
Научная статья

УДК 620.179

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-37-49

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ТИТАНОВЫХ ЗАГОТОВОК ДИСКОВ КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНИЧЕСКОГО АКУСТИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА

И.С. Краснов¹, М.А. Далин¹, А.А. Зародова¹, С.И. Яковлева¹, А.А. Верходанова²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Акционерное общество «ОДК-Авиадвигатель», Пермь, Россия; office@avid.ru

Аннотация. Для обеспечения высокой чувствительности ультразвукового контроля заготовки сложной формы из титанового сплава предложено и изготовлено коническое акустическое зеркало, геометрические параметры которого рассчитаны методами математического моделирования. Определены корректировочные коэффициенты, необходимые для компенсации влияния криволинейной поверхности ввода. Подтверждена высокая точность проведенных расчетов. Применение зеркала позволило повысить чувствительность контроля более чем на 12 дБ (в 4 раза).

Ключевые слова: акустическое зеркало, чувствительность, ультразвуковой контроль, криволинейная поверхность, титановый сплав, заготовки

Для цитирования: Краснов И.С., Далин М.А., Зародова А.А., Яковлева С.И., Верходанова А.А. Автоматизированный ультразвуковой контроль титановых заготовок дисков компрессора газотурбинных двигателей с применением конического акустического зеркала // Труды ВИАМ. 2024. № 5 (135). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-37-49.

Scientific article

A AUTOMATED ULTRASONIC INSPECTION OF TITANIUM ALLOY GAS TURBINE DISC FORGINGS USING CONICAL ACOUSTIC MIRROR

I.S. Krasnov¹, M.A. Dalin¹, A.A. Zarodova¹, S.I. Yakovleva¹, A.A. Verhodanova²

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²Joint-stock company UEC-Aviadvigatel, Perm, Russia; office@avid.ru

Abstract. Acoustic conical mirror for high sensitivity ultrasonic inspection of titanium alloy complex shape forging was offered and developed. Its geometrical parameters were calculated using mathematical modelling. The correction coefficients which are needed for compensation of the curved input surface influence were calculated. The high accuracy of the calculation was confirmed. The use of an acoustic mirror allowed increasing the sensitivity of inspection by more than 12 dB (4 times).

Keywords: acoustic mirror, sensitivity, ultrasonic inspection, curved surface, titanium alloy, forgings

For citation: Krasnov I.S., Dalin M.A., Zarodova A.A., Yakovleva S.I., Verhodanova A.A. Automated ultrasonic inspection of titanium alloy gas turbine disc forgings using conical acoustic mirror. *Trudy VIAM*, 2024, no. 5 (135), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-37-49.

Введение

Материал роторных деталей газотурбинных двигателей, в частности дисков компрессора высокого давления, изготавливаемых из титановых сплавов [1–5], на различных стадиях технологического передела подвергается ультразвуковому контролю (УЗК). Это позволяет обнаружить металлургические дефекты, такие как газонасыщенные включения, которые являются наиболее опасными и трудновыявляемыми в силу своей морфологии. Под воздействием эксплуатационных нагрузок в условиях циклического нагружения данный дефект становится очагом роста усталостной трещины [6].

В настоящее время, согласно параграфу 33.70 Авиационных правил [7], для обоснования заявленного значения ресурса двигателя необходимо оценить риск разрушения его основных деталей [8], в том числе из-за производственного дефекта, пропущенного при неразрушающем контроле [9]. Для расчета этого риска используются методики, которые формируют однозначную взаимосвязь между чувствительностью УЗК той или иной зоны сечения детали в заготовке с ресурсом этой детали [10].

Для достижения требуемых показателей ресурса и надежности двигателя ПД-14 разработчик (АО «ОДК-Авиадвигатель») предъявляет беспрецедентно высокие требования к эффективности и чувствительности УЗК заготовок основных деталей – поковок штампованных, изготавливаемых из титановых сплавов. Цель работ, проводимых с 2021 г. совместно со специалистами отрасли, – разработка технологии автоматизированного УЗК таких заготовок, обеспечивающей оценку всего объема чистой детали в заготовке с чувствительностью, соответствующей выявлению плоскодонного отражателя $\varnothing 0,4$ мм.

Достижение таких высоких показателей чувствительности и полноты контроля потребовало применения прогрессивных приемов УЗК, в частности мультizonного сканирования с использованием фокусированных ультразвуковых преобразователей. Однако для некоторых типоразмеров заготовок обеспечить необходимую чувствительность оказалось затруднительно по следующим причинам:

- высокий уровень структурных шумов материала и сильное затухание ультразвуковых волн;
- большие глубины прозвучивания, необходимые для контроля некоторых зон сечения заготовки;
- необходимость ввода ультразвуковых колебаний с цилиндрических поверхностей, приводящая к дефокусировке ультразвуковых пучков и снижению отношения сигнал/структурный шум.

Вопрос обеспечения УЗК с высокой чувствительностью в объеме 100 % чистового контура детали в некоторых заготовках дисков компрессора был настолько актуальным, что для повышения контролепригодности одной из заготовок рассматривали возможность изменения ее формы и технологии термомеханической обработки. Это повлекло бы за собой необходимость изготовления новой штамповой оснастки и выполнения большого объема испытаний механических свойств материала таких заготовок. В данной статье описан подход, который позволил решить поставленную задачу для заготовки сложной формы из титанового сплава ВТ25У без изменения ее формы и технологии получения.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [11] 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») [12].

