

## **МЕТОДЫ РЕНТГЕНОВСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Рассмотрены некоторые аспекты применения рентгеновских методов неразрушающего контроля изделий сложной формы для объектов ответственного назначения.*

*Ключевые слова: рентгенография, рентгеноскопия, восковая модель, керамический стержень, жаропрочный сплав, микропора.*

Рентгеновский неразрушающий контроль традиционно применяют для контроля качества отливок. Обычно используют рентгенографический метод, при котором на радиографической пленке получают изображение проекции объекта контроля в направлении оси пучка излучения. В производстве авиационных двигателей, все узлы и детали (в том числе и турбинные лопатки) которых представляют собой ответственные объекты, рентгеновский контроль проводят обязательно и неоднократно на разных стадиях техпроцесса. Сложнейшая конструкция турбинной лопатки современных авиационных двигателей, экстремальные условия ее эксплуатации требуют ее высокого качества и, следовательно, усовершенствования технологии рентгеновского контроля.

Система охлаждения турбинной лопатки представляет собой многоконтурную внутреннюю полость, задающую направление потоку воздуха. В процессе производства внутреннюю полость формируют керамические стержни, установленные в восковой модели лопатки.

Качество керамических стержней, находящихся в восковой модели, проверяют, используя рентгенографический метод. При правильном выборе режимов и параметров контроля достигают высокого качества рентгеновских снимков как по чувствительности, так и по разрешающей способности, и все же рентгенографический метод имеет недостатки, которые диктуют поиск ему альтернативы. К недостаткам рентгенографического метода относятся: во-первых и прежде всего, его высокая трудоемкость, связанная с фотообработкой экспонированной радиографической пленки, во-вторых, высокая стоимость самой радиографической пленки. При контроле керамических стержней, имеющих сложную геометрическую поверхность пера и замка, появляется еще один аспект не в пользу применения рентгенографического метода. Особенно опасными в таких изделиях являются мелкие, не видимые глазом трещины. Их обнаружение проводится рентгенографическим методом, который способен надежно выявлять трещины при условии, когда ось пучка рентгеновского излучения совпадает с плоскостью трещины. Учитывая сложную криволинейную поверхность керамического стержня, для надежного обнаружения трещин рентгенографический контроль необходимо проводить за несколько экспозиций при различной ориентации стержня относительно пучка рентгеновского излучения, что делает процесс более трудоемким и дорогостоящим.

В качестве альтернативы рентгенографическому методу возможно применение рентгеноскопического метода контроля, основанного на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в светотеневое изображение на экране радиационно-оптического преобразователя. Рентгеноскопический метод характерен тем, что его процесс проходит в «реальном времени» и позволяет исследовать объект контроля под разными ракурсами, что существенно повышает возможность выявления трещин. Оптимальные режимы и параметры рентгеноскопического контроля выбираются непосредственно при проведении исследований

по изображению эталонного объекта, содержащего несплошности известного размера. Таким образом, перемещая изделие перед окном преобразователя рентгеноскопической установки, можно с минимальными временными затратами провести контроль восковой модели с керамическим стержнем.

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  $Al_2O_3$  воспользуемся стандартной методикой [1]. Массовый коэффициент ослабления излучения соединений  $\mu/\rho$  ( $\mu$  – линейный коэффициент ослабления излучения;  $\rho$  – плотность) представляет собой среднее массовых коэффициентов ослабления составляющих элементов с учетом пропорционального содержания компонентов  $a$  и  $b$  (в % по массе)  $R(a)$  и  $R(b)$ :

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

Для  $Al_2O_3$  с массовым числом и плотностью для алюминия и кислорода соответственно  $m_{Al}=27$  а. е. м,  $\rho_{Al}=2,7$  г/см<sup>3</sup> и  $m_O=17$  а. е. м,  $\rho_O=1,41$  г/см<sup>3</sup>

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

где  $\mu_{Al_2O_3}$ ,  $\mu_{Al}$ ,  $\mu_O$  – линейные коэффициенты ослабления излучения оксидом алюминия, алюминием и кислородом соответственно, см<sup>-1</sup>.

В таблице приведены результаты расчетов массовых и линейных коэффициентов ослабления рентгеновского излучения в диапазоне энергий от 20 до 150 кэВ.

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

Чувствительность (наименьший видимый дефект  $\delta$ ) рентгеноскопического контроля:

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

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

#### Массовые и линейные коэффициенты ослабления рентгеновского излучения

| Энергия рентгеновского излучения, кэВ | Массовые и линейные коэффициенты ослабления ( $\mu/\rho$ и $\mu$ ) $Al_2O_3$ ( $m=105,4$ а. е. м; $\rho=3,93$ г/см <sup>3</sup> ) |                          |
|---------------------------------------|---|--------------------------|
|                                       | $\mu/\rho$ , см <sup>2</sup> /г   | $\mu$ , см <sup>-1</sup> |
| 20                                    | 0,942   | 3,70                     |
| 40                                    | 0,146   | 0,573                    |
| 60                                    | 0,115   | 0,452                    |
| 80                                    | 0,095   | 0,373                    |
| 100                                   | 0,089   | 0,349                    |
| 150                                   | 0,072   | 0,282                    |

Пороговое значение  $\Delta b_{\text{пор}}=0,05$ , минимальная различимая глазом разница двух яркостей при фоновых яркостях – в диапазоне 30–10000 кд/м<sup>2</sup>. Тогда:

$$\delta = 0,115/\mu.$$

Таким образом, чувствительность контроля зависит только от энергии излучения. Это значение теоретически получено для дефектов, размеры которых в плоскости,

перпендикулярной излучению, соизмеримы с величиной  $\delta$ , – без учета геометрической и собственной нерезкости [2].

