

ОБЪЕДИНЕННАЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНАЯ КОРПОРАЦИЯ
АО «ОДК-Авиадвигатель»

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель
управляющего директора -
генерального конструктора -
начальник ОКБ
АО «ОДК-Авиадвигатель»

Т.Н. Хайрулин

2024 г.



Конкурсная работа

в номинации «За создание новой технологии»

в конкурсе «Авиастроитель года» по итогам 2023 года

«Автоматизированный ультразвуковой контроль титановых заготовок
дисков компрессора газотурбинных двигателей
с применением акустического зеркала»

Авторский коллектив:

А.А. Верхованова (АО «ОДК-Авиадвигатель»),
М.А. Далин, И.С. Краснов, А.А. Зародова, С.И. Яковлева
(НИЦ «Курчатовский институт-ВИАМ»)

2024 г.

1. Цель работы

1.1 Разработка технологии автоматизированного ультразвукового контроля заготовок дисков компрессора сложной формы из титановых сплавов с применением акустического зеркала.

2. Актуальность работы

2.1 Диски компрессора газотурбинных двигателей, входят в перечень основных деталей двигателей.

2.2 Выполнение ультразвукового контроля заготовок основных деталей – поковок штампованных, изготавливаемых из титановых сплавов с целью выявления металлургических дефектов является особоответственной операцией.

2.3 Разработка технологии автоматизированного ультразвукового контроля заготовок дисков из титановых сплавов с чувствительностью, эквивалентной плоскодонному отражателю диаметром 0,4 мм проводилась совместно с НИЦ «Курчатовский институт-ВИАМ».

2.3.1 Для обеспечения прозвучивания 100 % объёма чистой детали в заготовке для ряда заготовок введен контроль со стороны внутреннего отверстия с применением акустического зеркала.

3. Задачи

3.1 Разработать технологию автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) заготовок из титановых сплавов:

-обеспечить прозвучивание 100 % объёма чистой детали в заготовке на чувствительности, соответствующей выявлению плоскодонного отражателя диаметром 0,4 мм;

-выполнить контроль со стороны внутреннего отверстия с применением оснастки разработанной по п.3.1.1.

3.1.1 Спроектировать и изготовить оснастку- коническое акустическое зеркало.

3.2 При разработке технологии АУЗ контроля заготовок из титановых сплавов необходимо учесть:

- высокий уровень структурных шумов материала и сильное затухание ультразвуковых волн;

- большие глубины прозвучивания, необходимые для контроля некоторых зон сечения заготовки.

4. Выводы

4.1 Специалистами АО «ОДК-Авиадвигатель» и НИЦ «Курчатовский институт-ВИАМ» разработана технология АУЗК 100 % объёма чистой детали в заготовке на чувствительности, соответствующей выявлению плоскодонного отражателя диаметром 0,4 мм.

4.2 Для увеличения чувствительности АУЗК заготовок основных деталей газотурбинного двигателя и обеспечения 100 % объёма чистой детали в заготовке был введен контроль со стороны центрального отверстия с использованием специального акустического зеркала с криволинейной поверхностью.

4.2.1 Данное приспособление скомпенсировало негативное влияние эффектов преломления сферически сфокусированных пучков вогнутой цилиндрической поверхностью заготовки.

4.2.2 Определение параметров акустического зеркала было осуществлено с помощью специализированного программного обеспечения.

4.2.3 С помощью моделирования осуществлен выбор значений путей по воде для мультizonального контроля заготовки и рассчитаны корректировочные коэффициенты для ввода ультразвуковых колебаний с криволинейных поверхностей при настройке на образцах с плоской поверхностью.

4.2.4 Применение оснастки с учётом корректировочных коэффициентов опробовано на образцах с криволинейной поверхностью.

4.2.5 Расхождение между амплитудами, полученными от плоскодонных отражателей, расположенных в образцах с плоской поверхностью и в образцах с криволинейной поверхностью составило менее 1 дБ, что доказывает высокую точность проведенных расчетов.

5. Описание работы

5.1 Опытные работы проводили на заготовке диска 5 ст. КВД из титанового сплава BT25 (рис.1) с применением системы для автоматизированного ультразвукового контроля.