Материалы и методы

Рассматриваемая в данной статье заготовка, так же как большинство заготовок дисков турбины и компрессора газотурбинного двигателя, представляет собой тело вращения с центральным отверстием $\varnothing 120$ мм. Ультразвуковой контроль заготовки осуществляется автоматизированным иммерсионным методом с применением набора фокусированных ультразвуковых преобразователей с центральной рабочей частотой 10 МГц. На момент начала данных исследований большую часть объема чистовой детали в этой заготовке контролировали с чувствительностью 0,4 мм. Однако из-за развитой ступицы и наличия уступов на торцевых поверхностях заготовки существовала прилегающая к центральному отверстию область, чувствительность контроля которой при вводе ультразвуковых колебаний с плоских торцевых поверхностей не удалось поднять выше уровня, соответствующего выявлению плоскодонного отражателя $\varnothing 0,8$ мм. Результаты проведенного опробования показали, что эту зону можно контролировать с высокой чувствительностью только со стороны центрального отверстия, при этом глубина прозвучивания должна составлять ≥ 28 мм.

При иммерсионном контроле заготовок дисков обычным способом ввода ультразвуковых колебаний с поверхности центрального отверстия небольшого диаметра является установка преобразователя на угловом переходнике, что позволяет не размещать весь манипулятор автоматизированной установки в отверстие. Для отверстий меньшего диаметра можно применять акустические зеркала, преломляющие акустическую ось ультразвукового преобразователя на 90 градусов. Важно отметить, что все серийно выпускаемые акустические зеркала имеют плоскую отражающую поверхность и не вносят никаких изменений в формируемый преобразователем ультразвуковой пучок, кроме разворота на 90 градусов.

Однако при контроле заготовок с вводом ультразвуковых колебаний с криволинейных поверхностей абсолютная и предельная чувствительность контроля снижаются. Причиной снижения чувствительности при преломлении сферически сфокусированных пучков вогнутой цилиндрической поверхностью заготовки является несоответствие глубин, на которых расположен акустический фокус пучка в осевом сечении и в сечении, поперечном к оси вращения заготовки. Это несоответствие приводит к снижению положительного влияния фокусировки. Аналогией этого эффекта в оптике является астигматизм. С целью минимизации этого эффекта ультразвуковой пучок, как правило, фокусируют на поверхности ввода ультразвуковых колебаний. Это связано с тем, что при такой фокусировке искажение ультразвукового пучка и, соответственно, снижение чувствительности будут минимальными. Однако, как показали расчеты, выполненные методами численного математического моделирования с использованием специализированного программного обеспечения, для контроля рассматриваемой заготовки с фокусировкой пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) на вогнутой поверхности абсолютная чувствительность и отношение сигнал/структурный шум все равно снизятся на 3–4 дБ по сравнению с вводом ультразвуковых колебаний с плоской поверхности. Установлено, что для титанового сплава ВТ25У на глубинах до 28 мм при фокусировке ультразвукового пучка на поверхности ввода контроль с чувствительностью 0,4 мм невозможен даже на плоских поверхностях большинства заготовок из-за превышения амплитуды сигналов от структурных шумов уровня браковки. Таким образом, проведение контроля с внутренней цилиндрической поверхности центрального отверстия с такой фокусировкой на глубинах до 28 мм тем более невозможно.

Проблема недостаточной чувствительности к дефектам, расположенным на таких глубинах, могла бы быть решена с применением послойного (мультизонного)

контроля фокусированными преобразователями, который требует ввода ультразвуковых колебаний с заглубленным фокусом, т. е. с величинами пути по воде меньшими, чем значение фокусного расстояния преобразователя. Однако в этом случае на вогнутой поверхности ввода происходит более сильное искажение сферически сфокусированного пучка, приводящее к такому снижению абсолютной и предельной чувствительности, что полностью нивелируется положительный эффект от мультizonного контроля. Так, согласно проведенным расчетам, даже при оптимальном заглублении фокуса в материал на вогнутой поверхности с радиусом кривизны 60 мм снижение чувствительности на глубине 27,5 мм составит 12 дБ, что позволит выявить дефекты, эквивалентные плоскодонному отражателю $\varnothing 0,4$ мм.

Известным техническим решением, позволяющим скомпенсировать негативное влияние цилиндрической поверхности на фокусировку ультразвуковых пучков при мультizonном иммерсионном УЗК, является применение бифокальных ультразвуковых преобразователей. Бифокальный ультразвуковой преобразователь имеет на поверхности выхода линзу, радиусы кривизны в продольном и поперечном сечении которой отличаются. Соответственно, такой преобразователь характеризуется двумя фокусными путями по воде, измеренными в двух перпендикулярных плоскостях. При определенном сочетании используемого пути по воде (расстояния от точки выхода преобразователя до поверхности объекта контроля) и радиуса цилиндрической поверхности ввода такой преобразователь будет формировать волновой фронт тороидальной формы, который после преломления в объекте контроля преобразуется в сферически сфокусированный пучок с фокальной зоной, расположенной на требуемой глубине.

