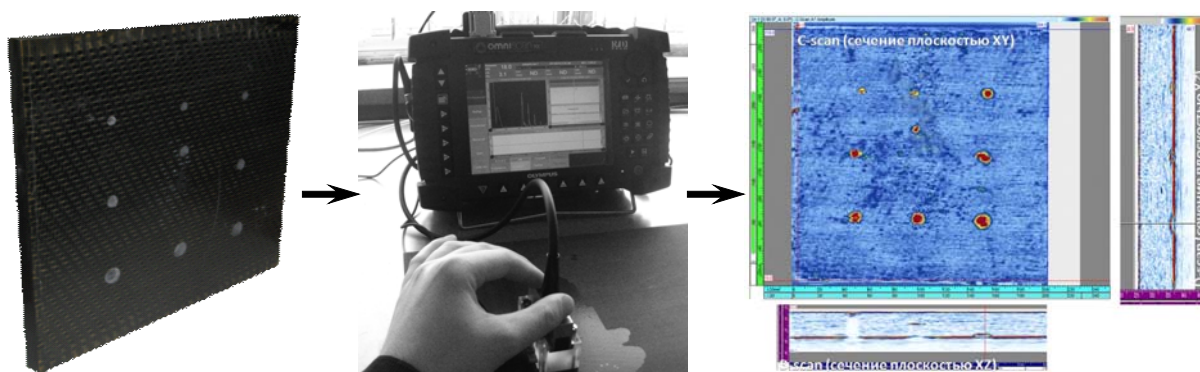


Рис. 3. Результат контроля образца с искусственными дефектами в виде плоскодонных отражателей разных размеров, расположенных на разных глубинах

Применение ФР позволило проводить 100%-ный контроль (рис. 4) Т-образных зон панелей из ПКМ с подкрепленными стрингерами (ребрами) с высокой степенью достоверности результатов, что ранее при контроле традиционными методами было невозможно или неэффективно.

Выполнены также три научно-исследовательские работы, посвященные применению ФР при контроле полуфабрикатов и деталей из ПКМ и металлических материалов при их производстве и эксплуатации с использованием ультразвукового дефектоскопа-томографа A1550 IntroVisor отечественного производителя. Благодаря этим работам оборудование было хорошо адаптировано для контроля металлических полуфабрикатов, таких как поковки и штамповки, а также сварные соединения, и для контроля интегральных конструкций из ПКМ. Контроль с помощью этого оборудования прово-

дился с использованием *B*-скана в реальном времени, что позволяло легко интерпретировать результаты контроля, отображаемые на экране дефектоскопа (рис. 5).

