

УДК 620.179.16

А.В. Славин¹, М.А. Далин¹, И.А. Диков¹, А.С. Бойчук¹, В.Ю. Чертищев¹

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В АВИАЦИОННОЙ ОТРАСЛИ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-96-106

Рассмотрены основные тенденции развития акустических методов неразрушающего контроля в авиационной отрасли: автоматизация и повышение чувствительности контроля, разработка технологий контроля изделий при ремонте и эксплуатации, вероятностная оценка результатов ультразвукового контроля (УЗК), математическое моделирование процессов УЗК, развитие УЗК с применением современных технологий, развитие низкочастотных акустических методов контроля, развитие системы подготовки специалистов по УЗК. В качестве примера реализации основных тенденций развития УЗК приведен опыт НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль, акустический контроль, автоматизированный ультразвуковой контроль, вероятность обнаружения дефектов, математическое моделирование ультразвукового контроля.

A.V. Slavin¹, M.A. Dalin¹, I.A. Dikov¹, A.S. Boychuk¹, V.Yu. Chertishchev¹

CURRENT TRENDS IN DEVELOPMENT OF ACOUSTIC NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS IN AVIATION INDUSTRY (review)

The document includes the below main trends in development of acoustic non-destructive testing methods in aviation industry: automation and enhancement of the sensitivity the testing, development of Procedures for acoustic non-destructive testing methods for products in case of repair and use of products, probabilistic assessment of the outcomes of the ultrasonic non-destructive testing, mathematic simulation of the ultrasonic non-destructive testing, development of the ultrasonic non-destructive testing by applying state-of-the-art technologies, development of the low-frequency acoustic testing methods, development of a Procedure on training of specialists who conduct NDT. The experience of NRC «Kurchatov institute» – VIAM is pointed out to show an example on the implementation of main trends on ultrasonic testing development.

Keywords: nondestructive testing, ultrasonic testing, acoustic testing, automated ultrasonic testing, probability of defects detection, mathematic simulation of ultrasonic testing.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В процессе производства, ремонта и эксплуатации авиационной техники для обеспечения требований к качеству и безопасности воздушных судов необходимым условием является проведение неразрушающего контроля (НК) деталей и узлов на всех жизненных циклах изделия [1]. При этом основными тенденциями развития акустических методов НК в авиационной отрасли и, соответственно, в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (далее – ВИАМ) являются следующие:

– автоматизация и повышение чувствительности акустических методов НК деталей и изделий из металлических и полимерных композиционных материалов (ПКМ);

- разработка технологий для акустических методов НК деталей и узлов в условиях ремонта и эксплуатации изделий;
- вероятностная оценка достоверности результатов ультразвукового НК;
- математическое моделирование физических процессов ультразвукового НК;
- развитие ультразвуковых методов НК с применением современных технологий, в том числе фазированных решеток;
- развитие технологий применения низкочастотных акустических методов для контроля композиционных материалов;
- развитие системы подготовки и сертификации специалистов по НК авиационной техники.

Работы, описанные в настоящей статье, выполнены 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») [2].

Тенденции развития акустических методов контроля в авиационной отрасли

В настоящее время большинство металлургических и моторостроительных предприятий оснастило участки ультразвукового контроля (УЗК) автоматизированными иммерсионными установками и перешло на новые технологии контроля металлической продукции, в том числе разработанные в ВИАМ. В то же время основной объем выпускаемой продукции из ПКМ на авиационных предприятиях контролируется вручную. Как известно, ручной контроль характеризуется высокой трудоемкостью, низкой надежностью и малой достоверностью результатов вследствие влияния человеческого фактора [3]. На зарубежных авиационных предприятиях, таких как Boeing, Airbus и Bombardier, достаточно давно применяют автоматизированный УЗК изделий из металлов и ПКМ. Поэтому важной задачей для реализации современных норм качества материалов и изделий является перевод предприятий на автоматизированный УЗК с последующим повышением чувствительности акустических методов НК.