В настоящее время бифокальные преобразователи используются только в составе автоматизированных установок для УЗК билетов – прутковых заготовок круглого сечения из титановых и никелевых жаропрочных сплавов, предназначенных для изготовления особо ответственных нагруженных деталей авиационной техники. Примером применения бифокальных преобразователей является разработанный SAE стандарт AMS2628 [13].

Из-за ограниченной протяженности фокальной зоны (12–25 мм) для контроля изделия на всю глубину обычно используется набор, включающий не менее шести преобразователей, что, впрочем, является обычной практикой при мультizonном контроле. Однако, в отличие от цилиндрически или сферически сфокусированных ультразвуковых преобразователей, бифокальные имеют крайне высокую стоимость [14] и не выпускаются в РФ. Кроме того, такие преобразователи предназначены для ввода ультразвуковых колебаний с выпуклых поверхностей и не подходят для контроля заготовок дисков газотурбинного двигателя со стороны центрального отверстия. Для контроля с вогнутых цилиндрических поверхностей необходимо, чтобы сформированный преобразователем ультразвуковой пучок был сходящимся в одной плоскости и расходящимся в другой.

Таким образом, эффективным способом компенсации негативного влияния кривизны поверхности ввода может быть использование акустического зеркала с криволинейной поверхностью (рис. 1) [15].

Хотя в работе [15] предлагается использовать зеркало с цилиндрической поверхностью, несложные геометрические построения показывают следующее. Для того чтобы в различных по высоте поперечных сечениях преломленный луч фокусировался на одной глубине, форма поверхности зеркала должна быть конической, с вертикальной осью конуса. Предположим, что преобразователь несфокусированный. Тогда в каждом поперечном (сагиттальном) сечении волновой фронт отраженного от

цилиндрического зеркала ультразвукового излучения будет представлять собой дугу эллипса. Ось цилиндра наклонена, поэтому нижние (рис. 1, *a*) лучи апертуры пучка упадут на поверхность центрального отверстия заготовки с большей кривизной волнового фронта, чем верхние. Вогнутая цилиндрическая поверхность заготовки сфокусирует эти лучи в линию, но она будет наклонна к оси заготовки. В случае сферически сфокусированного пучка это приведет к искажению сферической фокусировки (верхние и нижние сагиттальные пучки лучей сфокусируются на разной глубине) и, как следствие, снижению чувствительности. Безусловно, цилиндрическое зеркало позволит снизить негативное влияние криволинейной поверхности по сравнению с плоским зеркалом, но не так эффективно, как коническое.

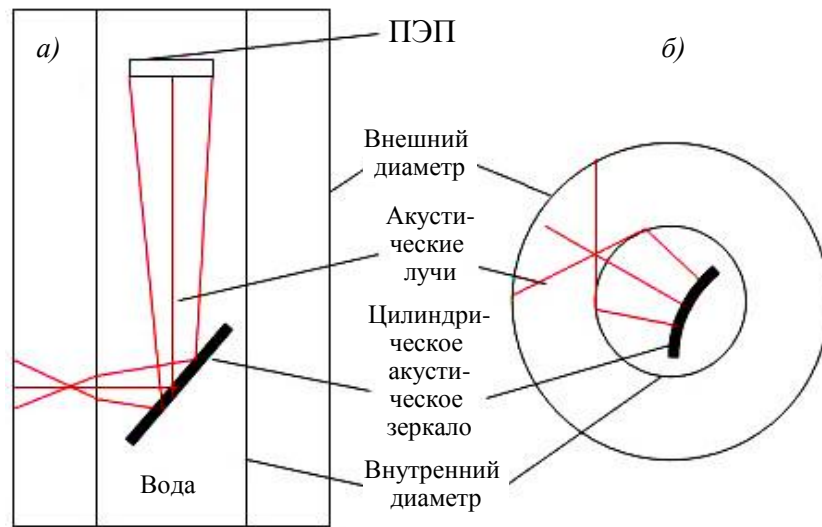


Рис. 1. Схема длиннофокусного аксиально расположенного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) с цилиндрическим выпуклым зеркалом: *a* – осевое сечение; *б* – сечение, перпендикулярное к оси вращения заготовки [15]

Коническое зеркало с вертикальной осью, независимо от расстояния между осью вращения детали и осью конуса, для несфокусированного датчика будет во всех перпендикулярных оси заготовки сечениях формировать волновые фронты в виде дуг окружности с центром на оси конуса, т. е. сформируется пучок с цилиндрическим волновым фронтом с вертикальной осью, совпадающей с осью конуса. Соответственно, внутренняя цилиндрическая поверхность будет фокусировать этот пучок в линию, параллельную поверхности. В случае сферически сфокусированного пучка лучи соберутся в фокальную область минимально возможного сечения, что обеспечит максимальную чувствительность контроля. Данные выводы подтверждают результаты геометрических построений в специализированном программном обеспечении, которое позволяет строить ход ультразвуковых лучей в приближении геометрической оптики до начала моделирования (показаны зеленым цветом на рис. 2).

Для проведения мультizonного контроля с применением акустического зеркала выбран сферически сфокусированный ультразвуковой ПЭП с центральной рабочей частотой 10 МГц, диаметром пьезопластины 25,4 мм и номинальным фокусным путем по воде 152,4 мм. Выбор обусловлен тем, что ПЭП данного типа используется для контроля заготовок из титановых сплавов согласно стандарту SAE AMS2636 и является наиболее острофокусным, что потенциально позволяет добиться максимально возможной чувствительности.