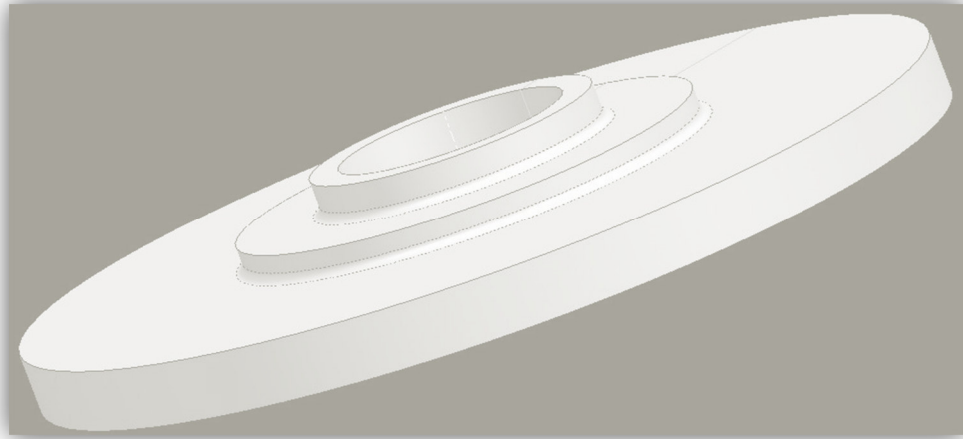


Рисунок 1 – Заготовка диска 5 ст. КВД из титанового сплава с центральным отверстием диаметром 120 мм

5.2 Специалистами АО «ОДК-Авиадвигатель» и НИЦ «Курчатовский институт-ВИАМ» разработана технология АУЗК 100 % объёма чистовой детали в заготовке на чувствительности, соответствующей выявлению плоскодонного отражателя диаметром 0,4 мм.

5.3 При разработке технологии АУЗК заготовки были рассмотрены следующие вопросы (подходы):

5.3.1 АУЗК титановых заготовок проводили с применением набора фокусированных ультразвуковых преобразователей с центральной рабочей частотой 10 МГц.

5.3.2 В заготовке из-за развитой ступицы и наличия уступов на торцевых поверхностях заготовки, имелась 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 диаметром 0,8 мм.

Результаты проведённого опробования показали, что эта зона может быть проконтролирована на высокой чувствительности только со стороны центрального отверстия, при этом глубина прозвучивания должна составлять не менее 28 мм.

5.3.3 При иммерсионном контроле заготовок дисков, обычным способом ввода ультразвуковых колебаний с поверхности центрального отверстия небольшого

диаметра является установка преобразователя на угловом переходнике, позволяющем не размещать весь манипулятор автоматизированной установки в отверстии.

Для отверстий меньшего диаметра возможно применение акустических зеркал, преломляющих акустическую ось ультразвукового преобразователя на 90° . Важно отметить, что все серийно выпускаемые акустические зеркала имеют плоскую отражающую поверхность и не вносят никаких изменений в формируемый преобразователем ультразвуковой пучок, кроме его разворота на 90° .

5.3.4 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, при контроле заготовок с вводом ультразвуковых колебаний с криволинейных поверхностей 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 будет минимальным.

5.3.5 Расчёты, выполненные с применением методов численного математического моделирования с использованием специализированного программного обеспечения (ПО) показали, что для контроля рассматриваемой заготовки с фокусировкой применяемых ПЭП на вогнутой поверхности, абсолютная чувствительность и отношение сигнал/структурный шум всё равно снизится на 3 - 4 дБ по сравнению с вводом ультразвуковых колебаний с плоской поверхности.

При этом, в ходе контроля партии заготовок, было установлено, что для исследуемого титанового сплава ВТ25У на глубинах до 28 мм, при фокусировании ультразвукового пучка на поверхности ввода, контроль на чувствительности 0,4 мм оказался невозможен даже на плоских поверхностях большинства заготовок из-за превышения амплитудой структурных шумов уровня браковки. Таким образом, проведение контроля с внутренней цилиндрической поверхности центрального отверстия с такой фокусировкой на глубинах до 28 мм оказалось тем более невозможно.

5.3.6 Проблема недостаточной чувствительности к дефектам, расположенным на таких глубинах, могла бы быть решена с применением послойного (мультизонного) контроля сфокусированными 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 намного более сильное искажение сферически сфокусированного пучка, приводящее к такому снижению абсолютной и предельной чувствительности, что оно полностью нивелирует положительный эффект от мультizonного контроля. Так, согласно проведенным расчётам, 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 не оставляет шансов на выявление дефектов, эквивалентных плоскодонному отражателю диаметром 0,4 мм.

