

ФОРМИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЕФЕКТОВ ПРИ РАДИАЦИОННОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

Е.И. Косарина

ekaterina-kosar@mail.ru

А.В. Степанов

avsavia@yandex.ru

А.А. Демидов

lagazz@yandex.ru

Н.А. Михайлова

natsavv@inbox.ru

О.А. Крупнина

Fess.m.d@gmail.com

ФГУП «ВИАМ», Москва, Российская Федерация

Аннотация

При радиационном неразрушающем контроле важной задачей является как практическая, так и теоретическая оценка контрастной чувствительности. Теоретическая оценка позволяет прогнозировать возможности и результаты контроля в зависимости от выбранных схемы и параметров источника рентгеновского излучения и объекта контроля. Применение спектрального метода позволило оценить частотно-контрастные характеристики радиационных систем неразрушающего контроля. Построена математическая модель формирования пространственного спектра радиационного изображения. В результате анализа данной математической модели установлена аналитическая зависимость между такими параметрами источника излучения, как размер фокусного пятна и размер дефекта в плоскости, перпендикулярной оси пучка излучения. При фокусном расстоянии 700 мм и толщине объекта контроля 10 мм определены минимальные размеры дефектов, воспроизводимых на радиационном и оптическом (рентгенографическом и рентгеноскопическом) изображениях

Ключевые слова

Система радиационного контроля, частотно-контрастная характеристика, минимальный размер дефекта

Поступила в редакцию 20.10.2014
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Согласно теории формирования изобразительной информации [1–4] изображение может быть представлено некоей функцией от пространственной координаты x , а также ее пространственным спектром от независимого параметра $\nu = 1/x$, который называют пространственной частотой. При рентгеновском неразрушающем контроле облучение объекта контроля происходит из фокусного пятна, которое практически и является источником излучения с конечными размерами [5, 6]. Предположим, что квантовый выход по всей площади фокусного пятна одинаков, т. е. мощность экспозиционной дозы излучения постоян-

на и равна некоторой величине P_0 . Тогда для прямоугольного фокусного пятна размером $\Phi \times \Phi$ линейная функция источника может быть записана в виде

$$\varphi(x) = \begin{cases} \varphi & \text{при } -\varphi/2 \leq x \leq \varphi/2; \\ 0 & \text{при всех остальных } x. \end{cases}$$

Обычно источник излучения располагают на расстоянии F от преобразователя, а объект контроля — непосредственно на преобразователе. Тогда для объекта контроля толщиной d максимальная проекция фокусного пятна на преобразователь составляет $\varphi = \frac{\Phi}{F}d$.

Пространственный спектр источника излучения, определяемый прямым преобразованием Фурье как спектр прямоугольного импульса, может быть записан в виде

$$P_0[\Phi(\nu)] = \int_{-\infty}^{\infty} P_0[\Phi(x)]e^{-j2\pi\nu x} dx = \int_{-\varphi/2}^{+\varphi/2} P_0 e^{-j2\pi\nu x} dx = P_0 \frac{\sin \pi\nu\varphi}{\pi\nu\varphi}.$$

(Функция вида $\sin x/x$ в анализе сигналов встречается довольно часто и имеет специальное обозначение $\text{sinc } x$ и называется интегральным синусом или функцией отсчетов.)

На рис. 1 показана пространственная характеристика проекции фокусного пятна размером $3,5 \times 3,5$ мм и пространственный спектр при $F = 700$ мм и контроле объекта толщиной 10 мм.

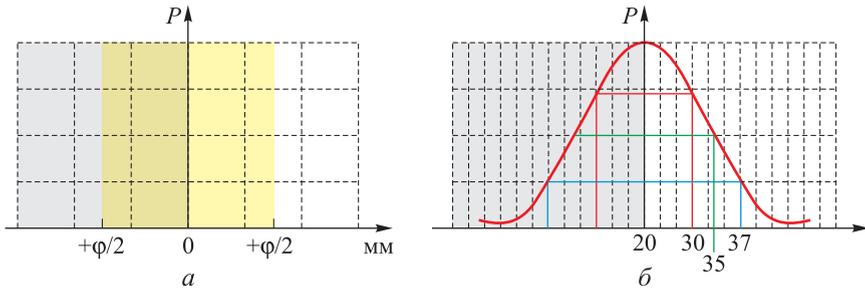


Рис. 1. Пространственные характеристики (а) и спектр (б) фокусного пятна источника размером $3,5 \times 3,5$ мм

В результате расчета выявили, что источник излучения с конечными размерами $\Phi \times \Phi = 3,5 \times 3,5$ мм на фокусном расстоянии $F = 700$ мм при контроле объекта толщиной 10 мм воспроизводит радиационное изображение с четкостью 20 линий/мм в пределах потери интенсивности излучения до $0,707P_0$, с четкостью 35 линий/мм — в пределах потери интенсивности излучения до $0,50P_0$, с четкостью 37 линий/мм — в пределах потери интенсивности излучения до $0,25P_0$.

