

ненциальную аппроксимацию зависимости $P=f(t)$. Относительная погрешность будет находиться в пределах 10%.

– Если же в рассматриваемом диапазоне изменение толщины меньше 40% от средней толщины, то возможно использование как линейной, так и экспоненциальной аппроксимации зависимости $P=f(t)$.

– При измерении толщины объекта необходимо иметь образцы толщиной больше и меньше толщины исследуемого объекта.

К.Г. Мирошин, Е.И. Косарина

МИКРОРАДИОГРАФИЧЕСКИЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Работа многих современных агрегатов, деталей и машин происходит в экстремальных условиях: при высоких температурах и больших силовых нагрузках, которые зачастую имеют не статический, а циклический характер. С каждым годом рабочие условия лишь усложняются, а требования к безопасности работы ужесточаются. Особенно это заметно для такой быстро развивающейся отрасли в мире, как авиация, где подчас требуется проведение 100%-ного контроля деталей в партии, что может обеспечить только неразрушающий контроль (НК). Одним из основных видов НК, широко применяемым в производстве изделий авиационной техники, является рентгеновский, основанный на ослаблении рентгеновского излучения материалами. Степень ослабления зависит от свойств изделия и материала, из которого оно изготовлено: чем выше плотность материала, чем толще слой поглотителя, тем выше степень ослабления рентгеновского излучения. Теневая картина представляет собой распределение экспозиционной дозы или мощности дозы рентгеновского излучения. Поэтому в местах наличия дефектов в объекте контроля (ОК), т. е. в местах нарушения целостности, рентгеновское излучение иначе поглощается – по сравнению с бездефектными участками ОК. Распределение экспозиционной дозы излучения или мощности экспозиционной дозы за ОК называют радиационным изображением, мерой полезной информации которого является радиационный контраст $K_{\text{рад}}$ (относительная разница мощности дозы или дозы излучения между участками, соответствующими дефектному и бездефектному местам ОК). Далее радиационное изображение преобразуется в оптическое с контрастом $K_{\text{опт}}$, посредством радиографической пленки или другого преобразователя. Соотношение между оптическим и радиационным контрастами изображений определяется градиентом преобразования γ :

$$K_{\text{опт}} = \gamma \cdot K_{\text{рад}},$$

где $\gamma=3-4$ – для рентгенографического метода; $\gamma=1$ – для радиоскопического метода при непосредственном наблюдении изображения; $\gamma>1$ – для радиоскопического метода при использовании телевизионной системы [1].

Рентгенографический метод НК – метод неразрушающего контроля, основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в радиографический снимок или запись этого изображения на запоминающем устройстве с последующим преобразованием в световое изображение. Основным преобразователем излучения при рентгеновском методе контроля является радиографическая пленка.

Радиоскопический метод НК – метод неразрушающего контроля, основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта с помощью флуоресцирующего экрана, сцинтилляционного монокристалла или электронно-оптического преобразователя.

Так как оптический контраст рентгенографического метода выше, чем у рентгеноскопического метода, способность к выявлению дефектов первого превосходит возможности второго. Поэтому для наиболее ответственных деталей, с очень строгими нормами допуска дефектов используют рентгенографический метод НК, при правильном выборе режимов и параметров контроля которого достигается высокое качество рентгеновских снимков – как по чувствительности, так и по разрешающей способности. Но рентгенография имеет ряд существенных недостатков по сравнению с радиоскопией. К ним прежде всего относятся: высокая трудоемкость, связанная, в основном с фотообработкой экспонированной радиографической пленки, и высокая себестоимость контроля. В свою очередь, радиоскопия и производительнее и дешевле рентгенографии.

Радиоскопический метод вследствие особенностей позволяет получать и анализировать изображение в реальном времени. Следовательно, радиоскопия на порядок дешевле и производительнее, чем рентгенография, что особенно заметно при большом количестве объектов контроля, а именно на предприятиях с массовым производством.