Повышение чувствительности контроля особенно важно для деталей газотурбинных двигателей (ГТД), так как под влиянием циклических нагрузок дефекты металлургического происхождения в изделии могут вызвать рост усталостных трещин с последующим разрушением [3]. Данные обстоятельства являются основными причинами, ограничивающими ресурс основных деталей двигателя. Согласно методическим материалам РЦ АП-33.70-1 [4], современный подход к расчету безопасного ресурса ГТД основан на концепции допустимых повреждений и предусматривает применение количественной информации о дефектности материала: зависимость ожидаемого количества дефектов в единице массы материала от их размера и/или вероятности их обнаружения при УЗК при производстве и эксплуатации деталей ГТД. Поэтому необходимо проанализировать возможность разрушения детали в пределах одобренного ресурса из-за дефектов в материале или дефектов, внесенных при изготовлении и полученных при эксплуатации. Таким образом, расчетным путем вероятности разрушения детали при эксплуатации, в том числе и из-за внутренних дефектов, не выявленных при НК, подтверждается ресурс ГТД. Для применения вероятностных подходов расчета необходима количественная информация о наличии металлургических дефектов в материале заготовок дисков ГТД [5].

Проведение оценки вероятности обнаружения дефектов позволяет предприятию-изготовителю сравнить и объективно выбрать наиболее эффективные методику и оборудование для НК. В настоящее время оценка вероятности обнаружения дефектов необходима в первую очередь разработчикам и конструкторам изделий для расчета безопасного ресурса, рекомендуемого международными нормативными документами.

Однако для расчета вероятности обнаружения требуется большое количество экспериментальных данных, полученных на образцах с натурными дефектами, что является очень трудоемкой и не всегда реализуемой задачей. Поэтому существует альтернативный подход, заключающийся в проведении моделирования процессов УЗК и исследовании взаимодействия ультразвуковых волн с дефектами различных ориентации и размера, заложенными в объект контроля. Результатом такого моделирования является набор данных, содержащий размер, тип и ориентацию отражателей, а также величину амплитудного отклика ультразвуковых колебаний от них, который в последующем используют для оценки вероятности обнаружения дефектов. Таким образом, моделирование имеет важное значение на этапах проектирования изделия (подбор оборудования для проведения контроля, выбор схем и параметров сканирования и т. п.), во время его производства и эксплуатации (разработка методик, оптимизация параметров контроля, проведение оценки вероятности обнаружения дефектов по разработанным методикам контроля) и при последующем изготовлении типовых изделий (проведение контроля изделий с аналогичными конструктивными особенностями) [6].

Крайне важной задачей является разработка технологий ремонта при производстве и эксплуатации деталей и узлов авиационной техники, выбор способов ремонта различных видов дефектов, в особенности в конструкциях из ПКМ. Наиболее распространенным является ремонт монолитных и трехслойных сотовых конструкций со сквозными пробоинами размером от 10 до 100 мм при наличии возможности одно- и двухстороннего доступа к зоне ремонта [7]. Для решения задач по ремонту конструкций из ПКМ особенно важно проведение НК с целью установления точных границ повреждений как по площади на поверхности изделий, так и по глубине. Поэтому в настоящее время специалистами ВИАМ активно ведутся исследования по разработке таких методик контроля и соответствующего оборудования.

Появление новых перспективных материалов [8, 9] и конструкций, применяемых в авиационной промышленности, способствует постоянному совершенствованию существующих и разработке новых методик контроля с учетом акустических свойств материалов и конструктивных особенностей изделий. Например, мотогонодола перспективного авиационного двигателя ПД-14 состоит из 3-, 5- и 7-слойных сотовых конструкций из ПКМ и требует применения импедансного метода контроля со сложным алгоритмом определения глубины залегания дефектов, разработанного в ВИАМ [7].

По мере внедрения в серийные изделия композиционных материалов растет потребность в проведении их качественного НК. В связи с этим активно развиваются традиционные низкочастотные акустические методы контроля, а также ультразвуковые методы с использованием современных технологий, таких как оборудование на фазированных решетках. Низкочастотные акустические методы находят применение на тех деталях и конструкциях, где традиционный высокочастотный эхо-импульсный контроль невозможно применить ввиду большого затухания ультразвуковых волн, а также наличия в конструкциях разнородных по акустическим свойствам материалов [10]. Ультразвуковой контроль фазированными решетками активно развивается в настоящее время в связи с тем, что процесс УЗК при их использовании выведен на качественно новый уровень: при применении современных технологий резко выросла производительность как автоматизированного, так и ручного контроля, повысились его достоверность и наглядность.