5.3.7 Чтобы скомпенсировать негативное влияние цилиндрической поверхности на фокусировку ультразвуковых пучков при мультizonном иммерсионном ультразвуковом контроле, является применение бифокальных ультразвуковых преобразователей. Бифокальный ультразвуковой преобразователь имеет на поверхности выхода линзу, у которых радиусов кривизны в продольном и поперечном сечении отличаются. Соответственно, такой преобразователь характеризуется двумя фокусными расстояниями по воде, измеренными в двух перпендикулярных плоскостях.

При определённом 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 ультразвукового контроля билетов – прутковых заготовок круглого сечения из титановых и никелевых жаропрочных сплавов, идущих на изготовление особо ответственных нагруженных деталей авиационной техники. Примером применения бифокальных преобразователей является разработанный SAE стандарт AMS 2628 [1].

Из-за ограниченной протяженности фокальной зоны (12 - 25 мм), для контроля изделия на всю глубину обычно используется набор из не менее 6 преобразователей, что, впрочем, является обычной практикой при мультizonном контроле.

Все такие преобразователи предназначены для ввода ультразвуковых колебаний с выпуклых поверхностей и не подходят для задач контроля заготовок дисков ГТД 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.

Поэтому, эффективным способом компенсации негативного влияния кривизны поверхности ввода может являться использование акустического зеркала с криволинейной поверхностью [3], рисунок 2.

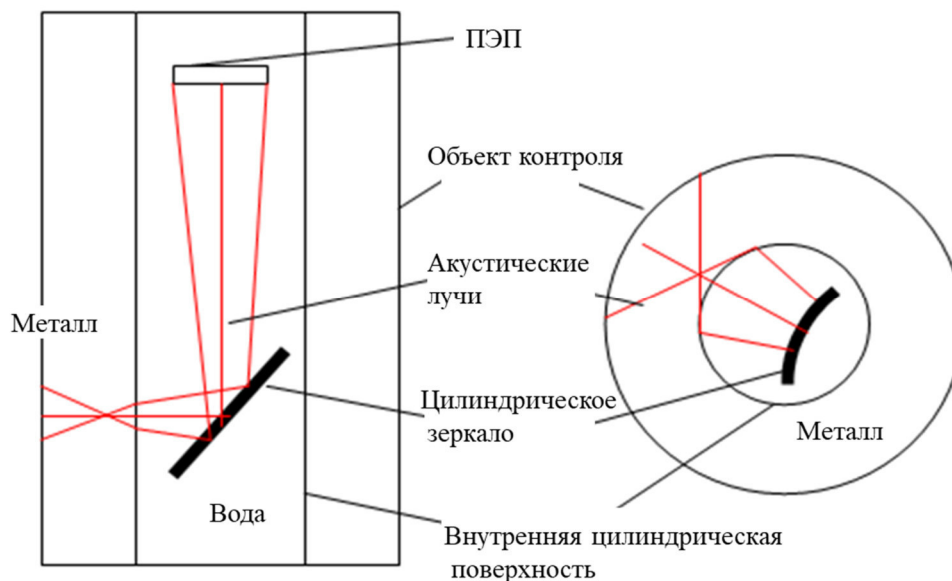


Рисунок 2 – Схема длиннофокусного аксиально расположенного ПЭП с цилиндрическим выпуклым зеркалом (из [3]). а – осевое сечение, б - сечение, перпендикулярное к оси вращения заготовки.

5.3.8 Если преобразователь нефокусированный, то в каждом поперечном (сагиттальном) сечении волновой фронт отраженного от цилиндрического зеркала ультразвукового излучения будет представлять собой дугу эллипса. Ось цилиндра наклонена, поэтому нижние (по рисунку 2 а) 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 эта линия будет наклонна к оси заготовки.

В случае сферически сфокусированного пучка, это приведёт 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.

5.3.9 Коническое зеркало с вертикальной осью, независимо от расстояния между осью вращения детали и осью конуса, для нефокусированного 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 наилучшую чувствительность контроля. Данные выводы подтверждаются результатами геометрических построений в программном обеспечении (ПО), которое позволяет строить ход ультразвуковых лучей в приближении геометрической оптики до начала моделирования (показаны зеленым на рисунке 3).