Световое изображение на выходном экране при радиоскопическом методе становится достаточно качественным, как только плотность потока энергии фотонов достигнет определенного значения. Качество светотеневого изображения ОК зависит от характеристик излучения и радиационно-оптического преобразователя, причем при радиоскопическом контроле значение некоторых характеристик (плотность потока энергии излучения, его спектральный состав, коэффициент усиления яркости радиационно-оптического преобразователя, его коэффициент передачи контраста и пр.) можно изменять в процессе анализа светотеневого изображения. Следовательно, в радиоскопии в отличие от рентгенографии можно добиться наилучшего качества изображения, не зная оптимальных параметров радиационного интроскопа, не прибегая ни к каким расчетам, что значительно экономит время контроля и затраты на его проведение.

Простота оптимизации качества светотеневых изображений при радиоскопии дает оператору возможность осуществлять перемещение 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, при радиоскопическом контроле можно использовать подвижные фильтры, изменяющие дозу излучения, взаимодействующую с преобразователем, или последовательно увеличивать энергию фотонов, изучая области ОК с разной степенью поглощения. В рентгенографическом методе такие вариации привели бы к большому числу экспозиций, а следовательно, и к большому расходу радиографической пленки и возрастанию трудоемкости контроля.

Таким образом, радиоскопический метод НК, приобретая все более широкое распространение в различных отраслях промышленности, все же имеет ограниченное применение для наиболее ответственных деталей и механизмов. В тех случаях когда это возможно, применение радиоскопии приводит к значительным сбережениям материального и человеческого ресурса.

Процесс развития радиоскопического метода идет в направлении улучшения возможностей радиоскопии по выявлению дефектов, т. е. улучшения чувствительности и разрешающей способности этого метода. Происходит постоянное усовершенствование радиоскопического оборудования и методов обработки радиоскопического изображения. Но имеются и другие возможности улучшить выявляемость дефектов при радиоскопии. В данной статье рассматривается пример применения метода микрорадиоскопии, подобного микрорентгенографии.

В микрорентгенокопии, или микрорентгенографии, используют микрофокусные (с фокусным пятном Φ от 2 до 100 мкм) источники рентгеновского излучения, при которых геометрическая нерезкость получаемого изображения практически отсутствует. Схема получения увеличенного изображения показана на рис. 1.

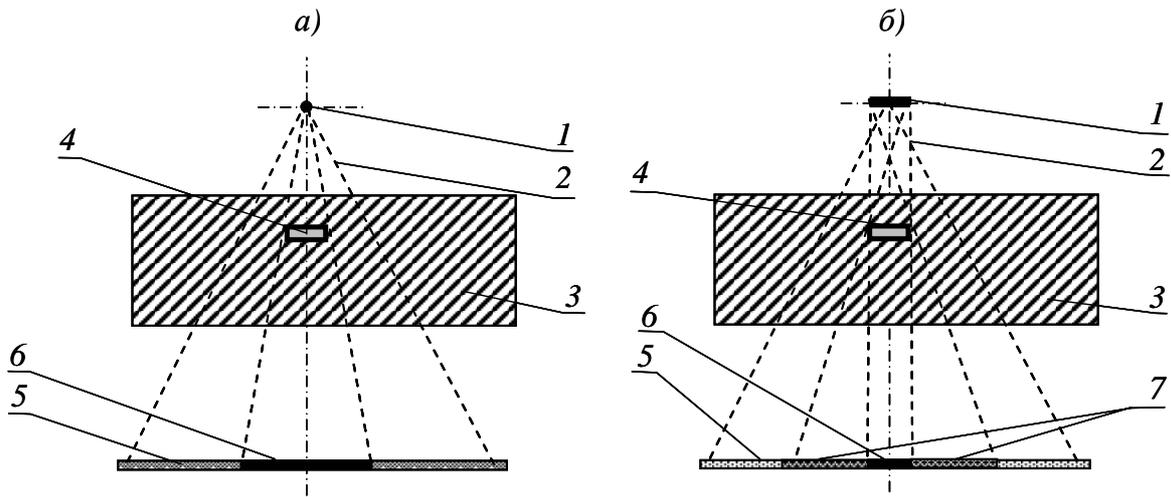


Рис. 1. Схема формирования оптического изображения посредством микрофокусного источника (а) и источника с обычным фокусным пятном (б):