Результаты исследования и опробования рентгеноскопического метода на индикаторах качества изображения (ИКИ), содержащих искусственно выполненные дефекты в виде трещин, показали, что элементы ИКИ с минимальными размерами надежно воспроизводятся на рентгеноскопическом изображении объекта контроля (ОК). В результате отработки режимов и параметров контроля на большом числе образцов, исследования реальных керамических стержней и восковых моделей лопаток ГТД была разработана технология рентгеноскопического контроля восковых моделей и керамических стержней, которая гарантирует обнаружение трещин глубиной 0,2 мм и более, раскрытием не менее 0,1 мм и протяженностью 5 мм и более. Для оценки качества получаемых рентгеноскопических изображений был изготовлен альбом эталонных рентгеноскопических снимков образцов восковых моделей и керамических стержней. На рис. 1 показаны изображения дефектов, обнаруженных рентгеноскопическим методом.

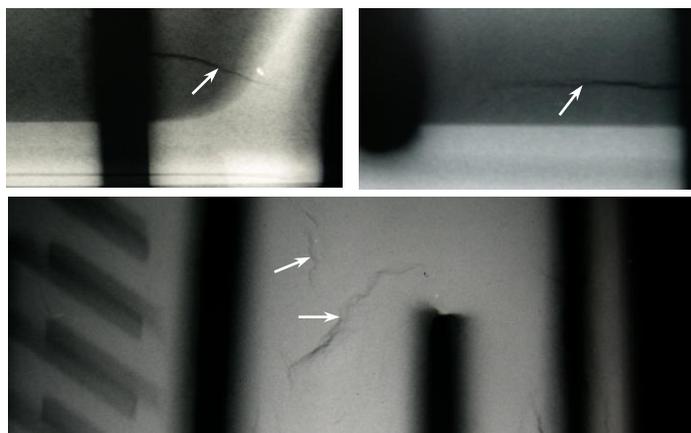


Рис. 1. Дефекты керамического стержня в восковых моделях лопаток ГТД

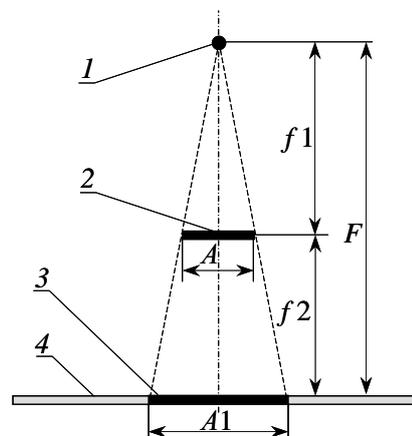


Рис. 2. Схема проекционной микрорентгенографии:

1 – источник излучения; 2 – элемент ОК; 3 – изображение элемента ОК; 4 – преобразователь

Подход к решению задач по выявлению малоcontrastных и трудно выявляемых несплошностей был использован для выявления микропористости в образцах жаропрочных сплавов рентгенографическим методом.

Установлено, что в никелевых сплавах с направленной кристаллизацией, из которых отливают турбинные лопатки современных авиационных двигателей, возможно образование микропористости литейного характера, представляющей собой наличие пустот в междендритных пространствах. Величина микропористости зависит от условий протекания направленной кристаллизации. Размеры микропор могут составлять 1÷100 мкм. Традиционным рентгенографическим методом микропористость обнаружить не удастся. Для повышения пространственного разрешения и получения возможности обнаруживать поры с размером 5–50 мкм был применен метод микрорентгенографии, для реализации которого используют микрофокусные (с фокусным пятном от 2 до 100 мкм) источники рентгеновского излучения, при которых геометрическая нерезкость получаемого изображения практически отсутствует [3]. Схема получения увеличенного изображения показана на рис. 2.

Рассчитаем величину увеличения размера элемента ОК при разных параметрах схемы контроля. Схема проекционного контроля представлена на рис. 2, где  $A$  – истинный

размер некоторого элемента ОК,  $A1$  – размер его увеличения,  $F$  – расстояние между источником излучения  $I$  и преобразователем  $4$ ,  $f1$  – расстояние между источником излучения  $I$  и элементом ОК  $3$ ,  $f2$  – расстояние между элементом ОК и преобразователем.