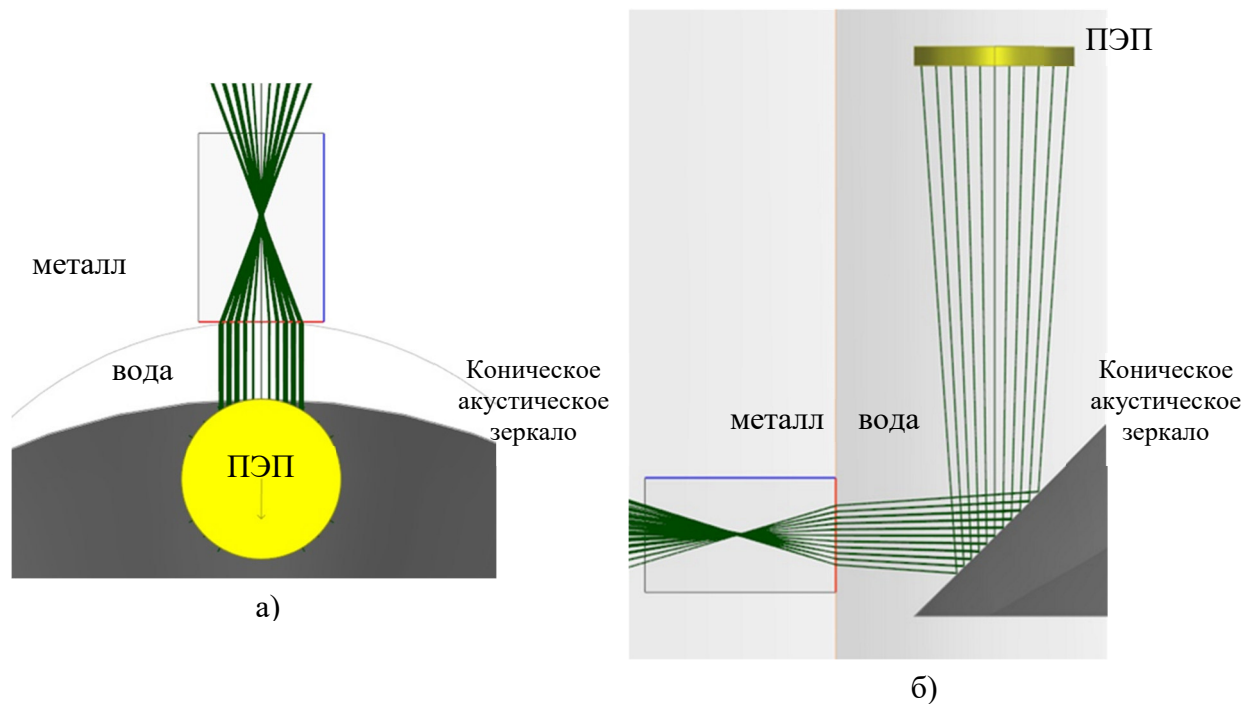


Рисунок 3 – Ход лучей в приближении геометрической оптики.
а) сечение, перпендикулярное к оси вращения заготовки, б) осевое

5.3.10 Для проведения мультizonного контроля с применением акустического зеркала был выбран сферически сфокусированный ультразвуковой ПЭП с центральной рабочей частотой 10 МГц, диаметром пьезопластины 25,4 мм и номинальным фокусным расстоянием по воде 152,4 мм. Выбор обусловлен тем, что из всех распространенных и используемых (ПЭП используются для контроля заготовок из титановых сплавов согласно стандарту SAE AMS 2636 [2]), этот ПЭП является наиболее острофокусным, что потенциально позволяет добиться максимально возможной чувствительности.

5.3.11 Для определения оптимальных геометрических параметров конического акустического зеркала в специализированном ПО было проведено математическое моделирование процесса распространения ультразвуковых колебаний. В качестве объекта контроля была построена 3D-модель заготовки из сплава BT25Y с центральным отверстием \varnothing 120 мм, внутри которого располагался датчик с акустическим зеркалом. Модель ультразвукового преобразователя была задана путём задания 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° . Путь по воде WP был задан как сумма расстояний от датчика до зеркала и от зеркала до поверхности детали ($a+b$), рисунок 4. Положение акустической оси датчика относительно края зеркала было выбрано таким образом, чтобы поток лучей полностью отражался от зеркала и при этом габариты зеркала и ПЭП исключали их касание поверхности заготовки с учётом допусков на диаметр центрального отверстия.

