

РЕНТГЕНОСКОПИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КЕРАМИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ И ВОСКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ЛОПАТОК ГТД

Работа современного газотурбинного двигателя (ГТД) происходит в экстремальных условиях высоких температур и больших силовых нагрузок. Естественно, что столь сложный и ответственный агрегат, требует повышенного внимания к качеству составляющих его деталей. Поэтому производство лопаток ГТД – одного из наиболее важных элементов такого двигателя – требует большого объема контролируемых мероприятий для подтверждения качества лопатки, т. е. соответствия лопатки требованиям нормативно-технических документов.

Процесс производства лопаток ГТД состоит из нескольких этапов. Один из этапов – изготовление керамических стержней и восковых моделей лопаток ГТД. Керамический стержень имеет форму внутренней полости лопатки, а восковая модель – форму самой лопатки. Естественно, что качество изготовления керамических стержней и восковых моделей будет в значительной мере определять и качество самих лопаток ГТД. Следовательно, как и лопатка ГТД, керамические стержни и восковые модели проходят 100%-ный неразрушающий контроль (НК).

Среди методов НК для контроля качества керамических стержней и восковых моделей используют визуально-измерительный и рентгенографический методы. Визуальный осмотр деталей с применением лупы и измерительных инструментов – эффективное, быстрое и дешевое средство обнаружения недопустимых дефектов в керамических стержнях и восковых моделях. Основной его недостаток состоит в том, что с его помощью могут быть обнаружены только поверхностные дефекты. Рентгенографический метод заключается в рентгеновском просвечивании объекта контроля и получении изображения его проекции на рентгенограмме. При правильном выборе режимов и параметров рентгенографического контроля получают рентгеновские снимки высокого качества как по чувствительности, так и по разрешающей способности. Однако рентгенографический метод имеет ряд существенных недостатков:

- высокая трудоемкость, связанная с фотообработкой экспонированной радиографической пленки;
- высокая себестоимость контроля, обусловленная необходимостью применения дорогостоящей радиографической пленки.

Сочетание рентгенографического и визуально-измерительного методов контроля дает наиболее полную информацию о наличии в рассматриваемых объектах контроля (ОК) недопустимых дефектов различного характера [1], хотя в целом контроль малопроизводителен и дорог. Для того чтобы избавиться от присущих ему недостатков, в лаборатории НК ВИАМ были проведены исследования рентгеноскопического контроля керамических стержней и восковых моделей. Рентгеноскопический метод основан на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в световое изображение с помощью рентгенооптического преобразователя. Получаемое изображение анализируют в процессе контроля, т. е. в реальном времени, непосредственно на экране преобразователя, при этом отпадает необходимость использования радиографической пленки и всех технологических этапов, связанных с ее зарядкой в кассеты, фотообработкой, сушкой, что значительно удешевляет контроль и делает его более производительным. Это особенно важно при большом количестве объектов контроля на предприятиях с массовым производством. Помимо этого рентгеноскопия имеет ряд дополнительных преимуществ перед рентгенографией:

- непосредственно в процессе контроля можно менять ее режимы и параметры, добиваясь наилучшего качества изображения (в рентгенографии для получения оптимального режима контроля необходимо проведение расчета режима контроля и получение пробного снимка с последующей корректировкой режима);
- простота оптимизации качества светотеневых изображений при рентгеноскопии дает оператору возможность увеличивать размеры изображения ОК; осуществлять пе-

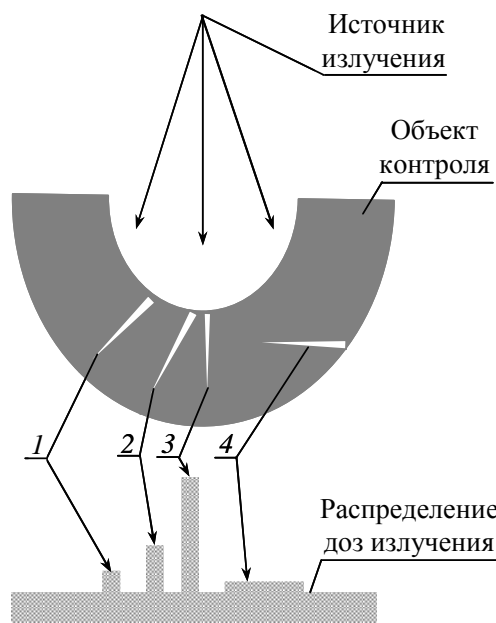
ремещение ОК по линии источник–преобразователь, его поворот или смещение, чтобы подобрать оптимальное направление излучения относительно ОК;