Исходя из подобия треугольников (см. рис. 2), можно записать:

$$\frac{A1}{A} = \frac{F}{f1}.$$

Если учесть, что увеличение размеров элемента ОК

$$B = \frac{A1}{A}, \text{ и } F = f1 + f2, \text{ то получим:}$$

$$B = \frac{f1 + f2}{f1} = \frac{1 + \frac{f2}{f1}}{1} = 1 + \frac{f2}{f1}.$$

Исходя из полученного соотношения, можно сделать вывод, что увеличение  $B$ , зависит от расположения элемента ОК относительно источника и преобразователя. Причем увеличение изображения элемента ОК прямо пропорционально расстоянию между элементом ОК и преобразователем и обратно пропорционально расстоянию между источником излучения и элементом ОК.

Для экспериментальных исследований разработаны специальные образцы из сплавов на никелевой основе, содержащие микропористость от 10 до 50 мкм, на которых проведена отработка режимов и параметров контроля. По полученным рентгенографическим изображениям установлены предельные размеры обнаруженных микропор (10–50 мкм в образцах толщиной 0,5–3,0 мм) микрорентгенографическим методом. На рис. 3 показаны рентгенографические снимки образцов жаропрочных сплавов с выявленными микропорами.

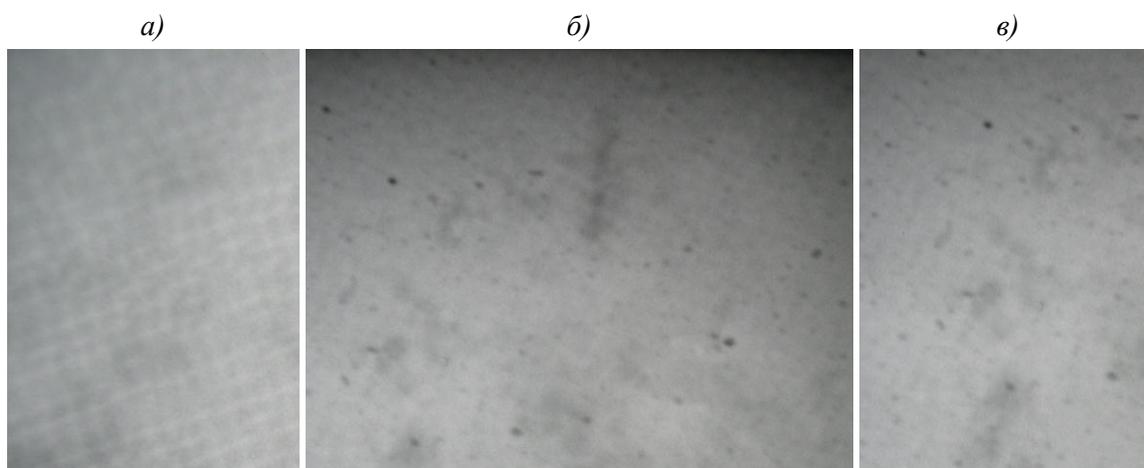


Рис. 3. Рентгенографические снимки образцов жаропрочных сплавов с выявленными микропорами:

*a* – образец без дефектов; *б*, *в* – образцы с порами 20–40 мкм

В процессе работы определены оптимальные размеры зоны на заготовках лопаток из жаропрочных сплавов на никелевой основе, содержащие микропористость. Экспериментально установлено, что оптимальный размер зоны контроля, содержащей микропористость величиной от 10 до 30 мкм, составляет 45×8 мм при контроле выходной кромки пера лопатки. Для обнаружения микропористости величиной от 30 до 50 мкм размер зоны контроля может быть увеличен и составляет 45×14 мм и 25×20 мм на входной кромке пера и замка лопатки.

Результаты исследования и опробования рентгеноскопического метода на индикаторах качества изображения (ИКИ), содержащих искусственно выполненные дефекты в виде трещин, показали, что элементы ИКИ с минимальными размерами надежно воспроизводятся на рентгеноскопическом изображении объекта контроля (ОК).

В результате отработки режимов и параметров контроля на большом числе образцов, реальных керамических стержнях и восковых моделях лопаток ГТД возможно гарантированное обнаружение в керамических стержнях и восковых моделях трещин глубиной 0,2 мм и более, раскрытием не менее 0,1 мм и протяженностью 5 мм и более.

Установлены предельные размеры обнаруженных микропор микрорентгенографическим методом в образцах толщиной 0,5–3,0 мм: 10–30 мкм – при контроле выходной кромки, 30–50 мкм – для входной кромки и зоны замка лопатки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Добромыслов В.А., Жаркова Л.В. Интегральные (эффективные) и дифференциальные линейные коэффициенты ослабления рентгеновского излучения и эффективные факторы накопления рассеянного излучения //Дефектоскопия. 1985. № 1. С. 10–30.
2. Ключев В.В., Соснин Ф.Р. Теория и практика радиационного контроля: Учебное пособие для студентов вузов. М.: Машиностроение. 1998. 170 с.
3. Добромыслов В.А. Радиационные методы неразрушающего контроля. М.: Машиностроение. 1999, 104 с.