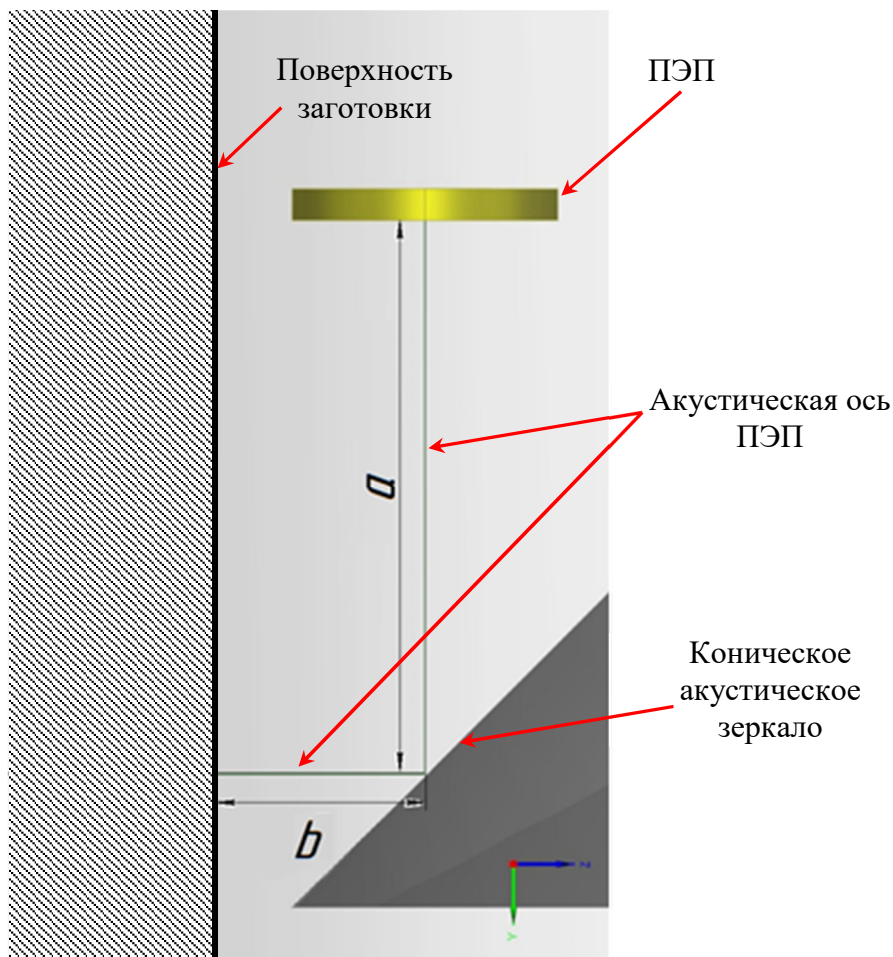


Рисунок 4 – Путь по воде при использовании акустического зеркала

Для реализации мультizonного контроля, диапазон глубин от 2,4 до 28 мм был разбит на 5 зон контроля. При моделировании путем подбора величин a , b , расстояний между осью ПЭП, осью конической поверхности зеркала и осью вращения заготовки, добивались фокусирования ультразвукового пучка в середину глубины каждой зоны контроля, как в осевом сечении, так и в поперечном. После того как были подобраны параметры для одной (самой глубокой) зоны контроля, было принято решение с помощью моделирования проверить возможность применения этого же зеркала для остальных зон контроля. Путем подбора значений a и b удалось добиться перекрытия всех зон контроля с использованием одного зеркала.

Расчётным и экспериментальным путём были оценены потери ультразвукового излучения на зеркале. Как может быть легко установлено при расчёте критических углов, при отражении продольных волн в воде от зеркала, изготовленного из любого материала со скоростью распространения сдвиговых волн более 3000 м/с, ультразвуковые волны испытывают так называемое полное внутреннее отражение, не предусматривающее каких-либо потерь энергии, при углах падения более 30°. Таким образом, в качестве материала для изготовления зеркала может быть использован практически любой металл. Для изготовления стандартных плоских акустических зеркал обычно используют нержавеющую сталь. Авторами был выбран коррозионностойкий алюминиевый сплав типа АМгб, с целью снижения веса оснастки и облегчения достижения высокой точности механической обработки.

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

Для отражения без потерь, шероховатость поверхности зеркала должна быть как минимум в 10 раз меньше длины ультразвуковой волны в воде. Поэтому шероховатость поверхности зеркала была ограничена величиной Ra 1,25 мкм, так как это самая низкая шероховатость, которую можно получить при чистовом фрезеровании на станке с ЧПУ.

На основании проведённых расчётов была разработана и изготовлена оснастка, обеспечивающая закрепление зеркала на ПЭП при проведении контроля. Так как для реализации контроля всех пяти зон с одним зеркалом была установлена необходимость изменения расстояния b между ПЭП и зеркалом, в конструкцию оснастки потребовалось добавить возможность перемещения зеркала в направлении акустической оси. Зеркало перемещается по направляющим в виде трёх 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 приведён на рисунке 5.