Кроме повышения потребности в новых методиках и схемах контроля, растет и спрос на высококвалифицированных специалистов в области НК, поэтому крайне важной задачей является развитие системы подготовки и сертификации специалистов по НК авиационной техники.

Опыт НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Указанными тенденциями развития акустических методов контроля активно занимается ВИАМ. Авиационная и другие отрасли промышленности стоят на пороге шестого технологического уклада [11, 12], поэтому спрос на цифровизацию процесса НК растет. В частности, появляется потребность в широкой автоматизации процесса УЗК, в работе с CAD-моделями поступающих на контроль деталей (рис. 1) с целью наиболее полного прозвучивания их объема, в визуализации полученных результатов с возможностью наложения на модель детали для последующей разбраковки.

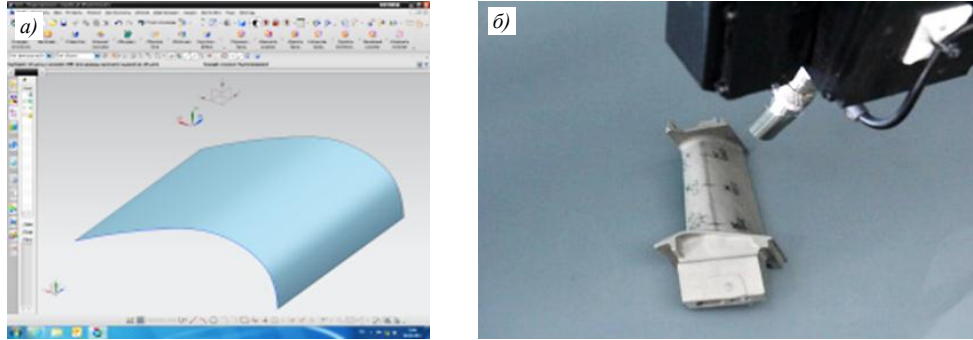


Рис. 1. Работа с CAD-моделями поступающих на контроль деталей в ВИАМ: *а* – загрузка CAD-модели, *б* – последующий контроль по CAD-модели

Автоматизация и повышение чувствительности при ультразвуковом контроле металлов

Как отмечено ранее, для повышения ресурса деталей ГТД особенно важно проводить работы по повышению чувствительности контроля. В 2020 г. в ВИАМ разработана методика автоматизированного иммерсионного УЗК крупногабаритных сложнопрофильных заготовок дисков двигателя ПД-35 из жаропрочного гранульного сплава ВЖ178П с чувствительностью 0,4 мм. Разработанная методика позволит добиться увеличения ресурса авиационного двигателя с учетом концепции допустимых повреждений. При выполнении указанных работ для обеспечения возможности контроля 100 % чистового контура детали в заготовке с высокой чувствительностью разрабатываемая научно-техническая документация предусматривает применение передовых приемов, ранее практически не используемых в отечественной практике (рис. 2).