– если ОК неоднороден по плотности или имеет переменную толщину, и трудно анализировать отдельные детали светотеневого изображения, в рентгеноскопии можно использовать подвижные фильтры, изменяющие дозу излучения, взаимодействующую с преобразователем, или последовательно увеличивать энергию фотонов, изучая области ОК с разной степенью поглощения [2, 3]. В рентгенографическом методе такие вариации привели бы к большому числу экспозиций, а следовательно, и к большому расходу радиографической пленки и возрастанию трудоемкости контроля, поэтому такие подходы в рентгенографии практически не применяются.

При контроле керамических стержней и восковых моделей лопаток ГТД, имеющих сложную геометрическую поверхность пера и замка, могут встречаться различные дефекты, такие как поры, раковины, инородные включения. Особенно коварными дефектами являются мелкие трещины, не видимые глазом и иногда не обнаруживаемые при визуальном-измерительном контроле. Посредством рентгеновского контроля их обнаружение также сложно, так как трещина относится к числу плоскостных дефектов, а область применения рентгеновского метода НК – «объемные» дефекты. В дефектоскопии к «объемным» относятся дефекты, имеющие размеры одного порядка во всех направлениях, в отличие от плоскостных дефектов, у которых размер в одном из направлений на 1–3 порядка меньше, чем в остальных. Трещина представляет собой плоскостной дефект, поэтому гарантированное обнаружение ее рентгеновским методом обусловлено ее ориентацией по отношению к пучку излучения. На рис. 1 условно показана различная ориентация трещины (1, 2, 3, 4) внутри монолитного тела (объекта контроля), ограниченного криволинейной поверхностью, просвечиваемого пучком рентгеновского излучения, и распределение доз излучения за объектом контроля. Так, для трещины 3 (см. рис. 1) центральный луч ориентирован параллельно ее плоскости и попадает в раскрытие трещины.

С точки зрения полезной информации, это наиболее благоприятное расположение трещины. Напротив, для дефекта 4 ориентация по отношению к пучку излучения наименее благоприятная. При своем малом раскрытии трещина 4 может быть пропущена при контроле. Чтобы этого не произошло, рентгеновский контроль необходимо проводить за несколько экспозиций. В рентгеноскопии при наличии устройства, обеспечивающего относительное перемещение ОК перед экраном, эта задача решается быстро и просто, тогда как в рентгенографии необходимо получение большого количества снимков.

Рис. 1. Схема формирования полезной информации о наличии плоскостных дефектов (1, 2, 3, 4) при рентгеновском контроле



Но необходимо помнить, что по способности выявления дефектов рентгенография превосходит рентгеноскопию. Поэтому замена рентгенографического метода на рентгеноскопический возможна лишь в том случае, когда чувствительность выявления дефектов при рентгеноскопии не хуже, чем при рентгенографии. В работе приведены описание и результаты теоретических и экспериментальных исследований возможности применения рентгеноскопического контроля керамических стержней и восковых моделей лопаток ГТД.

Керамический стержень и восковая модель – как объект рентгеноскопического контроля. Теоретический расчет минимально выявляемого дефекта рентгеноскопическим методом контроля