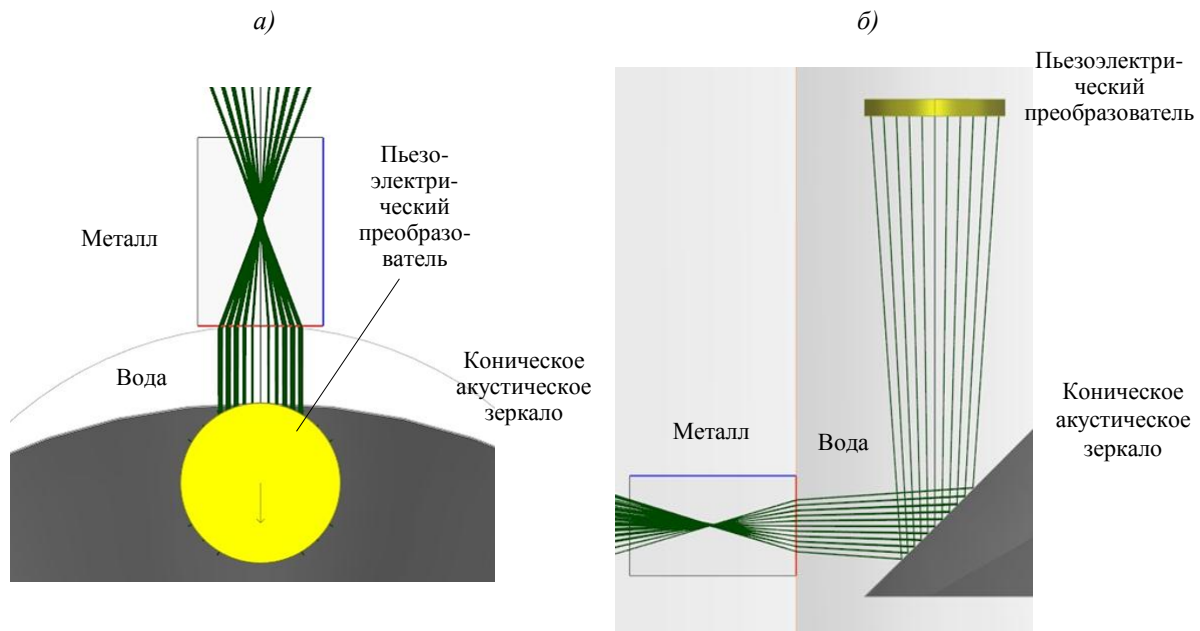


Рис. 2. Ход лучей в приближении геометрической оптики: *a* – сечение, перпендикулярное к оси вращения заготовки; *б* – осевое сечение

Для определения оптимальных геометрических параметров конического акустического зеркала в специализированном программном обеспечении проведено математическое моделирование процесса распространения ультразвуковых колебаний. В качестве объекта контроля построена 3D-модель заготовки из сплава ВТ25У с центральным отверстием $\varnothing 120$ мм, внутри которого располагался датчик с акустическим зеркалом. Модель ультразвукового преобразователя задана путем установки его соответствующих параметров и характеристик, включая замеренный на реальном ПЭП импульсный отклик системы «ПЭП–электрический тракт дефектоскопа». Акустическое зеркало было задано как конус с углом раствора 90 градусов. Путь по воде задан как сумма расстояний от датчика до зеркала и от зеркала до поверхности детали ($a + b$) (рис. 3). Положение акустической оси датчика относительно края зеркала выбрано таким образом, чтобы поток лучей полностью отражался от зеркала, а габариты зеркала и ПЭП исключали их касание поверхности заготовки с учетом допусков на диаметр центрального отверстия.

Для реализации мультizonного контроля диапазон глубин от 2,4 до 28 мм разбит на пять зон. При моделировании путем подбора величин a , b , расстояний между осями ПЭП, конической поверхности зеркала и вращения заготовки добивались фокусировки ультразвукового пучка в середину глубины каждой зоны контроля как в осевом, так и в поперечном сечении. После подбора параметров для одной (самой глубокой) зоны контроля с помощью моделирования проверили возможность применения этого зеркала для остальных зон контроля. Путем подбора значений a и b удалось добиться перекрытия всех зон контроля с использованием одного зеркала.

Расчетным и экспериментальным путем оценены потери ультразвукового излучения на зеркале. При расчете критических углов установлено, что при отражении продольных волн в воде от зеркала, изготовленного из любого материала, со скоростью распространения сдвиговых волн >3000 м/с ультразвуковые волны испытывают так называемое полное внутреннее отражение, не предусматривающее каких-либо потерь энергии, при углах падения >30 градусов. Таким образом, в качестве материала для изготовления зеркала можно использовать практически любой металл. Для получения стандартных плоских акустических зеркал обычно применяют нержавеющую сталь.

Авторы данной статьи выбрали коррозионностойкий алюминиевый сплав типа АМгб с целью снижения массы оснастки и облегчения достижения высокой точности механической обработки.