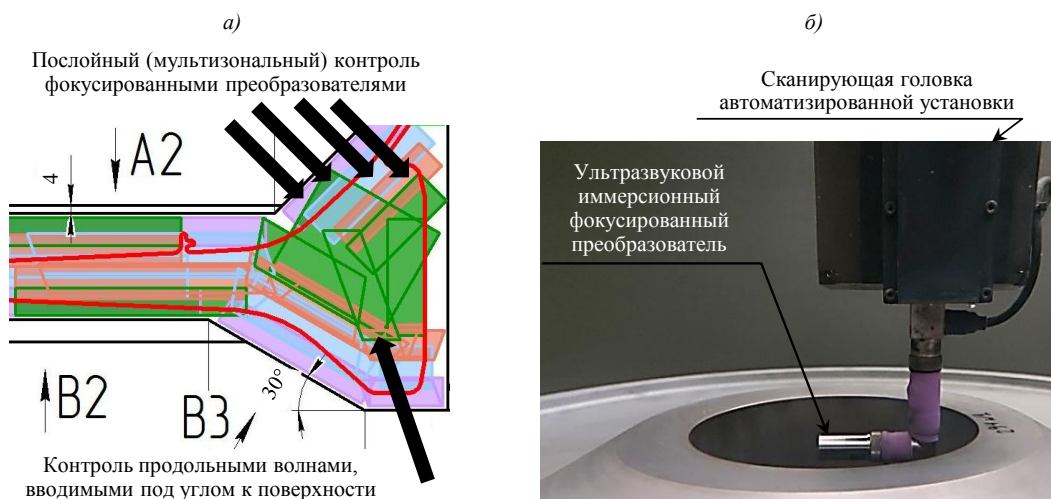


Рис. 2. Автоматизированный иммерсионный ультразвуковой контроль заготовок дисков ГТД: *а* – фрагмент схемы прозвучивания заготовки диска в сечении (красная линия – чистовой контур детали); *б* – ввод ультразвуковых колебаний со стороны центрального отверстия заготовки диска

В настоящее время в ВИАМ совместно с металлургическими предприятиями завершаются работы по переводу УЗК заготовок основных и особо ответственных деталей двигателя ПД-14 из деформируемых никелевых жаропрочных сплавов и сталей на автоматизированный контроль с чувствительностью, соответствующей выявлению плоскостного отражателя диаметром 0,8 мм. Специалисты института выполняют основную часть таких работ совместно с заводскими дефектоскопистами на их территории и оборудовании, что облегчает внедрение разработанной научно-технической документации на УЗК. Всего за два года работы опробовано и проведено более 50 типов заготовок основных и особо ответственных деталей двигателя ПД-14 и, соответственно, разработано более 50 технологических карт контроля и другой научно-технической документации.

Автоматизация и повышение чувствительности при ультразвуковом контроле композиционных материалов в процессе производства, ремонта и эксплуатации

В рамках реализации современных норм качества ПКМ и изделий из них, а также для перевода предприятий на автоматизированный ультразвуковой контроль НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ совместно с ФГАУ «Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э. Баумана» и ЗАО «Ультракraft» создан полномасштабный макет автоматизированного комплекса для контроля качества деталей и агрегатов из ПКМ – «МАК-ПКМ» (рис. 3) [13].



Рис. 3. Макет автоматизированного комплекса для ультразвукового неразрушающего контроля качества деталей и агрегатов из ПКМ

Комплекс «МАК-ПКМ» позволяет:

- реализовать эхо-импульсный, теневой и зеркально-теневой методы автоматизированного УЗК;
- контролировать монолитные детали из углепластика и детали с сотовым наполнителем с обшивками из угле- и стеклопластика;
- контролировать детали толщиной до 24 мм для монолитных панелей из углепластика и до 80 мм – для сотовых панелей с обшивками из угле- и стеклопластика;
- представлять результаты в виде *A*-, *B*- и *C*-сканов (разрешение *C*-скана достигает 1×1 мм);
- программировать комплекс для контроля деталей сложной формы двумя способами: «обучением» по точкам и импортом 3D-модели детали из САD-программ.

Преимуществом комплекса является наличие роликовых катящихся преобразователей, которые позволяют проводить теневой контроль без использования контактной жидкости (сухой точечный контакт), что в свою очередь помогает осуществлять контроль сложных многослойных и монолитных деталей и конструкций из ПКМ, для которых недопустим контакт с водой или другими контактными жидкостями.

В практике материаловедческих организаций и разработчиков авиационной техники за рубежом УЗК подвергают не только композитные детали самолетов, но и образцы, предназначенные для механических испытаний при проведении общей и специальной квалификации новых ПКМ. Пористость или пропущенное расслоение даже небольшого размера, расположенное в рабочей части образца, может привести к «выпаду» в статистике результатов испытаний, что негативно скажется на результатах квалификации. Особенно чувствительны к расслоениям такие параметры материала, как прочность при сжатии и межслойном сдвиге. Зарубежные стандарты на методы испытаний ПКМ ссылаются на стандарт [14], который регламентирует обязательное проведение УЗК плит, предназначенных для изготовления испытательных образцов, с чувствительностью, обеспечивающей выявление дефекта в виде плоскодонного отверстия диаметром 3 мм, с построением С-скана (что подразумевает автоматизированный контроль или контроль с фазированными решетками). В Российской Федерации выпущены модифицированные версии ГОСТ, соответствующие стандартам ASTM, в которых указания по проведению УЗК образцов перед испытаниями исключены.