Для рентгеновского контроля таких объектов, как керамический стержень или восковая модель, выполненных из материалов, имеющих относительно невысокую плотность и невысокий коэффициент ослабления излучения, необходимо рентгеновское излучение в диапазоне энергии 20–40 кэВ. Для расчета коэффициентов ослабления рентгеновского излучения соединением Al_2O_3 была использована стандартная методика [3]. Массовый коэффициент ослабления излучения соединений μ/ρ (μ – линейный коэффициент ослабления; ρ – плотность) представляет собой среднее массовых коэффициентов ослабления составляющих элементов с учетом пропорционального содержания компонентов a и b (в % по массе) $R(a)$; $R(b)$:

$$\mu/\rho = \mu/\rho(a) R(a) + \mu/\rho(b) R(b).$$

Для Al_2O_3 с массовым числом и плотностью для алюминия и кислорода соответственно $m_{Al}=27$ а.е.м. (атомная единица массы); $\rho_{Al} = 2,7$ г/см³ и $m_O=17$ а.е.м.; $\rho_O=1,41$ г/см³

$$\mu/\rho_{Al_2O_3} = 0,13\mu_{Al} + 0,34\mu_O,$$

где $\mu_{Al_2O_3}$; μ_{Al} ; μ_O – линейные коэффициенты ослабления излучения оксидом алюминия, алюминием, кислородом соответственно, см⁻¹.

В табл. 1 приведены результаты расчетов массовых и линейных коэффициентов ослабления рентгеновского излучения в диапазоне энергий от 0,02 до 0,15 кэВ.

Оптимальный режим контроля соответствует значению анодного напряжения, при котором выполняется условие: $\mu d \geq 2$ (d – толщина слоя поглотителя, см).

Чувствительность (наименьший видимый дефект δ) радиоскопического контроля [3, 4]:

$$\delta = \frac{2,3\Delta b}{g} \cdot \frac{B}{\mu} = \frac{2,3\Delta b}{g \cdot \mu} = \frac{2,3\Delta b}{\mu},$$

где $\Delta b = b_{\text{деф}} - b_{\text{ф}}$ – превышение яркости свечения экрана, соответствующего дефектному участку $b_{\text{деф}}$, над фоновым значением яркости $b_{\text{ф}}$; g – градиент световой характеристики преобразователя (для рентгеноскопических систем $g=1$); B – фактор накопления рассеянного излучения (для рентгеноскопического контроля $B=1$).

Таблица 1

Массовые и линейные коэффициенты ослабления рентгеновского излучения оксидом алюминия Al_2O_3 *

Энергия рентгеновского излучения, кэВ	μ/ρ , см ² /г	μ , см ⁻¹
20	0,942	3,70
40	0,146	0,573
660	0,115	0,452
80	0,095	0,373
100	0,089	0,349
150	0,072	0,282

* Массовое число и плотность Al_2O_3 : $m=105,4$ а.е.м.; $\rho=3,93$ г/см³.

По данным [4, 5], пороговое значение $\Delta b_{\text{пор}}=0,05$ – минимальная различимая глазом разница двух яркостей при фоновых значениях яркости в диапазоне 30–10000 кд/м². Тогда:

$$\delta = \frac{0,115}{\mu}.$$

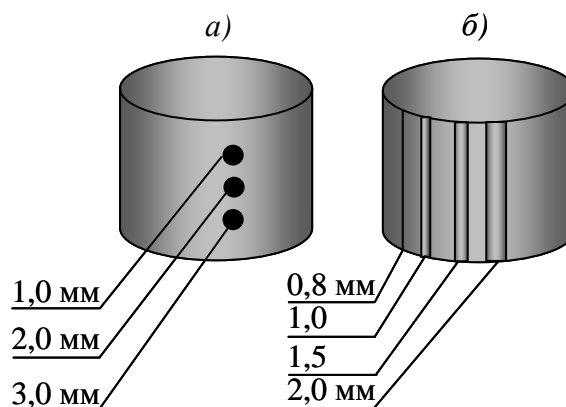
Таким образом, чувствительность контроля зависит только от энергии излучения. Это значение теоретически получено для дефектов, размеры которых в плоскости, перпендикулярной излучению, соизмеримы с величиной δ , без учета геометрической и собственной нерезкости.

Экспериментальная оценка выявляемости трещин на рентгеноскопической установке «Норка»

Для оценки чувствительности и выявляемости трещин были изготовлены рабочие образцы из воска с искусственными дефектами (рис. 2), представляющие собой цилиндр диаметром 50 мм и высотой 10 мм. В первом образце (рис. 2, а) для определения чувствительности в цилиндрической поверхности вдоль образующей просверлены три лунки глубиной 1,0; 2,0; 3,0 мм. Второй образец содержал искусственные трещины с раскрытием 0,8; 1,0; 1,5; 2,0 мм (рис. 2, б), для определения выявляемости трещин разной глубины рентгеноскопической системой.