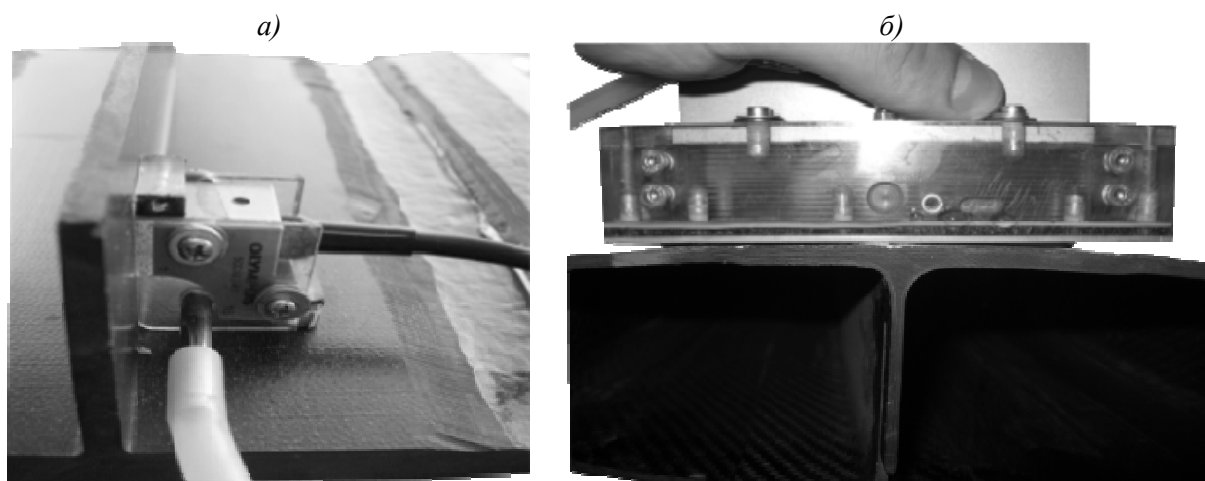


Рис. 4. Контроль Т-образных зон панелей из ПКМ с подкрепленными стрингерами (ребрами):
a – при использовании секторной фазированной решетки (ФР) и специально изготовленных оправок;
б – при использовании линейной ФР и специального приспособления для создания акустического контакта

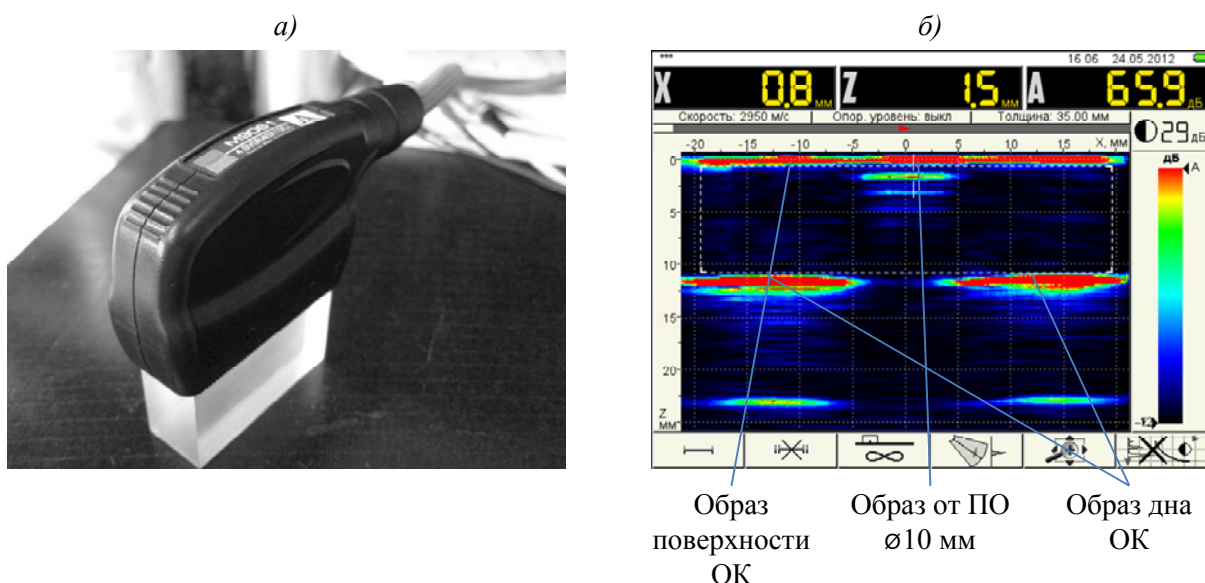


Рис. 5. Контроль с использованием *B*-скана в реальном времени:
a – фазированная решетка на образце из углепластика с искусственным дефектом в виде плоскодонного отражателя $\varnothing 10$ мм;
б – отображение результата контроля в виде *B*-скана