При разработке и проведении квалификационных испытаний новых материалов ВИАМ во внутренних стандартах предписывает и практикует обязательное проведение УЗК образцов. С этой целью в институте разработана технология контроля монолитных и сотовых образцов из ПКМ с повышенной чувствительностью, позволяющая проводить контроль образцов перед механическими и климатическими испытаниями с целью выявления более мелких дефектов, которые не выявляются при стандартном контроле и которые могут повлиять на результаты последующих испытаний. Данная технология зарекомендовала себя при паспортизации и спецквалификации материалов, поскольку при традиционных методах УЗК для монолитных образцов чувствительность эквивалентна выявлению отражателей диаметром 5, 10 мм и более. Однако в процессе спецквалификации на механические характеристики могут оказывать влияние и более мелкие дефекты. Поэтому по разработанной технологии достигнута чувствительность, эквивалентная диаметру отражателя, равному 2 мм и более. Для сотовых образцов чувствительность контроля по стандартным методикам эквивалентна выявлению отражателей диаметром 10 мм и более. По разработанной технологии чувствительность контроля эквивалентна выявлению диаметра отражателя, равного 6 мм и более, в зависимости от размера ячейки сот. Для реализации данной технологии используют серийную автоматизированную иммерсионную установку ScanMaster LS-500, которую дооснастили специализированным фокусированным преобразователем для контроля монолитных образцов. Для контроля многослойных сотовых образцов разработана специализированная оправка (рис. 4), обеспечивающая соосное расположение преобразователей с необходимым расстоянием между их торцами. Разработанная технология контроля совместно со специализированной оправкой реализует струйный контакт, что обеспечивает отсутствие пропусков сигнала в процессе сканирования, а также позволяет добиться высоких чувствительности и разрешения контроля благодаря использованию малого диаметра струи.

Одной из сложных, но крайне перспективных работ, проведенных для нужд АО «ОДК-Авиадвигатель», является разработка методики импедансного контроля многослойных сотовых конструкций с возможностью определения глубины залегания дефектов для выполнения последующего ремонта (рис. 5). Процедура контроля регламентирована

методикой ММ 1.2.165–2015 «Акустический контроль деталей из ПКМ мотогондолы двигателя» и внедрена на АО «ОДК-Авиадвигатель» при серийном производстве мотогондол авиационных газотурбинных перспективных двигателей ПД-14. Разработанная методика может быть применена в том числе и при контроле других типов конструкций на предприятиях авиационной и других отраслей промышленности, где изготавливают изделия, содержащие многослойные сотовые конструкции из ПКМ и других материалов [7, 15].



Рис. 4. Специализированная оправка для проведения теневого контроля со струйным контактом с быстрьюемным креплением