Рис. 2. Рабочие образцы:

а – образец №1 – для определения чувствительности (цифры – глубина дефектов в виде лунок); б – образец №2 – для определения выявляемости трещины (цифры – величина раскрытия трещины)



В качестве контролирующей системы была использована рентгеноскопическая установка «Норка», состоящая из микрофокусного рентгеновского аппарата РАП150-М, и системы преобразования радиационного изображения в цифровое на основе люминесцентного экрана.

Параметры контроля выбирали в процессе контроля по максимальной чувствительности. Для определения чувствительности контроля использовали рабочий образец №1 (см. рис. 2, а). Режим контроля: анодное напряжение 90 кВ, анодный ток 90 мкА.

При определении влияния раскрытия трещины (или внутреннего плоскостного дефекта) на выявляемость (угол наклона к просвечиваемой плоскости), рабочий образец №2 (см. рис. 2, б) поворачивали вокруг оси, перпендикулярной направлению просвечивания, фиксируя момент, когда изображение трещины меняется от наилучшего до полного исчезновения. Координата, при которой изображение трещины наилучшее, считали нулевой, от нее отсчитывали угол поворота, при котором изображение трещины исчезало полностью. Результаты измерений представлены в табл. 2 и показаны на графике (рис. 3).

Выявляемость трещины

Раскрытие трещины, мм	0,8	1	1,5	2
Угол поворота, фиксирующий исчезновение трещины на экране преобразователя, град	18	20	25	28



Рис. 3. Зависимость выявляемости трещины от ее ориентации по отношению к пучку излучения

Для проверки полученных значений проведены рентгеноскопические исследования образцов керамических стержней и восковых моделей с реальными дефектами. На рис. 4 показаны образцы керамических стержней и восковых моделей, на которых проводили рентгеноскопические исследования и отработку технологии. Некоторые из образцов содержали дефекты, в основном трещины, выявляемые еще на этапе визуально-измерительного контроля. На первом этапе рентгеновского исследования образцы просвечивали на радиографическую пленку D5, а затем, на втором этапе, их исследовали на рентгеноскопической установке «Норка» (рис. 5 и 6). В табл. 3 приведены перечень исследуемых образцов с содержащимися в них дефектами и результаты рентгеноскопических и рентгенографических исследований.