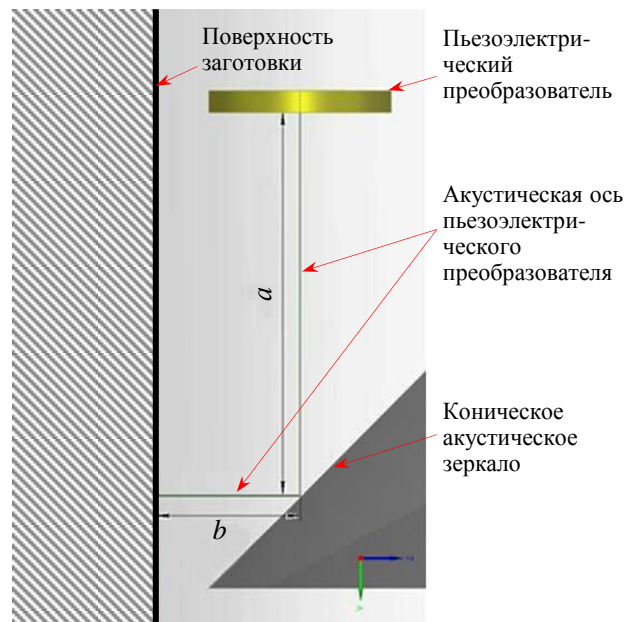


Рис. 3. Путь по воде при использовании акустического зеркала

Отсутствие потерь при отражении от металлического зеркала под углом 45 градусов проверено при натурном эксперименте с использованием в качестве зеркала точно установленной плоской шлифованной пластины и полностью подтверждено.

Для отражения без потерь шероховатость поверхности зеркала должна быть как минимум в 10 раз меньше длины ультразвуковой волны в воде. Поэтому шероховатость поверхности зеркала ограничили величиной $R_a = 1,25$ мкм, так как это самая низкая шероховатость, которую можно получить при чистовом фрезеровании на станке с числовым программным обеспечением.

На основании проведенных расчетов разработана и изготовлена оснастка, обеспечивающая закрепление зеркала на ПЭП при проведении контроля. Поскольку для контроля всех пяти зон с одним зеркалом необходимо изменять расстояние b между ПЭП и зеркалом, в конструкцию оснастки добавили возможность перемещения зеркала в направлении акустической оси. Зеркало перемещается по направляющим в виде трех углепластиковых трубок и фиксируется в нужном положении винтом. Отражающая поверхность зеркала является внецентровой вырезкой из конической поверхности. Конструкция оснастки жесткая, люфты отсутствуют.

Внешний вид изготовленной оснастки с акустическим зеркалом представлен на рис. 4.



Рис. 4. Оснастка с коническим зеркалом, закрепленная на преобразователе

Для настройки усиления и временной регулировки чувствительности (ВРЧ) при контроле с вводом ультразвуковых колебаний с криволинейных поверхностей требуется иметь набор настроечных образцов с цилиндрической поверхностью ввода соответствующей кривизны. Формы кривой ВРЧ, построенные на образцах с плоской и криволинейной поверхностью, будут отличаться. Однако в мировой практике иммерсионного УЗК для исключения необходимости изготовления большого количества образцов часто допускается настройка аппаратуры на плоских образцах с последующим введением корректировок в усиление в каждой опорной точке кривой ВРЧ. Современные автоматизированные установки для УЗК имеют специальную функцию автоматической подгрузки в настройку ВРЧ дефектоскопической аппаратуры корректировочных коэффициентов при переходе к контролю участка с той или иной кривизной поверхности ввода.

Такой подход, предусматривающий настройку на плоских образцах с последующей корректировкой настройки ВРЧ, применен для мультисонного контроля с использованием конического акустического зеркала. Корректировочные коэффициенты для ввода ультразвуковых колебаний с криволинейных поверхностей с использованием нестандартной оснастки после настройки на плоские образцы рассчитаны с помощью математического моделирования процессов автоматизированного иммерсионного УЗК в специализированном программном обеспечении.

Сначала проведен расчет модели плоского образца из сплава ВТ8-1 с плоскодонным отражателем $\varnothing 0,8$ мм, залегающим на минимальной и максимальной глубинах зоны контроля (рис. 5, а). Для каждого отражателя зафиксировано значение амплитуды эхосигнала, измеряемое в относительных единицах.

Затем смоделирован образец с заданной криволинейной поверхностью ввода и центральным отверстием с плоскодонными отражателями на идентичных глубинах (рис. 5, б). Перед расчетом в данную модель вводили калибровочное значение, полученное при определении модели с плоской поверхностью ввода. По результатам расчета для каждого отражателя зафиксировано падение амплитуды эхосигнала относительно контрольного отражателя.