1 – источник излучения; 2 – направление распространения излучения; 3 – ОК; 4 – дефект ОК; 5 – преобразователь; 6 – изображение дефекта на преобразователе; 7 – геометрическая нерезкость

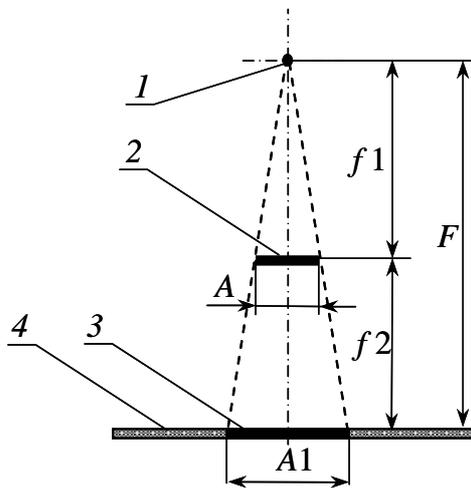


Рис. 2. Схема проекционной микро-радиоскопии:

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

элемента ОК $B = \frac{A1}{A}$ и $F = f1 + f2$, 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.

Рассчитаем величину увеличения размера элемента ОК в зависимости от параметров схемы контроля. Отобразим схему проекционного контроля на рис. 2, где A – истинный размер некоторого элемента ОК, $A1$ – размер его увеличения, F – расстояние между источником излучения 1 и преобразователем 4, $f1$ – расстояние между источником излучения 1 и элементом ОК 2, $f2$ – 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

Возможная область применения микрорадиоскопии и номенклатура контролируемых материалов и изделий очень широки. Рассмотрим применение микрорадиоскопии для контроля газовой пористости алюминиевых отливок.

Фасонные отливки из алюминиевых сплавов благодаря своим весовым характеристикам очень широко используются в авиастроении при изготовлении планера самолетов и вертолетов. Особенностью алюминиевых сплавов является образование в них характерных структурных неоднородностей даже при правильно сконструированной литниковой системе и строгом соблюдении технологии литья. Такой структурной неоднородностью алюминиевых сплавов является газовая пористость. Степень структурной неоднородности (количество и размер несплошностей) влияет на пределы прочности и текучести, относительное удлинение материала отливок и в зависимости от требуемых механических свойств отливок может рассматриваться как дефект или как допустимая несплошность. Например, действующими в авиационной промышленности стандартами, в том числе ОСТ 1.90021–79 и ОСТ 1.90248–77, установлены пять баллов пористости для алюминиевых сплавов.

Основным видом неразрушающего контроля алюминиевых отливок является рентгенографический метод контроля (контроль с использованием радиографической пленки). При этом имеется возможность установить взаимосвязь между баллами пористости и рентгеновскими изображениями плотности распределения этих структурных неоднородностей.

Процесс контроля пористости алюминиевых сплавов рентгенографическим методом состоит из двух этапов. На первом этапе контролируемый ОК просвечивают рентгеновским излучением, результаты взаимодействия с которым фиксируют на радиографическую пленку. На втором этапе оценка пористости осуществляется визуально путем сравнения рентгеновского снимка контролируемой отливки со специальными эталонными рентгенограммами (эти рентгенограммы имеют установленную зависимость изображенных на них дефектов с определенным баллом пористости (рис. 3)). Толщина сравниваемого участка ОК должна быть близка к толщине эталона. На рентгенограмме пористость представляет собой случайное распределение по всей площади областей повышенной плотности произвольной формы, имеющих четкие границы. Величина областей и их количество на рентгенограмме определяют балл пористости. При расшифровке оператор путем визуального сравнения подбирает рентгенограмму, которая наиболее близка по рисунку рентгенограмме ОК и определяет балл пористости.