Сечение объекта контроля, содержащего несплошность размером $l \times \delta$, приведено на рис. 2. В системе координат xOy изображение объекта контроля может быть представлено функцией от толщины объекта контроля вдоль координаты x , а также в виде спектра пространственных частот $\nu = 1/x$.

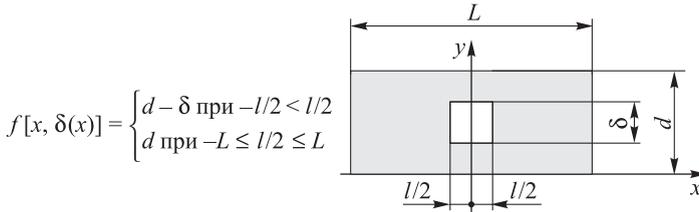


Рис. 2. Сечение объекта контроля, содержащего несплошность размером $l \times \delta$

Пространственный спектр сечения объекта контроля, содержащего дефект в виде прямоугольной несплошности, имеет вид

$$\begin{aligned} f(\nu) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x, \delta) e^{-j2\pi\nu x} dx = \int_{-l/2}^{l/2} (d - \delta) e^{-j2\pi\nu x} dx + \int_{l}^{L} d e^{-j2\pi\nu x} dx = \\ &= (d - \delta) \frac{\sin 2\pi\nu l}{2\pi\nu l} + 2d \frac{\sin 2\pi\nu(L - l/2)}{2\pi\nu(L - l/2)}. \end{aligned}$$

При $L \gg l$, что обычно бывает на практике (размеры объекта контроля в плоскости, перпендикулярной оси пучка излучения, намного больше размеров дефектов), слагаемое

$$2d \frac{\sin 2\pi\nu(L - l/2)}{2\pi\nu(L - l/2)} \ll (d - \delta) \frac{\sin 2\pi\nu l}{2\pi\nu l},$$

таким образом, $f(\nu) \approx (d - \delta) \frac{\sin 2\pi\nu l}{2\pi\nu l}$. Оценим ширину спектра.

Спектр радиационного изображения объекта контроля с дефектом (рис. 3) имеет вид

$$\Psi[\nu, \delta(n)] = f[\nu, \delta(n)] P_0[\Phi(\nu)] = P_0(d - \delta) \frac{\sin \pi\nu l}{\pi\nu l} \frac{\sin \pi\nu\varphi}{\pi\nu\varphi}.$$

В выражении спектра радиационного изображения множитель $\overline{\Psi} = \frac{\sin \pi\nu l}{\pi\nu l} \frac{\sin \pi\nu\varphi}{\pi\nu\varphi}$ определяет пространственно-частотные свойства радиационного изображения дефекта, а $P_0(d - \delta)$ — амплитудные. Графически спектральные свойства изображения дефекта приведены на рис. 4.

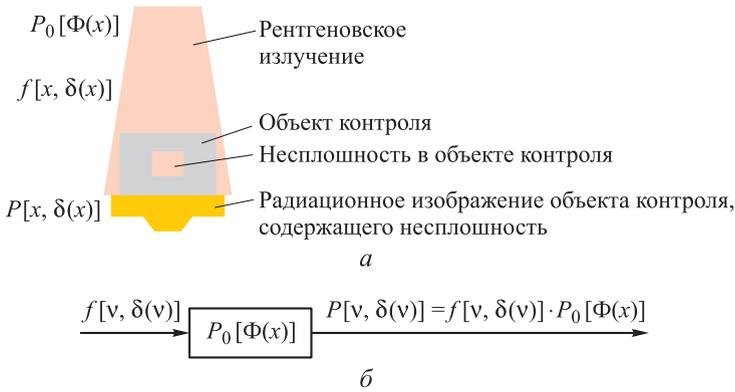


Рис. 3. Схема формирования радиационного изображения (а) и математическая модель формирования пространственного спектра (б) радиационного изображения объекта контроля