В ВИАМ развивается направление научных исследований, связанное с технической диагностикой состояния ПКМ, с применением средств акустического НК [3]. Результатом этих работ явилась разработанная технология диагностики состояния материала, позволяющая определять степень накопления микро- и макроповреждений в элементах конструкций из композиционных материалов толщиной до 10 мм реверберационно-сквозным (РСкв) методом. РСкв-метод контроля – достаточно новый метод, использующий компьютерную обработку сигналов. Благодаря многократному прохождению ультразвуковых импульсов через объект контроля (ОК), возможно обнаружение не выявляемых традиционными методами мелких множественных дефектов, влияющих на эксплуатационные свойства ОК, – пористости, микротрещин, начальных стадий

усталостных разрушений (рис. 6), а также оценка прочности изделий из ПКМ и клеевых соединений. Работа, проводимая в настоящее время, направлена главным образом на разработку технологии оценки степени изменения прочностных свойств ПКМ РСкв-методом [4] путем построения корреляционных связей критерия SWF и прочностных характеристик материала (рис. 7). Записав сигнал, прошедший через объект контроля (ОК), обработав его и вычислив значение критерия SWF, по заранее построенным корреляционным связям для данного ОК (материала, толщины, схемы выкладки и т. д.) можно определить соответствующее ему значение прочностной характеристики. Данные технологии позволят решить ряд задач, связанных с экспресс-оценкой поврежденного состояния планера в эксплуатации, а также определения прочности элементов конструкций из ПКМ при их производстве и эксплуатации без их разрушения.