Рисунок 5 – Оснастка с коническим зеркалом, закрепленная на преобразователе

5.3.12 Расчёт параметров контроля и корректировочных коэффициентов для ввода ультразвуковых колебаний с криволинейных поверхностей с использованием нестандартной оснастки после настройки на плоские образцы.

Для настройки усиления и временной регулировки чувствительности (ВРЧ) при контроле с вводом ультразвуковых колебаний с криволинейных поверхностей, строго говоря, 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 ультразвукового контроля, с целью исключения необходимости изготовления большого количества образцов, часто допускается проведение настройки аппаратуры на плоских образцах, с последующим введением корректировок в усиление в каждой опорной точке кривой ВРЧ.

Современные автоматизированные установки для ультразвукового контроля, например, системы автоматизированного ультразвукового контроля, имеют даже специальную функцию автоматической подгрузки в настройку ВРЧ дефектоскопической аппаратуры корректировочных коэффициентов при переходе к контролю участка с той или иной кривизной поверхности ввода.

Подход, предусматривающий настройку на плоских образцах с последующей корректировкой настройки ВРЧ, был применен и для мультizonного контроля с применением конического акустического зеркала. Расчет корректировочных коэффициентов для ввода ультразвуковых колебаний с криволинейных поверхностей с использованием нестандартной оснастки после настройки на плоские образцы был проведен с помощью математического моделирования процессов, автоматизированного иммерсионного ультразвукового контроля в специализированном ПО.

Сначала провели расчет модели плоского образца из сплава ВТ8-1 с плоскодонным отражателем размером $\varnothing 0,8$ мм, залегающим на минимальной и максимальной глубинах зоны контроля, рисунок 6а. Для каждого отражателя было зафиксировано значение амплитуды эхо-сигнала, измеряемое в относительных единицах.

Затем был смоделирован образец с заданной криволинейной поверхностью ввода и центральным отверстием с плоскодонными отражателями на идентичных глубинах, рисунок 6б. Перед расчетом в данную модель вводилось калибровочное значение, полученное из расчета модели с плоской поверхностью ввода. По результатам расчета для каждого отражателя было зафиксировано падение амплитуды эхо-сигнала относительно контрольного отражателя.