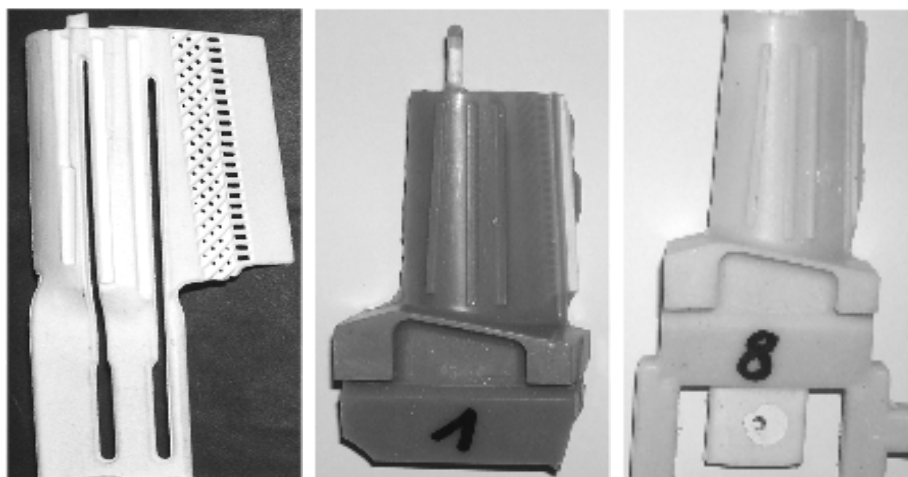


Рис. 4. Керамические стержни и восковые модели

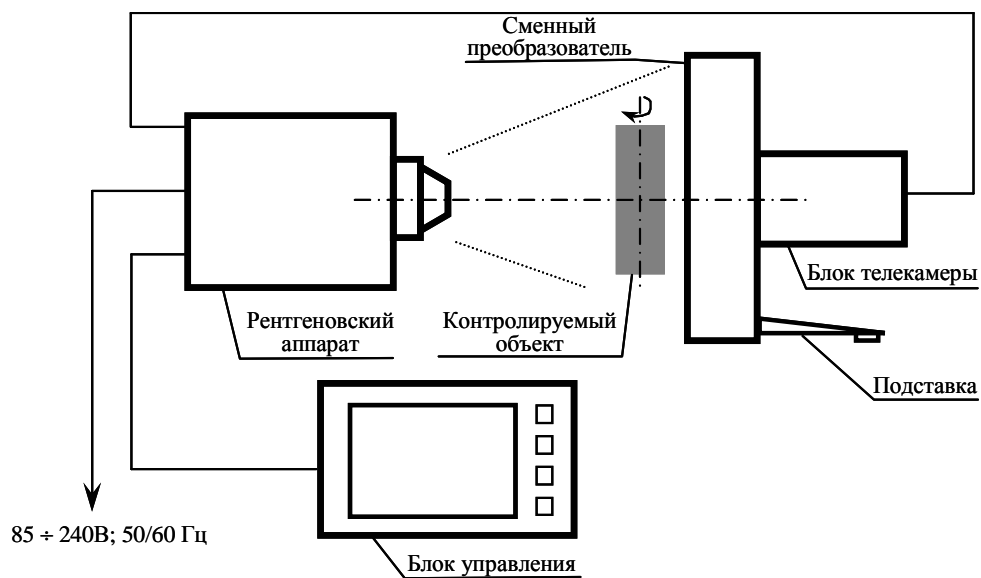


Рис. 5. Блок-схема рентгеноскопической установки «Норка»

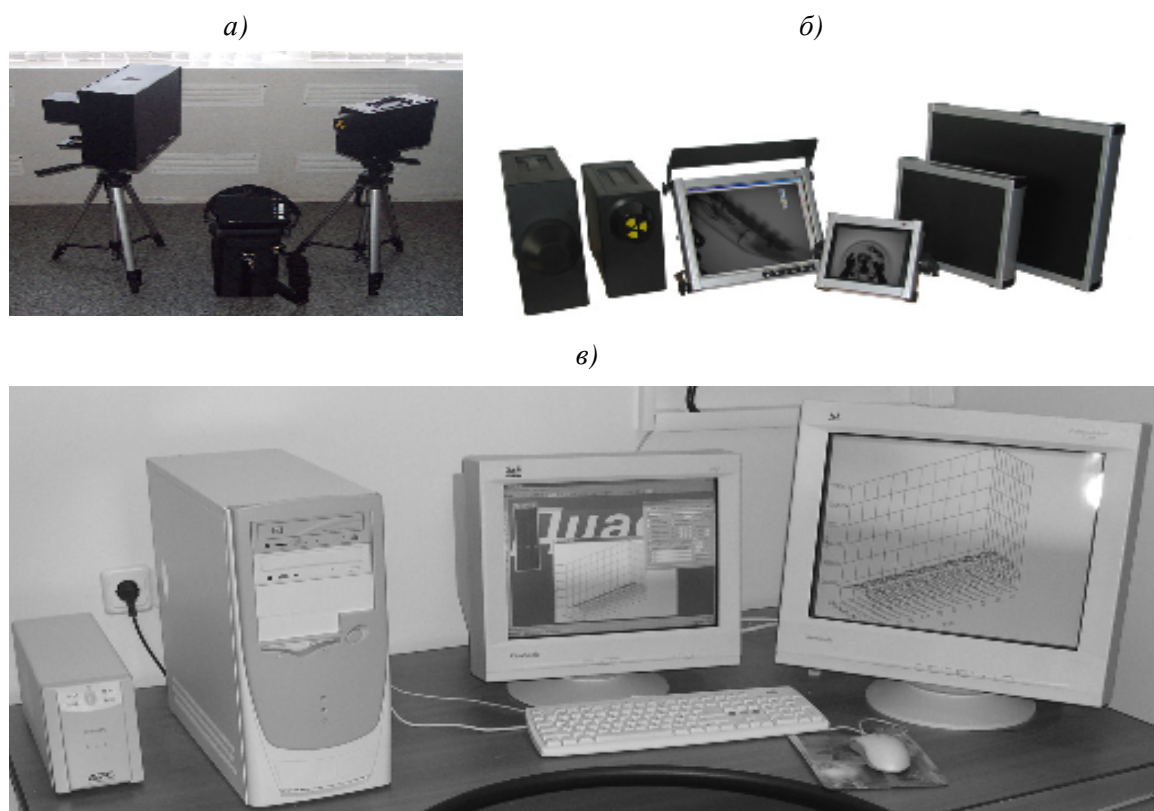
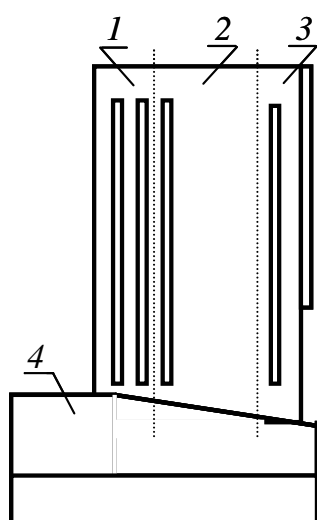