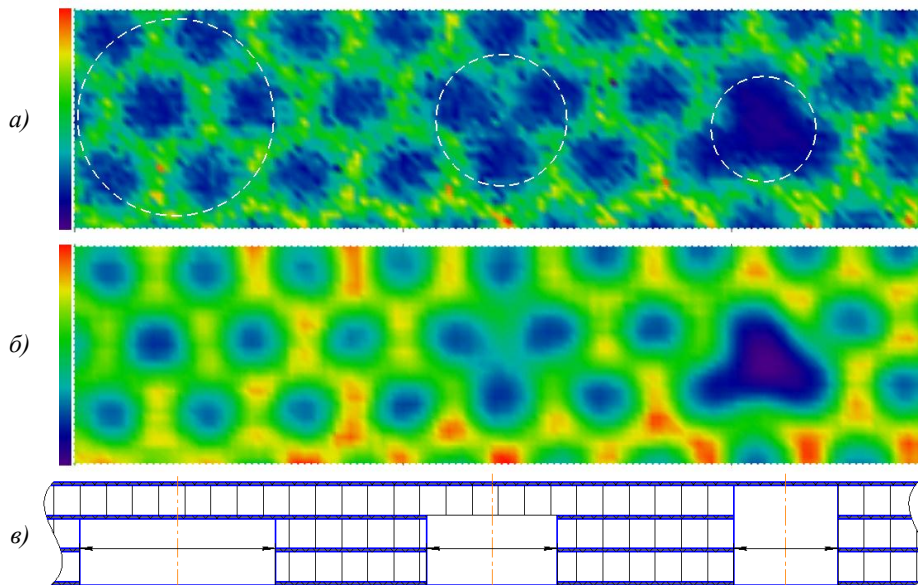


Рис. 5. С-сканы области с дефектами, расположенными на различных глубинах, при автоматизированном импедансном контроле многослойной сотовой конструкции (по реактивной составляющей (а) и по абсолютной величине механического импеданса (б)) и эскиз детали (в)

В ВИАМ активно используются и развиваются ультразвуковые методы с применением современных технологий. Разработана технология УЗК с использованием фазированных решеток для контроля конструкций из углепластика: монолитных панелей, в том числе с выпуклой поверхностью; элементов жесткости (стрингеров, ребер) и монолитных зон трехслойных сотовых панелей. Данная технология обеспечивает выявление наиболее опасных производственных и эксплуатационных дефектов ПКМ, а также

позволяет определять размеры и положение дефектов с высокой точностью. Производительность контроля возросла более чем в 10 раз по сравнению с использованием традиционных методов УЗК благодаря применению широкозахватного преобразователя, а также повысилась достоверность контроля. В настоящее время ведутся работы по контролю внешних и внутренних радиусных зон стрингеров и ребер жесткости различного конструктива в композитных конструкциях, который позволит максимально увеличить объем проконтролированного материала.

Математическое моделирование процессов ультразвукового контроля и вероятностная оценка достоверности контроля

Во всем мире для реализации целей оценки вероятности обнаружения дефектов, кроме крайне дорогостоящих натуральных экспериментов на специально изготовленных образцах, применяют математическое моделирование. Начиная с 2014 г. специалисты лаборатории неразрушающего контроля ВИАМ разработали ряд математических моделей и алгоритмов, позволяющих вычислять отклик системы НК для дефектов различных размеров и форм, для ультразвукового иммерсионного контроля [3, 16]. С 2020 г. лаборатория оснащена специализированным программным обеспечением CIVA, благодаря чему существенно расширились возможности по математическому моделированию УЗК. Проверена сходимость результатов моделирования и натуральных экспериментов, подтверждена пригодность данного программного обеспечения для реализации целей оценки вероятности обнаружения дефектов и разработаны методические материалы по проведению такой оценки.

Оценка вероятности обнаружения дефектов не единственное применение математического моделирования. Достаточно востребованными оказались работы, направленные на снижение количества необходимых настроечных (контрольных) образцов для УЗК. Большая часть нормативных документов на УЗК ограничивает возможность контроля объектов, отличных по кривизне поверхности от настроечных образцов. Согласно ГОСТ 21120–75 [17], контрольный образец изготавливают по сечению с отклонением не более 10 % от размеров контролируемой продукции. Аналогичные требования содержатся и в зарубежной документации на УЗК полуфабрикатов круглого сечения. В стандарте ASTM B594-09 [18] основным способом контроля полуфабрикатов с криволинейной поверхностью ввода является настройка на образце с плоской поверхностью и введение согласованных с потребителем корректировок, однако допускается, также по согласованию с потребителем, изготовление образцов с криволинейной поверхностью. В стандарте SAE AMS-STD-2154 [19] допускается настройка на плоский образец только для объектов контроля с радиусом кривизны >100 мм с введением приемлемой для потребителя корректировки, для меньших значений радиусов следует применять только контрольные образцы, равные по диаметру объекту контроля. Согласно стандарту SAE AMS2628 [20], разница между диаметрами настроечного образца и контролируемого биллета не должна превышать 12,7 мм. Изучение опыта зарубежных моторостроительных компаний показывает, что, как правило, при контроле криволинейных заготовок при настройке на плоском образце вводятся поправки в кривую временной регулировки чувствительности (ВРЧ), определенные для каждого типа преобразователя для дискретных значений глубины прозвучивания (без корректировки допускается использовать плоские образцы только для объектов с радиусом кривизны >200 мм). Указанные корректировки (или поправки в кривую ВРЧ) могут быть рассчитаны с применением программного обеспечения CIVA и включены в нормативную документацию на контроль.