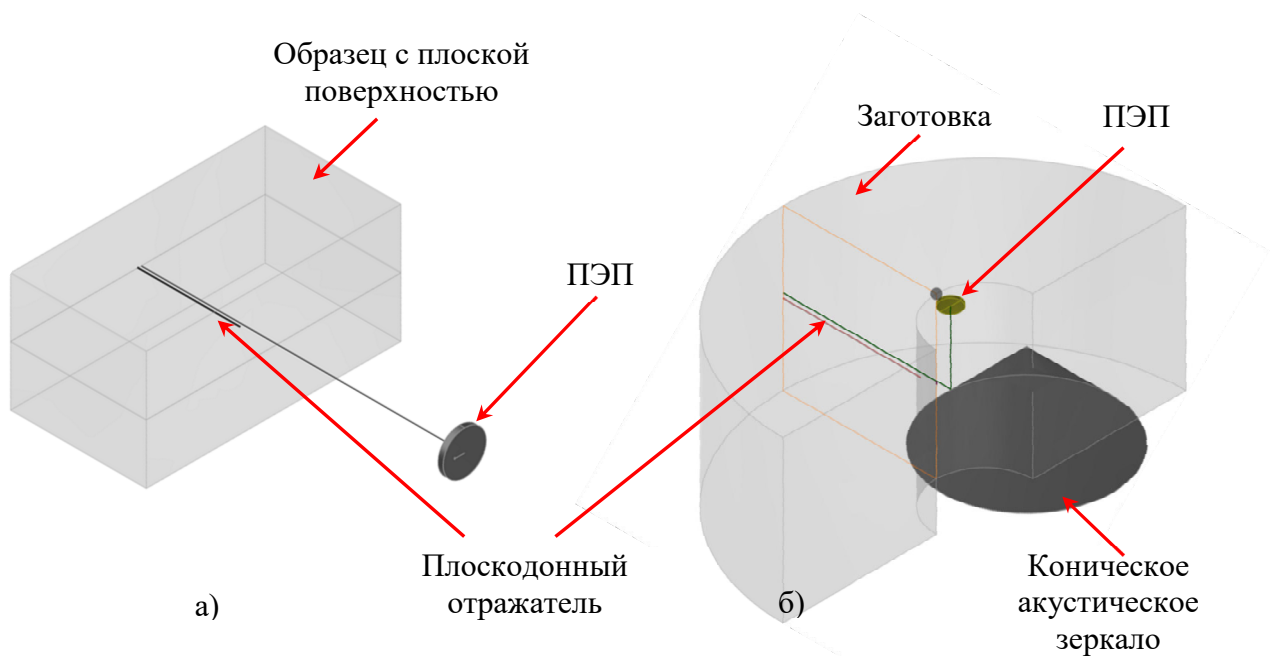


Рисунок 6 – Расчетные модели: а) – плоского образца, б) – цилиндрического образца с центральным отверстием

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 – что уменьшить.

Проведение испытаний изготовленной оснастки для подтверждения правильности её работы и оценки погрешности расчёта корректировочных коэффициентов

Поскольку применение конического акустического зеркала не имеет прецедентов в практике УЗК заготовок дисков, была запланирована проверка (верификация) правильности работы специализированного ПО и применяемой процедуры расчёта корректировочных коэффициентов. Для проведения верификации были изготовлены настроечные образцы с поверхностью ввода, имеющей кривизну, в точности соответствующую центральному отверстию заготовки – цилиндрической вогнутой с

радиусом кривизны 60 мм. Было изготовлено три отдельных образца, в каждом из которых выполнено по одному отражателю в виде плоскодонного отверстия диаметром 0,8 мм, рисунок 7. Образцы изготовлены из титанового сплава ВТ8-1.

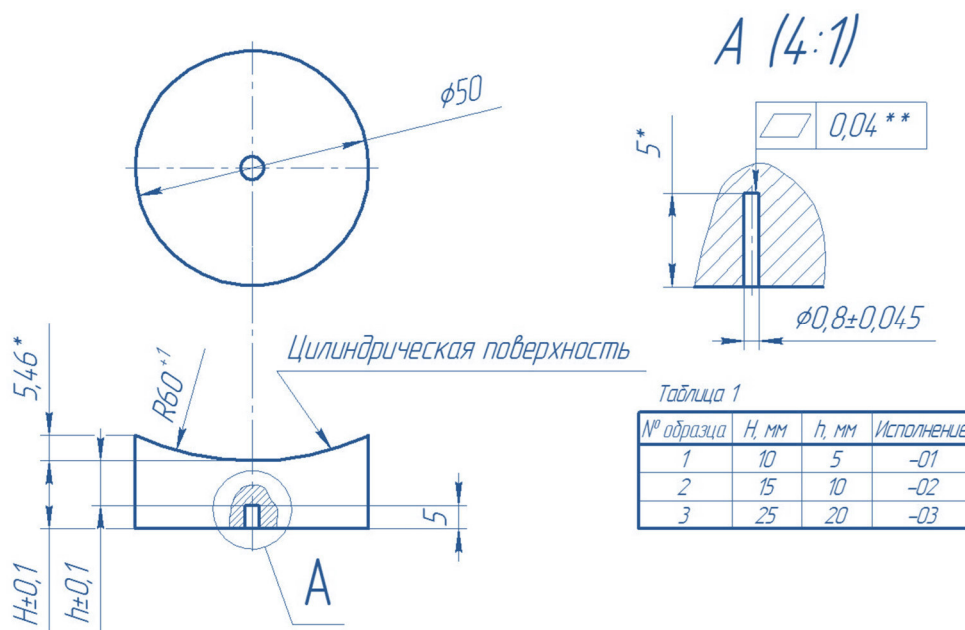


Рисунок 7 – Модельные образцы из титанового сплава с контрольными отражателями и криволинейной поверхностью ввода

Глубины залегания отражателей в образцах были взяты равными глубинам залегания отражателей в имеющихся настроечных образцах с плоской поверхностью ввода из сплава ВТ8-1 с контрольными отражателями диаметром 0,8 мм.

Настройка аппаратуры была выполнена на имеющихся плоских образцах описанным выше способом, и в полученную кривую ВРЧ были введены корректировочные коэффициенты, рассчитанные для указанных глубин отражателей. После установки на ПЭП оснастки с зеркалом, были замерены амплитуды эхосигналов от контрольных отражателей в образцах с криволинейной поверхностью ввода. Было оценено расхождение между амплитудами эхо-сигналов от трех отражателей в плоских образцах и амплитудами эхо-сигналов от таких же трех отражателей в образцах с криволинейной поверхностью R60, с учётом ведённых корректировочных коэффициентов.