Рис. 6. Рентгеноскопическая установка «Норка»:
а – рентгеноскопическая установка «Норка» на штативном устройстве; *б* – рентгеноскопическая установка «Норка» с набором рентгенооптических преобразователей; *в* – блок обработки изображений

Результаты исследований образцов керамических стержней и восковых моделей

Вид образца	Дефекты, содержащиеся в образце	Результат исследований	
		рентгенографических	рентгеноскопических
Керамический стержень	Поперечная трещина по перу Продольная трещина по перу	Обнаружена Не обнаружена при первом просвечивании	Обнаружена Обнаружена
Фрагмент керамического стержня	Включения	Обнаружены	Обнаружены
Восковая модель с керамическим стержнем	Поперечная трещина по перу Без дефектов	Обнаружена Показано отсутствие дефектов	Обнаружена
Образцы из керамики с восковым нанесением, имитирующие объект контроля	С различными искусственными дефектами	Обнаружены	Обнаружены



Перед началом контроля предварительно проводили разметку ОК на участки (рис. 7). Участки маркировали свинцовыми знаками. Контроль каждого размеченного участка стержня проводили отдельно.

После маркировки керамический стержень или восковую модель лопатки ГТД укрепляли перед окном излучателя в манипуляторе, служащем для установки и удержания ОК в зоне рабочего пучка излучения (рис. 8).