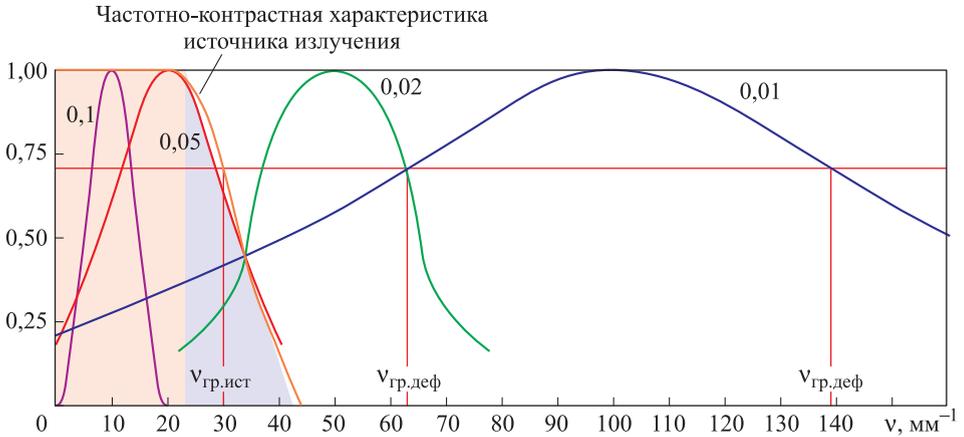


Рис. 4. Относительные пространственные спектры дефектов и относительная частотно-контрастная характеристика источника излучения

На рис. 4 показаны спектры дефектов, размеры которых в плоскости, перпендикулярной оси пучка излучения, составляют 0,01, 0,02, 0,05 и 0,1 мм. Красной кривой показана спектральная характеристика источника излучения размером $\Phi \times \Phi = 3,5 \times 3,5$ мм на фокусном расстоянии $F = 700$ мм при контроле объекта толщиной 10 мм. Такой источник формирует радиационное изображение дефектов размерами 0,05 и 0,1 мм в плоскости, перпендикулярной оси пучка излучения, практически полностью, без искажений. Радиационное изображение дефектов размерами 0,01 и 0,02 мм, спектры которых распространяются до граничной пространственной частоты $\nu_{гр,деф} = 136$ мм^{-1} и 63 мм^{-1} , данным источником излучения не может быть сформировано, так как его контрастно-частотная характеристика ограничена пространственной частотой $\nu_{гр,ист} = 30$ мм^{-1} . Полоса пропускания пространственных частот обозначена лиловой зоной. Для того чтобы сформировать радиационное изображение дефектов таких размеров в плоскости, перпендикулярной оси пучка

излучения, необходим другой источник с меньшими размерами фокусного пятна, например микрофокусный рентгеновский аппарат.

На рис. 4 показаны нормированные кривые. В действительности максимумы спектров, в том числе и частотно-контрастная характеристика источника излучения, имеют амплитуды.

При взаимодействии излучения с мощностью экспозиционной дозы излучения P_0 распределение мощности дозы излучения подчиняется зависимости $P = P_0 e^{-\mu_{o.k} d} B$, где P_0 и P — мощность экспозиционной дозы излучения при отсутствии и наличии поглотителя; B — фактор накопления рассеянного излучения; d — толщина поглотителя в направлении оси пучка излучения; $\mu_{o.k}$ — линейный коэффициент ослабления излучения материалом поглотителя. В месте расположения дефекта мощность экспозиционной дозы определяется соотношением $P = P_0 e^{-\mu_{o.k}[d-\delta(x)]} e^{-\mu_{def}\delta(x)}$. Считаем, что радиационное изображение дефекта размером δ в направлении оси пучка излучения формируется узким пучком излучения, поскольку его размер мал ($\delta \ll d$). А в плоскости, перпендикулярной оси пучка излучения, радиационное изображение дефекта и того меньше: $-x \leq \delta$. Контраст радиационного изображения определяется соотношением $K_{рад} = ((\mu_{o.k} - \mu_{def}) \delta(x)) / B$, где $\mu_{o.k}$ и μ_{def} — линейные коэффициенты ослабления излучения материалами поглотителя и дефекта [2]. На рис. 5 показана зависимость радиационного контраста, формируемого источником излучения с размером фокусного пятна $3,5 \times 3,5$ мм на расстоянии 700 мм от раскрытия дефекта размером 0,2 мм в объекте толщиной 10 мм в направлении оси пучка излучения.

Невидимое глазом радиационное изображение необходимо преобразовать в оптическое. Оптическое изображение анализирует оператор посредством зрительной системы. Оценим, каким должен быть минимальный контраст радиационного изображения, чтобы оптическое изображение несплошности было зафиксировано.