На рис. 6 приведены примеры графического представления результатов расчета автоматизированного иммерсионного УЗК.

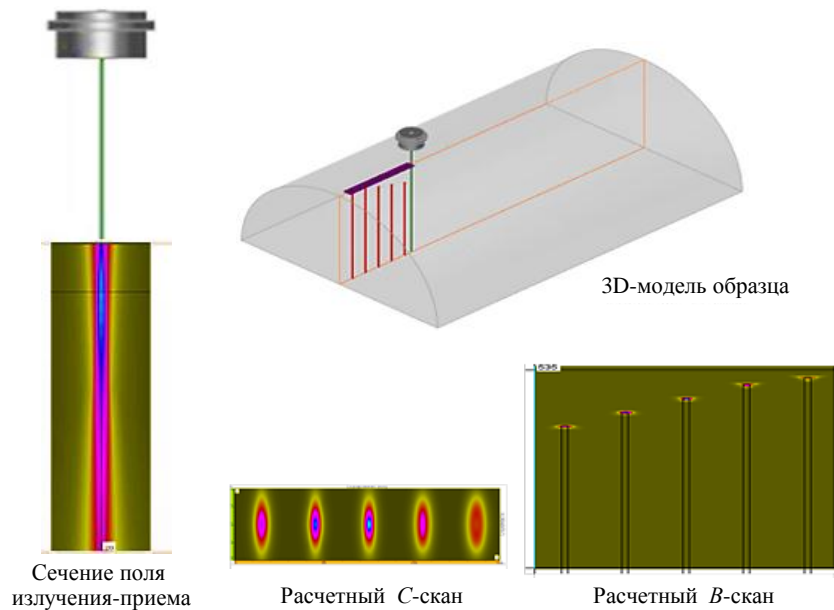


Рис. 6. Моделирование ультразвукового иммерсионного контроля

Как отмечено ранее, назначенный ресурс авиационных ГТД в значительной степени определяется надежностью их основных деталей. Диски компрессоров и турбин двигателя, а также корпус камеры сгорания, обладающие высокой энергией разрушения при работе ГТД, относят к основным деталям. Новые требования к подтверждению назначенного ресурса ГТД диктуют необходимость учитывать вероятность разрушения основных деталей двигателя из-за дефектов, пропущенных при НК. Данные требования ставят перед специалистами по НК две основные задачи:

- оценка вероятности обнаружения дефектов различных размеров при НК заготовок и готовых деталей в производстве и эксплуатации;
- оценка ожидаемого количества и размеров дефектов, оставшихся в материале готовой детали после всех операций НК.

Специалисты ВИАМ разработали ряд нормативных документов, позволяющих проводить соответствующие оценки. В настоящее время институт проводит в интересах предприятий АО «ОДК» исследования по оценке вероятности обнаружения дефектов при УЗК заготовок дисков и валов ГТД из титановых, жаропрочных никелевых сплавов и сталей, а также деталей при ремонте двигателя.

Образовательная деятельность в области ультразвукового контроля

Специалисты ВИАМ проводят обучение в рамках дополнительного профессионального образования в области УЗК на базе учебного центра института по следующим программам:

- неразрушающие методы контроля и их применение в авиационной промышленности;
- профессиональная переподготовка по профессии «дефектоскопист по магнитному и ультразвуковому контролю».

Слушатели получают удостоверение установленного образца о прохождении курсов повышения квалификации.

Заключения

В ВИАМ активно поддерживаются и развиваются современные направления УЗК в авиационной отрасли, такие как:

- разработка и внедрение технологий контроля металлических, неметаллических и композиционных материалов;
- проведение УЗК металлов и ПКМ, в том числе арбитражного, с выдачей соответствующего заключения;
- автоматизация процессов УЗК;
- оценка вероятности обнаружения дефектов;
- моделирование физических процессов УЗК, в том числе с использованием программного обеспечения CIVA;
- обучение специалистов.