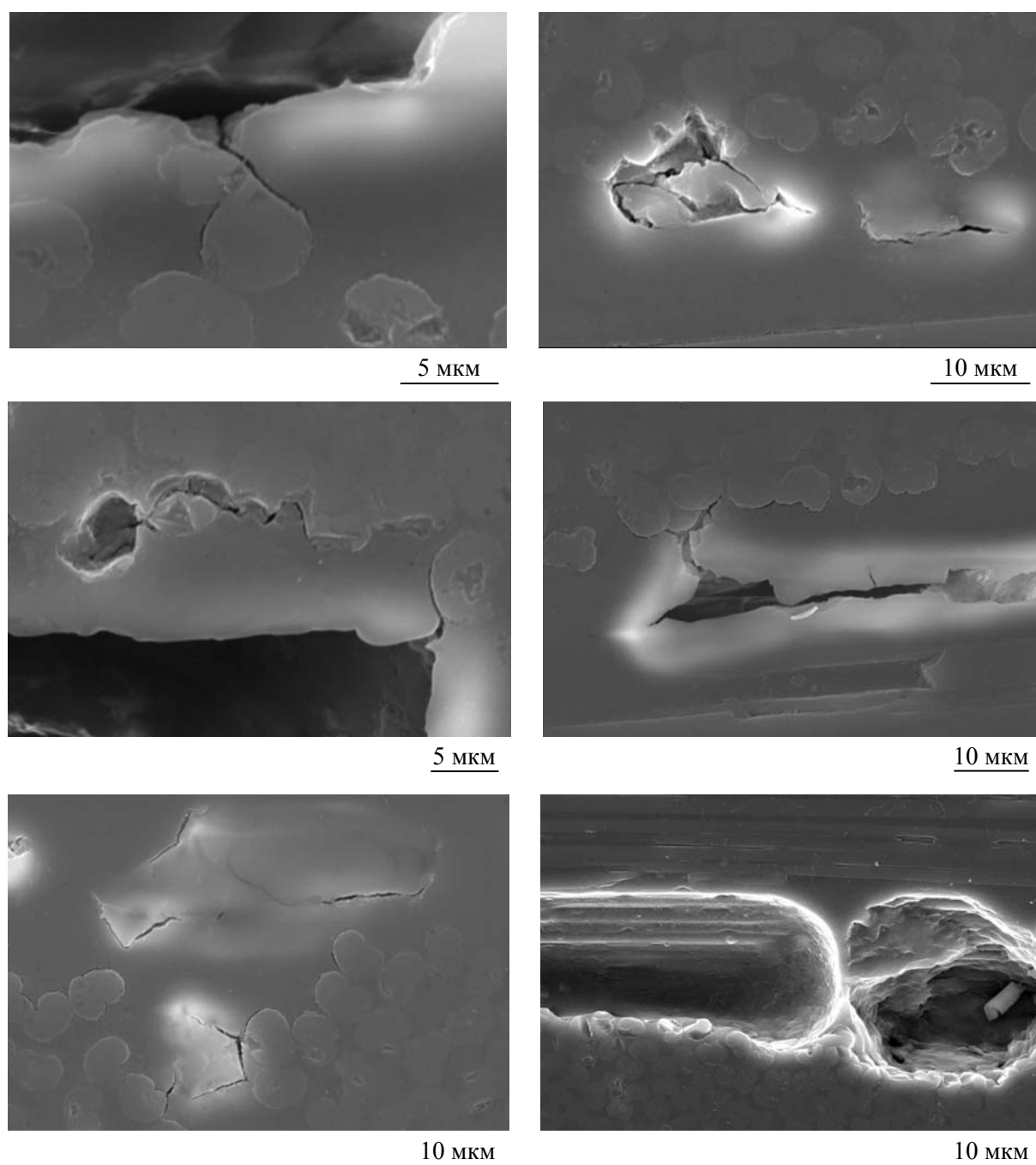


Рис. 6. Микроструктура различных частей образца из углепластика ВКУ-17КЭ0,1, содержащего микро- и макродефекты для исследований реверберационно-сквозным методом

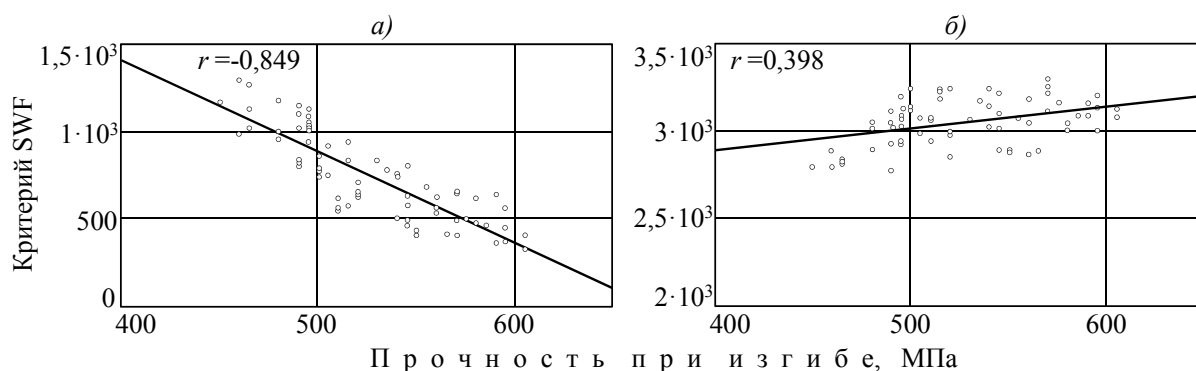


Рис. 7. Корреляционная связь между прочностью при изгибе углепластика ВКУ-17КЭ0,1 толщиной 10 мм и критерием SWF, вычисленным с помощью способов: «интеграл оптимального спектра» (а) и «взвешенный счет» (б)

Другой работой, относящейся к диагностике физико-механических свойств, является разработка методик и средств измерения модуля упругости тугоплавких волокон по скорости распространения ультразвуковой волны. Разработанные способы и аппаратура для измерения модуля используются при отработке технологии получения и выпуске опытных партий волокон оксида алюминия.