Рис. 7. Разметка ОК на участки контроля 1, 2, 3, 4

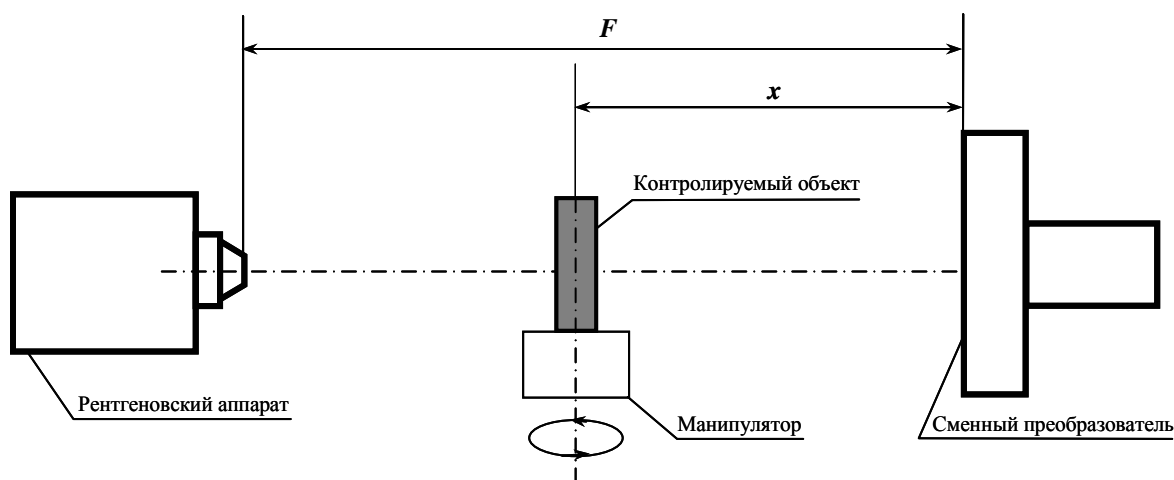
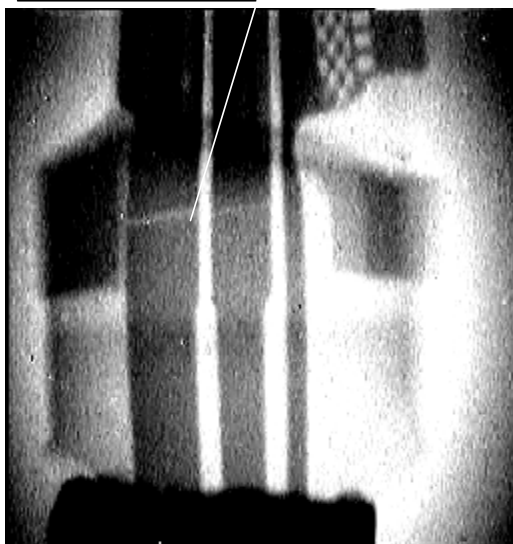


Рис. 8. Схема рентгеноскопического контроля керамических стержней и восковых моделей

Поперечная трещина



Продольная трещина

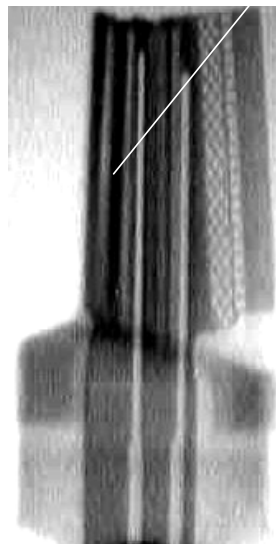


Рис. 9. Радиоскопические изображения стержней с трещинами

Манипулятор представляет собой устройство, осуществляющее вращение ОК вокруг оси, прямолинейное и перпендикулярное его перемещение вдоль направления «источник–преобразователь». Контроль всего керамического стержня или восковой модели ГТД проводили последовательно, переходя от одного размеченного участка к другому. На рис. 9 показаны рентгеноскопические изображения двух стержней с трещинами, которые не были обнаружены на рентгеновском снимке из-за неблагоприятного расположения трещин по отношению к пучку излучения.

Таким образом, в работе получены следующие результаты.

– Проведен расчет коэффициентов ослабления рентгеновского излучения керамикой и техническим воском. По пороговым значениям оптического контраста и яркости экрана преобразователя дана оценка чувствительности контроля.

– В результате проведенного рентгеноскопического контроля керамического стержня обнаружена трещина длиной 5 мм, глубиной 0,2 мм и раскрытием 0,1 мм, которая не выявлена на рентгенографическом снимке.

– Показана возможность полной замены рентгенографического контроля керамических стержней и восковых моделей лопаток ГТД на рентгеноскопический контроль без ухудшения качества проводимого контроля. Разработаны основные этапы технологии рентгеноскопического контроля керамических стержней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль: Справочник, т. 1, кн. 2 /Соснин Ф.Р.– М.: Машиностроение, 2003, 560 с.
2. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник /Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Филинов В.Н. и др.– М.: Машиностроение, 1995, 488 с.
3. Румянцев С.В., Штань А.С., Гольцев В.А. Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля.– М.: Энергоиздат, 1982, 240 с.
4. Рентгенотехника: Справочник в 2-х кн. /Под ред. Клюева В.В.– 2 изд. перераб. и доп.– М.: Машиностроение, 1992.
5. Клюев В.В., Соснин Ф.Р. Теория и практика радиационного контроля: Учебн. пособие для студентов вузов.– М.: Машиностроение, 1998, 170 с.