Специалисты лаборатории неразрушающего контроля НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ постоянно оказывают научно-техническую помощь авиационным предприятиям – АО «ОДК-Авиадвигатель», ПАО «Компания «Сухой», АО «ОДК-Климов», ПАО «Туполев», ПАО «Корпорация «Иркут», АО «ГСС», АО «Аэрокомпозит», АО «Вертолеты России» и др.

Лаборатория в составе Испытательного центра НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ аккредитована Федеральным агентством воздушного транспорта (Росавиацией) и Российским морским регистром судоходства на проведение сертификационных испытаний. Специалисты лаборатории аттестованы в соответствии с требованиями отечественных и международных стандартов.

Библиографический список

1. Далин М.А., Генералов А.С., Бойчук А.С., Ложкова Д.С. Основные тенденции развития акустических методов НК // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 1. С. 64–69.
2. 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.
3. Ложкова Д.С. Оценка вероятности обнаружения дефектов при автоматизированном иммерсионном ультразвуковом контроле полуфабрикатов из титановых сплавов с использованием математического моделирования: дис. ... канд. техн. наук. М.: НИУ «МЭИ», 2018. 197 с.
4. РЦ АП-33.70-1. Методические материалы для реализации требований к основным деталям двигателя, ресурс которых устанавливается в циклах / Межгосударственный авиационный комитет. М.: Авиаиздат, 2012. 31 с.
5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Кудинов И.И., Головков А.Н., Генералов А.С., Князев А.В. Оценка вероятности выявления эксплуатационных дефектов в деталях авиационной техники из жаропрочных сплавов с использованием дефектоскопических жидкостей отечественного и зарубежного производства // Дефектоскопия. 2021. № 1. С. 64–71.
6. Ложкова Д.С. Оценка достоверности автоматизированного ультразвукового контроля полуфабрикатов основных деталей ГТД из титанового сплава с использованием математической модели // Контроль. Диагностика. 2017. № 12. С. 54–63.
7. Чертищев В.Ю. Разработка технологий и средств акустического импедансного контроля многослойных сотовых конструкций из полимерных композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 180 с.
8. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.03.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
9. Имамединов Э.Ш., Валуева М.И. Композиционные материалы для поршневых двигателей (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 3 (60). С. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.

10. Мурашов В.В. Контроль изделий из ПКМ и многослойных клееных конструкций ультразвуковыми методами отражения // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 1 (46). С. 69–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-69-74.
11. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
12. Каблов Е.Н. Не попасть в технологическое рабство // *Эксперт*. 2017. № 24. С. 37–42.
13. Чертищев В.Ю. Оценка вероятности обнаружения дефектов акустическими методами в зависимости от их размера в конструкциях из ПКМ для выходных данных контроля в виде бинарных величин // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). С. 65–79. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-65-79.
14. ASTM D5687/D5687M-95. Standard Guide for Preparation of Flat Composite Panels with Processing Guidelines for Specimen Preparation. ASTM International, 2007. 16 p.
15. Чертищев В.Ю., Бойчук А.С., Диков И.А., Яковлева С.И., Генералов А.С. Определение глубины залегания дефектов в многослойных конструкциях из ПКМ акустическими методами по величине механического импеданса // *Дефектоскопия*. 2018. № 8. С. 21–34.
16. Ложкова Д.С., Краснов И.С. Экспериментальные исследования по оценке дефектности сварных соединений основных деталей ГТД // *Дефектоскопия*. 2015. № 2. С. 10–16.
17. ГОСТ 21120–75. Прутки и заготовки круглого и прямоугольного сечения. Методы ультразвуковой дефектоскопии. М.: Изд-во стандартов, 1988. 7 с.
18. ASTM B594-09. Standard Practice for Ultrasonic Inspection of Aluminum-Alloy Wrought Products for Aerospace Applications. ASTM International, 2009. 10 p.
19. SAE AMS-STD-2154. Inspection, Ultrasonic, Wrought Metals, Process For. SAE International, 1998. 41 p.
20. SAE AMS2628. Ultrasonic immersion inspection titanium and titanium alloy billet premium grade. SAE International, 2007. 28 p. DOI: 10.4271/AMS2628.