Эксперименты проводились с использованием установки для иммерсионного ультразвукового контроля и ПЭП с номинальным фокусным расстоянием 6" в НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ.

Первоначально расхождение в результатах расчёта и результатах эксперимента составило более 3 дБ, и был поставлен ряд дополнительных экспериментов с целью поиска источника погрешности. Было установлено, что причиной расхождения стало использование при расчёте корректировочных коэффициентов номинального фокусного расстояния ПЭП (152,4 мм, или 6") вместо фактического, которое по результатам замеров

оказалось 6,5". В результате, процедура расчёта корректировочных коэффициентов была дополнена замером фактического значения фокусного расстояния ПЭП.

После этого коэффициенты были рассчитаны повторно под фактическое фокусное расстояние ПЭП, и повторно оценено расхождение между амплитудами эхо-сигналов от отражателей в плоских образцах и в образцах с криволинейной поверхностью, с учётом новых корректировочных коэффициентов. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Разница рассчитанных и экспериментальных данных

WP	Глубина залегания отражателя, мм	Корректировочный коэффициент, дБ	Амплитуда эхо-сигнала на плоском образце, дБ*	Амплитуда эхо-сигнала на криволинейном образце, дБ*	Ошибка, дБ
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 эхо-сигнала составляет 80% высоты экрана.

Как видно, погрешность расчёта корректировочных коэффициентов составляет не более 0,8 дБ. Таким образом, эксперимент показал очень высокую точность расчёта корректировочных коэффициентов: обычная погрешность изготовления настроечных образцов допускает разброс в амплитудах эхосигналов от отражателей ± 2 дБ (см., например, [1, 2]).

Также эксперимент показал высокую эффективность зеркала – при настройке на чувствительность 0,4 мм (0,8 мм с увеличением усиления на 12 дБ) на отражатель 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.

5.3.13 Недостатки и пути совершенствования предложенного технического решения:

Одним из самых существенных недостатков применения мультizonного ультразвукового контроля с использованием конического зеркала является достаточно высокая трудоёмкость контроля.

При опробовании оснастки было замечено, что детали из алюминиевого сплава всё-таки подвергаются коррозии в водопроводной воде, которая используется в качестве иммерсионной жидкости при ультразвуковом контроле. Одна из возможных причин этого – использование этих деталей в контакте с трубками из углепластика. Проблему удалось решить нанесением на зеркало анодно-окисного покрытия с пропиткой хромпиком.

Следующим шагом в решении этого вопроса - изготовление акустического зеркала из титанового сплава. Проблем с коррозионной стойкостью у титановых сплавов нет, но увеличение массы оснастки может привести к износу приводов угловых осей манипулятора установки.

При опробовании в условиях серийного производства специалистами было 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 быстросъёмных оснасток без движущихся частей с фиксированным расстоянием b вместо одной универсальной оснастки с подвижным зеркалом.

Разработанная оснастка не является универсальной: для каждого радиуса кривизны поверхности необходимо рассчитывать и изготавливать своё зеркало.

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 BT8-1 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 удаётся достичь глубин прозвучивания более 60 мм. Предварительные расчёты показывают, что применение набора зеркал с вогнутой конической поверхностью может позволить увеличить глубину прозвучивания со стороны наружной цилиндрической поверхности с 60 до 90 мм.

Список источников

1. AMS2628 «Ultrasonic Immersion Inspection Titanium and Titanium alloy Billet Premium Grade», SAE, 2019.
2. AMS2636 Rev. A «Ultrasonic Immersion Inspection Titanium and Titanium Alloy Forgings Premium Grade», SAE, 2016.
3. Alex Karpelson. "Bi-curved" Ultrasonic Transducers. The e-Journal of Nondestructive Testing - ISSN: 1435-4934 May 2006 • Issue Vol. 11 No.5.

6 Результат реализации разработки

6.1 Специалистами АО «ОДК-Авиадвигатель» и НИЦ «Курчатовский институт-ВИАМ» разработана технология АУЗК заготовок дисков компрессора с применением конического акустического зеркала.

6.2 Технология АУЗК заготовок дисков компрессора с применением конического акустического зеркала внедрена в технологический процесс изготовления заготовок у Поставщика.

7 Оценка новизны

7.1 Технология АУЗК заготовок дисков компрессора из титановых сплавов с применением конического акустического зеркала в производство внедряется впервые.