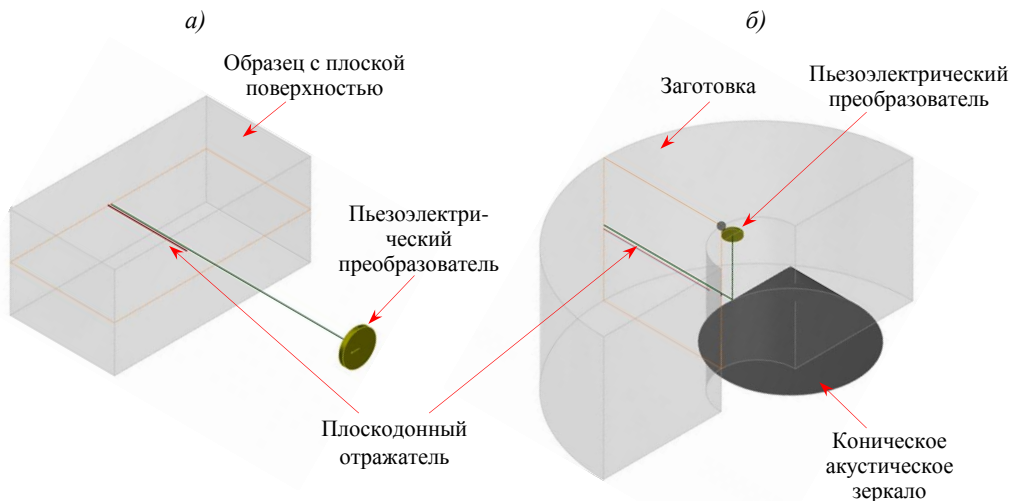


Рис. 5. Расчетные модели плоского (а) и цилиндрического образца с центральным отверстием (б)

Порядок применения корректировочных коэффициентов при использовании акустического зеркала следующий. Настройка на плоских образцах осуществляется с использованием ПЭП со снятым зеркалом. После настройки ВРЧ на плоских образцах

в соответствующие значения усиления в точке ВРЧ вносится поправка. Положительный корректировочный коэффициент означает, что усиление в точке ВРЧ следует увеличить, а отрицательный – уменьшить.

Поскольку применение конического акустического зеркала не имеет прецедентов в практике УЗК заготовок дисков, проведена проверка (верификация) правильности работы специализированного программного обеспечения и применяемой процедуры расчета корректировочных коэффициентов. Для этого изготовлены настроечные образцы с поверхностью ввода, имеющей кривизну, в точности соответствующую центральному отверстию заготовки (цилиндрической вогнутой с радиусом кривизны 60 мм). Получены три образца из титанового сплава ВТ8-1, в каждом из которых выполнено по одному отражателю в виде плоскодонного отверстия $\varnothing 0,8$ мм (рис. 6).

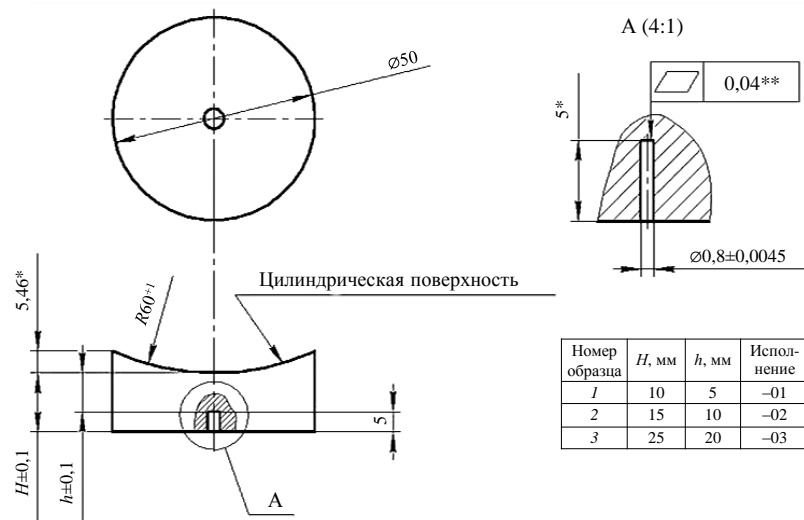


Рис. 6. Модельные образцы из титанового сплава с контрольными отражателями и криволинейной поверхностью ввода (* обеспечивается инструментом; ** размеры для справок)

Глубины залегания отражателей в изготовленных и имеющихся настроечных (из сплава ВТ8-1 с плоской поверхностью ввода и контрольными отражателями $\varnothing 0,8$ мм) образцах равны.

После настройки аппаратуры на имеющихся плоских образцах в полученную кривую ВРЧ введены корректировочные коэффициенты, рассчитанные для указанных глубин отражателей. После установки на ПЭП оснастки с зеркалом замерены амплитуды эхосигналов от контрольных отражателей в образцах с криволинейной поверхностью ввода. Оценено расхождение между амплитудами эхосигналов от трех отражателей в образцах с плоской и криволинейной поверхностью (R60) с учетом введенных корректировочных коэффициентов.

Эксперименты проводили в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ с использованием установки для иммерсионного ультразвукового контроля, а также ПЭП с номинальным фокусным расстоянием 6" (152,4 мм) и центральной частотой 10 МГц.

Первоначально расхождение расчетных и экспериментальных результатов составило >3 дБ, поэтому проведен ряд дополнительных экспериментов с целью поиска источника погрешности. Установлено, что причиной расхождения стало использование при расчете корректировочных коэффициентов номинального фокусного расстояния ПЭП (6") вместо фактического, которое по результатам замеров составило 6,5"

(165,1 мм). В результате процедура расчета корректировочных коэффициентов дополнена замером фактического значения фокусного расстояния ПЭП.

После этого повторно рассчитаны коэффициенты под фактическое фокусное расстояние ПЭП и оценено расхождение между амплитудами эхосигналов от отражателей в образцах с плоской и криволинейной поверхностью. Результаты приведены в таблице.