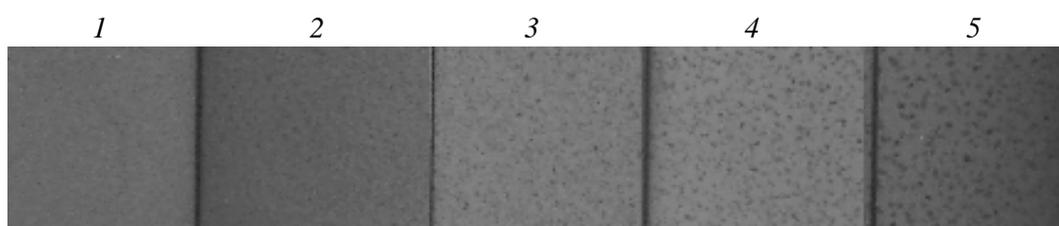


Рис. 3. Эталонная рентгенограмма для контроля алюминиевых отливок сплава типа силумин толщиной 5 мм:

1–5 – первый, второй, третий, четвертый и пятый балл пористости соответственно

При проведении исследований в качестве контролирующей системы была использована радиоскопическая установка «Норка», состоящая из микрофокусного рентгеновского аппарата РАП150-М и системы преобразования радиационного изображения в цифровое на основе флюороскопического экрана. В качестве объекта исследования использовали комплект образцов сплава АЛ9 группы силумин (системы Al–Si). Образцы представляли собой прямоугольные бруски различной толщины – от 5 до 25 мм. Для каждой из толщин имелись образцы с определенным значением балла пористости – от 1-го до 5-го балла. Таким образом, всего исследовалось 25 образцов. Параметры контроля выбирали в процессе контроля по максимальной чувствительности.

Для определения чувствительности контроля использовали индикатор качества изображения (ИКИ) для соответствующей толщины отливки.

На рис. 4 представлено рентгеноскопическое изображение алюминиевых образцов толщиной 5 мм, с пористостью от 1-го до 5-го балла. Как видно, на рентгеноскопическом изображении без увеличения различить между собой любой из баллов – даже 1-й с 5-м – не представляется возможным.

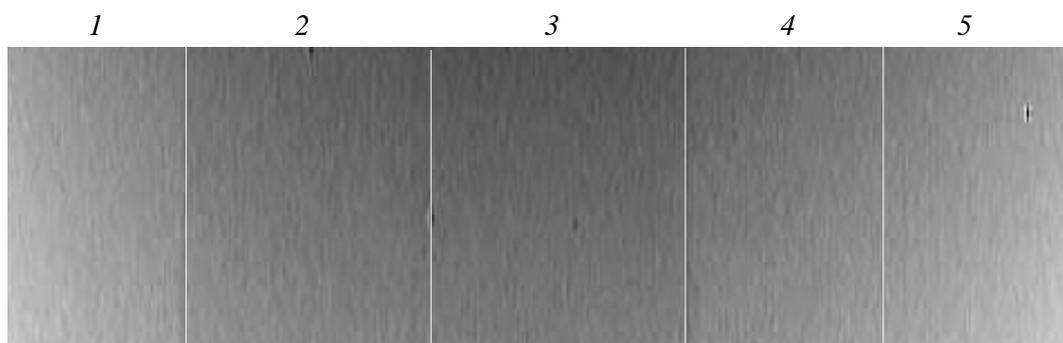


Рис. 4. Результат рентгеноскопического контроля алюминиевых отливок толщиной 5 мм: 1–5 – первый, второй, третий, четвертый и пятый балл пористости соответственно



Рис. 5. Результат микрорентгеноскопического контроля алюминиевых отливок толщиной 5 мм с увеличением в 2 раза:

3 – третий балл пористости;
5 – пятый балл пористости

3-й балл от 5-го невозможно. Для отливок других толщин были получены аналогичные результаты.

Результаты увеличения снимка в пять раз для алюминиевых отливок показаны на рис. 6. При таком увеличении также не представляется возможным разделить отливки по балам пористости, как, например, 3-й и 5-й балл пористости на рис. 6. Только при десятикратном увеличении (рис. 7) удается различить различные баллы пористости. Опытным путем установлено, что для надежного выявления баллов пористости алюминиевых отливок из литейного сплава типа силумин необходимо, по крайней мере, 10-кратное увеличение изображения ОК.