В лаборатории ведутся также исследования в области вероятностной оценки достоверности результатов НК. Численная оценка вероятности обнаружения дефектов того или иного размера необходима конструкторам изделий для внедрения новых методов расчета ресурса, рекомендуемых в настоящее время зарубежными нормативными документами и планируемыми к широкому внедрению в России. Для решения этой задачи были разработаны требования к образцам с искусственными дефектами, предназначенным для вероятностной характеристики методик контроля основных деталей двигателя, изготовлены и переданы заказчику несколько паспортизованных комплектов таких образцов, а также материалов для получения искусственных газонасыщенных включений в титановых дисках. В дальнейшем работа была продолжена в направлении оценки влияния различных факторов на вероятность обнаружения дефектов при НК заготовок и готовых деталей газотурбинных двигателей. На основе анализа зарубежной НТД, выявлены факторы, которые влияют на вероятность обнаружения дефектов в различных методах НК; в двух действующих на заводах РФ методиках контроля дисков из жаропрочных никелевых и титановых сплавов выявлены подобные факторы, приведены рекомендации по способам оценки их влияния или по исключению такого влияния. Опробованы и проверены алгоритмы, реализованные в зарубежном программном обеспечении для обработки результатов экспериментов и построении зависимостей вероятности обнаружения дефектов от их размеров. В настоящее время проводится работа, направленная на создание методики вероятностной оценки достоверности результатов неразрушающего контроля элементов конструкций из ПКМ. Разрабатываемая методика должна стать единой для всех предприятий отрасли и будет востребована при реализации новых методов расчета прочностной надежности новых воздушных судов, а также при получении данных, необходимых для расчета периодичности проведения неразрушающего контроля при техническом обслуживании изделий авиационной техники. С помощью данной методики возможно будет проводить аттестацию различных методик по неразрушающему контролю и характеризовать их своей зависимостью вероятности обнаружения дефекта от его размера.

Кроме этого, сектор акустических методов контроля постоянно оказывает научно-техническую помощь таким предприятиям отрасли, как ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», ОАО «НПП „Салют“», ОАО «ММП им. В.В. Чернышева», ОКБ «Сухого», ЗАО «ГСС», ФГУП «ОНПП „Технология“», ОАО «КНААПО», ЗАО «Аэрокомпозит»,

ОАО «Московский вертолетный завод им. М.Л. Миля» и многим другим, проводя НК ответственных деталей и агрегатов, изыскивая способы выявления дефектов, рекомендуя аппаратуру и методы для их реализации. Большое внимание уделяется метрологическому обеспечению УЗК. Организован выходной УЗК заготовок дисков из титановых и никелевых жаропрочных сплавов, выпускаемых на имеющихся в ВИАМ производственных мощностях. Лаборатория в составе Испытательного центра ВИАМ аккредитована Авиарегистром МАК на проведение сертификационных испытаний и с 2007 года неоднократно подтверждала этот статус. Специалисты лаборатории аттестованы в соответствии с международным ISO 9712: 2005 и европейским EN 473 стандартами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль: Справочник в 7 т. /Под общ. ред. В.В. Ключева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение. 2004. С. 130, 275.
2. Introduction to phased array ultrasonic technology applications: R/D Tech guideline. Advanced practical NDT Series. 2004 by R/D Tech Corp.
3. Non-destructive testing of fiber-reinforced plastics composites. Summerscales John., Elsevier Science Publishers LTD 1990. V. 2. P. 1–47.
4. 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.

REFERENS LIST

1. Nerazrushajushhij kontrol' [Nondestructive control]: Spravochnik v 7 t. /Pod obshh. red. V.V. Kljueva. T. 3. Ul'trazvukovoj kontrol'. M.: Mashinostroenie. 2004. S. 130, 275.
2. Introduction to phased array ultrasonic technology applications: R/D Tech guideline. Advanced practical NDT Series. 2004 by R/D Tech Corp.
3. Non-destructive testing of fiber-reinforced plastics composites. Summerscales John., Elsevier Science Publishers LTD 1990. V. 2. R. 1–47.
4. Generalov A.S., Murashov V.V., Dalin M.A., Bojchuk A.S. Diagnostika polimer-nyh 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.