Разница рассчитанных и экспериментальных значений амплитуд эхосигналов от отражателей в образцах с плоской и криволинейной поверхностью

Путь по воде, мм	Глубина залегания отражателя, мм	Корректировочный коэффициент, дБ	Амплитуда эхосигнала на образце, дБ*		Погрешность расчета, дБ
			плоском	криволинейном	
108	10	+2,4	28,2	31,4	-0,8
	20	-0,8	27,8	27,2	-0,2
135	5	+2,2	30,6	32,8	0
	10	-0,5	28,6	28,2	-0,1

* Амплитуда приведена в отрицательных децибелах в виде значения усиления дефектоскопа, при котором амплитуда эхосигнала составляет 80 % высоты экрана.

Погрешность расчета корректировочных коэффициентов составляет $\leq 0,8$ дБ. Таким образом, эксперимент показал высокую точность расчета корректировочных коэффициентов: обычная погрешность изготовления настроечных образцов допускает разброс в амплитудах эхосигналов от отражателей ± 2 дБ [13, 16].

Эксперимент также показал высокую эффективность зеркала – при настройке на чувствительность, соответствующую выявлению отражателя $\varnothing 0,4$ мм (0,8 мм с увеличением усиления на 12 дБ) на глубине 20 мм в образце с криволинейной поверхностью, амплитуда структурных шумов не превысила 20 % высоты экрана дефектоскопа. Косвенно эффективность подтверждается небольшими значениями корректировочных коэффициентов.

Результаты

Одним из наиболее существенных недостатков применения мультizonного УЗК с использованием конического зеркала является высокая трудоемкость. Это, впрочем, касается всех видов мультizonного контроля, который позволяет добиться высоких значений чувствительности за счет увеличения продолжительности исследования.

При опробовании оснастки замечено, что детали из алюминиевого сплава все-таки подвергаются коррозии в водопроводной воде, которая используется в качестве иммерсионной жидкости при УЗК. Одна из возможных причин этого – использование деталей в контакте с трубками из углепластика. Проблема решена за счет нанесения на зеркало анодно-оксидного покрытия с пропиткой хромпиком. В настоящее время акустические зеркала изготавливаются из титанового сплава. Проблем с коррозионной стойкостью у титановых сплавов нет, но увеличение массы оснастки может привести к износу приводов угловых осей манипулятора установки.

В условиях серийного производства отмечено, что необходимость изменения на оснастке расстояния b при переходе от одной зоны контроля к другой является потенциальным источником ошибки дефектоскописта. В дальнейшем рассматривается переход к изготовлению набора быстросъемных оснасток без движущихся частей с фиксированным расстоянием b вместо одной универсальной оснастки с подвижным зеркалом.

Разработанная оснастка не является универсальной: фактически для каждого радиуса кривизны поверхности необходимо рассчитать и изготовить свое зеркало.

Поэтому применение предложенного технического решения актуально только для контроля заготовок деталей, к которым предъявляются исключительно высокие требования к полноте и чувствительности УЗК.

Одним из возможных направлений продолжения исследований является распространение практики использования конических акустических зеркал на контроль, выполняемый с наружной цилиндрической поверхности заготовок. Применение мультizonного контроля позволяет достичь на заготовках из сплава ВТ8-1 глубины прозвучивания 90 мм при вводе ультразвуковых колебаний с плоских поверхностей с обеспечением чувствительности 0,4 мм. Однако при вводе ультразвуковых колебаний с наружной цилиндрической поверхности заготовки диска диаметром 400–500 мм из-за кривизны поверхности ввода не удается достичь глубин прозвучивания >60 мм. Предварительные расчеты показывают, что применение набора зеркал с вогнутой конической поверхностью может позволить увеличить глубину прозвучивания со стороны наружной цилиндрической поверхности с 60 до 90 мм.

Обсуждение и заключения

В качестве мероприятия по увеличению чувствительности УЗК заготовок основных деталей газотурбинного двигателя предложен контроль со стороны центрального отверстия с использованием специального акустического зеркала с криволинейной поверхностью. Данное приспособление позволяет скомпенсировать негативное влияние эффектов преломления сферически сфокусированных пучков вогнутой цилиндрической поверхностью заготовки. Параметры акустического зеркала определены с помощью специализированного программного обеспечения. По результатам моделирования выбраны значения путей по воде для мультizonного контроля заготовки и рассчитаны корректировочные коэффициенты для ввода ультразвуковых колебаний с криволинейных поверхностей при настройке на образцах с плоской поверхностью. Применение оснастки с учетом корректировочных коэффициентов опробовано на образцах с криволинейной поверхностью. Расхождение между амплитудами, полученными от плоскодонных отражателей, расположенных в образцах с плоской и криволинейной поверхностью, составило <1 дБ, что доказывает высокую точность проведенных расчетов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность начальнику лаборатории ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» С.Ф. Троицкому за ценные замечания и работу по внедрению контроля с использованием акустического зеркала в серийное производство.

Список источников

1. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
2. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // Пермские авиационные двигатели. 2014. № 31. С. 43–47.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
4. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
5. Дуюнова В.А., Павлова Т.В., Кашапов О.С., Чучман О.В. Долговечность поковок и штамповок из сплава ВТ6 для деталей газотурбинных двигателей и авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.11.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.

6. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Карашаев М.М., Рыжков П.В. Испытания на малоцикловую усталость с выдержкой в цикле жаропрочных металлических материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-123-137.
7. Нормы летной годности двигателей воздушных судов: АП-33: утв. Постановлением 32-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 17.02.2012. 3-е изд. с поправками 33-1 и 33-2. М.: Авиаиздат, 2012. С. 7–11.
8. Горбовец М.А., Славин А.В. Доказательство соответствия материала требованиям Части 33 Авиационных правил // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-89-94.
9. Краснов И.С., Ложкова Д.С., Далин М.А. Оценка дефектности заготовок из титановых сплавов для вероятностного расчета риска разрушения дисков газотурбинных двигателей в эксплуатации // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.11.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
10. AC 33.14-1 - Damage Tolerance for High Energy Turbine Engine Rotors. Washington, DC: Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2001. 128 p.
11. Николаев Е.В., Славин А.В., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы (к 120-летию Г.В. Акимова) // Труды ВИАМ. 2021. № 9 (103). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-117-130.
12. 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.
13. AMS2628. Ultrasonic Immersion Inspection Titanium and Titanium alloy Billet Premium Grade. New York, NY: SAE, 2019. 26 p.
14. DOT/FAA/AR-05/29. Inspection Development for Nickel Billet–Engine Titanium Consortium Phase II. Washington, DC: Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2005. P. 3–21.
15. Karpelson A. Bi-curved Ultrasonic Transducers // The e-Journal of Nondestructive Testing. 2006. Vol. 11. No. 5. URL: <https://www.ndt.net/article/v11n05/karpelson/karpelson.htm> (дата обращения: 13.11.2023).
16. AMS2636 Rev. A. Ultrasonic Immersion Inspection Titanium and Titanium Alloy Forgings Premium Grade. New York, NY: SAE, 2016. 16 p.

References

1. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
2. Kablov E.N. VIAM materials and technologies for Aviadvigatel. *Permskiye aviatsionnyye dvigateli*, 2014, no. 31, pp. 43–47.
3. Kablov E.N. New generation materials – the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
4. Antipov V.V. Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 186–194. DOI: 10.18577/2107-9140-2017-0-S-186-194.
5. Duyunova V.A., Pavlova T.V., Kashapov O.S., Chuchman O.V. Fatigue strength of forgings from VT6 alloy for parts of gas turbine engines and aircrafts. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 13, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.
6. Gorbovets M.A., Hodinev I.A., Karashaev M.M., Ryzhkov P.V. Low cycle dwell fatigue testing of heat resistant metallic materials (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 13, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-123-137.

7. *Airworthiness standards for aircraft engines*: AP-33: approved by Resolution of the 32nd session of the Council on Aviation and Airspace Use on 17.02.2012. 3rd ed. with amendments 33-1 and 33-2. Moscow: Aviaizdat, 2012, pp. 7–11.
8. Gorbovets M.A., Slavin A.V. Proof of material compliance with the requirements to part No. 33 of JARs. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3, pp. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-89-94.
9. Krasnov I.S., Lozhkova D.S., Dalin M.A. Evaluation of deficiency of titanium alloy forgings for probabilistic calculation of gas turbine engine disks fracture risk. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 12. Available at: <https://www.journal.viam.ru> (accessed: November 13, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
10. *AC 33.14-1 - Damage Tolerance for High Energy Turbine Engine Rotors*. Washington, DC: Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2001, 128 p.
11. Nikolaev E.V., Slavin A.V., Startsev V.O., Laptev A.B. Modern approaches to assessing the impact of external factors on materials and complex technical systems (to the 120th anniversary of G.V. Akimov). *Trudy VIAM*, 2021, no. 9 (103), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 13, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-117-130.
12. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
13. AMS2628. *Ultrasonic Immersion Inspection Titanium and Titanium alloy Billet Premium Grade*. New York, NY: SAE, 2019, 26 p.
14. DOT/FAA/AR-05/29. *Inspection Development for Nickel Billet–Engine Titanium Consortium Phase II*. Washington, DC: Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2005, pp. 3–21.
15. Karpelson A. Bi-curved Ultrasonic Transducers. *The e-Journal of Nondestructive Testing*, 2006, vol. 11, no. 5. Available at: <https://www.ndt.net/article/v11n05/karpelson/karpelson.htm> (accessed: November 13, 2023).
16. AMS2636 Rev. A. *Ultrasonic Immersion Inspection Titanium and Titanium Alloy Forgings Premium Grade*. New York, NY: SAE, 2016, 16 p.

Информация об авторах

Краснов Иван Сергеевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Далин Михаил Альбертович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Зародова Алина Альбертовна, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Яковлева Светлана Ивановна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Верходанова Айгуль Анатольевна, начальник бюро, АО «ОДК-Авиадвигатель», office@avid.ru

Information about the authors

Ivan S. Krasnov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Michael A. Dalin, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Allina A. Zarodova, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Svetlana I. Yakovleva, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aigul A. Verhodanova, Head of Bureau, UEC-Aviadvigatel JSC, office@avid.ru

Статья поступила в редакцию 03.04.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 09.04.2024.
The article was submitted 03.04.2024; approved and accepted for publication after reviewing 09.04.2024.