Таким образом, была создана радиоскопическая шкала газовой пористости для отливок из алюминиевых литейных сплавов типа силумин с помощью десятикратного увеличения изображения ОК. Пятибалльная шкала микропористости для отливок толщиной 5 мм представлена на рис. 8.



Рис. 6. Результат микрорентгеноскопического контроля алюминиевых отливок толщиной 5 мм с увеличением в 5 раз:

3 – третий балл пористости; 5 – пятый балл пористости



Рис. 7. Результат микрорентгеноскопического контроля алюминиевых отливок толщиной 5 мм с увеличением в 10 раз:

3 – третий балл пористости; 5 – пятый балл пористости

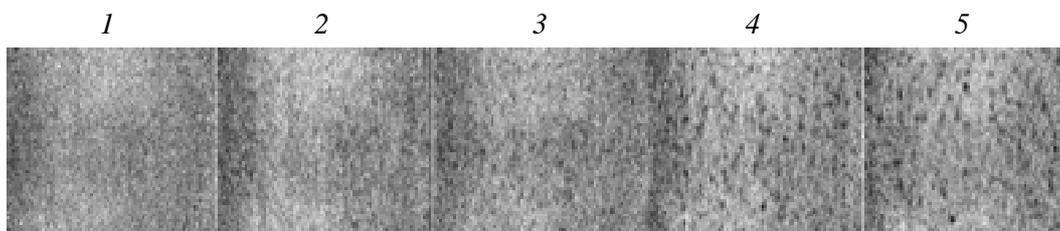


Рис. 8. Результат рентгеноскопического контроля алюминиевых отливок толщиной 5 мм при 10-кратном увеличении изображения:

1–5 – первый, второй, третий, четвертый и пятый балл пористости соответственно

Наиболее часто отбраковочным баллом пористости для алюминиевых отливок является 3-й. Поэтому с помощью микрорентгеноскопии появилась возможность значительно быстрее и дешевле определять, например, в партии произведенных отливок те, у которых балл пористости выше 3-го. Если же необходимо определить, например, 1-й балл пористости, то и тут микрорентгеноскопия может значительно снизить издержки также путем предварительного отбраковывания отливок с баллом пористости выше 3-го. А уже 1-й балл можно определить и с помощью рентгенографии.

Таким образом, в результате проведенной работы:

- установлена возможность определения балла газовой пористости для отливок из алюминиевых литейных сплавов типа силумин (системы Al–Si);
- определено необходимое увеличение изображения для стабильного определения балла газовой пористости;
- создана шкала газовой пористости для отливок из алюминиевых литейных сплавов типа силумин (системы Al–Si) для широкого диапазона толщин (от 5 до 25 мм) – с 10-кратным увеличением изображения.

Результаты проведенной работы могут быть основой для исследования возможности обнаружения макро-и микродефектов легких сплавов, неметаллических или композиционных материалов средствами как радиоскопии, так и микрорадиоскопии, что будет способствовать значительной экономии материального и трудового ресурсов.

*О.А. Базылева, В.П. Бунтушкин, О.Б. Тимофеева,
Г.И. Морозова, М.А. Воронцов*

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА ВКНА-1В ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ НАГРЕВОВ И ИСПЫТАНИЙ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ

Литейный жаропрочный сплав ВКНА-1В на основе легированного интерметаллида Ni_3Al в системе Ni–Al–Cr–Mo–Ti–W разработан, паспортизован и рекомендуется для деталей горячего тракта ГТД, длительно эксплуатируемых при температурах до $1250^{\circ}C$ с забросами (≤ 10 ч) до $1300^{\circ}C$. Особенностью сплава является низкая плотность (7938 кг/м^3), высокое сопротивление окислению при температуре до $1300^{\circ}C$ (привес при окислении на воздухе за 100 ч при температуре $1250^{\circ}C$ не превышает 25 г/м^2). Материал жаропрочен при температурах 1200 и $1250^{\circ}C$. Сто часовая прочность сплава при этих температурах равна 43 и 13 МПа соответственно. Это позволяет рассматривать сплав ВКНА-1В в качестве базовой композиции при создании более жаропрочных материалов с рабочими температурами до $1250^{\circ}C$.