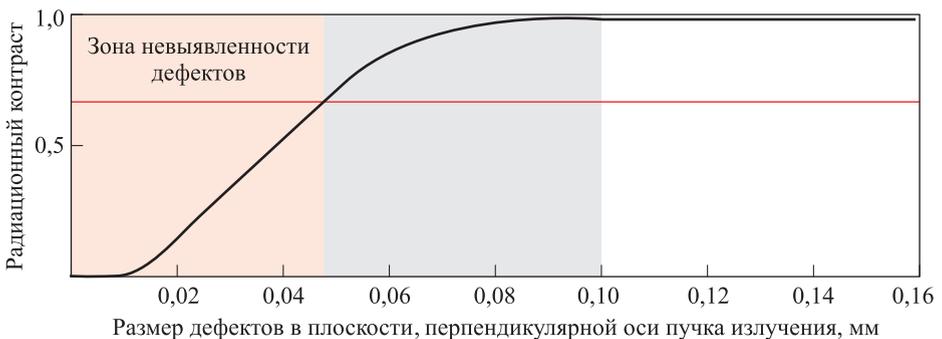


Рис. 5. Зависимость радиационного контраста, формируемого источником излучения с размером фокусного пятна $\Phi = 3,5 \times 3,5$ мм на расстоянии 700 мм от раскрытия дефекта размером 0,2 мм в направлении оси пучка излучения в объекте толщиной 10 мм

По закону Фехнера — Вебера разрешающая способность, т. е. способность воспринимать отдельно два разных элемента на изображении, пропорциональна яркости изображения [3]. Если обозначить: b — яркость изображения, а Δb — минимальное приращение яркости изображения, которое приводит еще к улавливаемому различию ощущений, то согласно этому закону справедливо равенство $\Delta b = rb$ или $\Delta b / b = r \Delta(\ln b) = r$. Разрешающая способность глаза является постоянной, как только яркость превышает пороговое значение. Для двух максимально близких элементов, еще различимых глазом, по закону Вебера справедливо соотношение $b = (1+r)b'$.

Параметр, обратный пороговой разности яркости, называется контрастной чувствительностью. Задачу обнаружения объекта на фоне с яркостью b_ϕ можно рассматривать как выделение сигнала из шума. При этом шум создается как квантовыми флуктуациями светового потока, так и собственными шумами зрительной системы, так называемым спонтанным разложением зрительных пигментов.

Рассмотрим оптическое изображение на рентгенограмме [7–12]. Изображение представляет собой проекцию объекта контроля в виде распределения оптических плотностей. Рентгенограмму оператор просматривает на негатоскопе в широком диапазоне яркостей. Согласно действующим европейским и российским нормативным документам оптическая минимальная плотность снимка не должна быть меньше (1,5...2,3) Б. Средний градиент радиографической пленки g в этом диапазоне составляет 4,5...5. Известно, что при яркости изображения 30...1000 кд/м² пороговый контраст составляет 0,02 Б при ширине изображения несплошности менее 1 мм. С учетом флуктуаций увеличим это значение до 0,05 Б. Тогда, из известного выражения оптического контраста $K_{\text{опт}} = K_{\text{рад}}g = 0,05$ получаем, что $K_{\text{рад}} = K_{\text{опт}}/g = 0,05/5 = 10^{-2}$; для $\delta(x) = 0,02d$ $K_{\text{рад}} = \frac{(\mu_{\text{о.к}} - \mu_{\text{деф}})\delta(x)}{B} = \frac{(\mu_{\text{о.к}} - \mu_{\text{деф}})0,02d}{B} = 0,01$, условие обнаружения несплошности при рентгенографическом контроле имеет вид $(\mu_{\text{о.к}} - \mu_{\text{деф}})d = 0,5 B$. При этом размер l несплошности в направлении, перпендикулярном оси пучка излучения, должен быть не менее $l \geq \frac{\Phi}{F}d$.

При рентгеноскопическом контроле оптическое изображение представляет собой распределение яркости экрана (монитора). Диапазон яркости свечения экрана ограничен в пределах 10^{-4} ...10 кд/м². Коэффициент контрастности экрана приблизительно равен единице, тогда $K_{\text{рад}} = K_{\text{опт}}/g = 5 \cdot 10^{-2}$ при $K_{\text{рад}} = \frac{(\mu_{\text{о.к}} - \mu_{\text{деф}})0,02d}{B} = 0,05$, а условие обнаружения несплошности размером $0,02d$ по оси пучка излучения составит $(\mu_{\text{о.к}} - \mu_{\text{деф}})d = 25 B$.

Показано [2], что при контроле объектов из сплавов с использованием рентгеновского излучения в диапазоне энергий 20...100 кэВ (30...120 кВ на аноде рентгеновской трубки) и фокусном расстоянии примерно 500 мм (рис. 6)

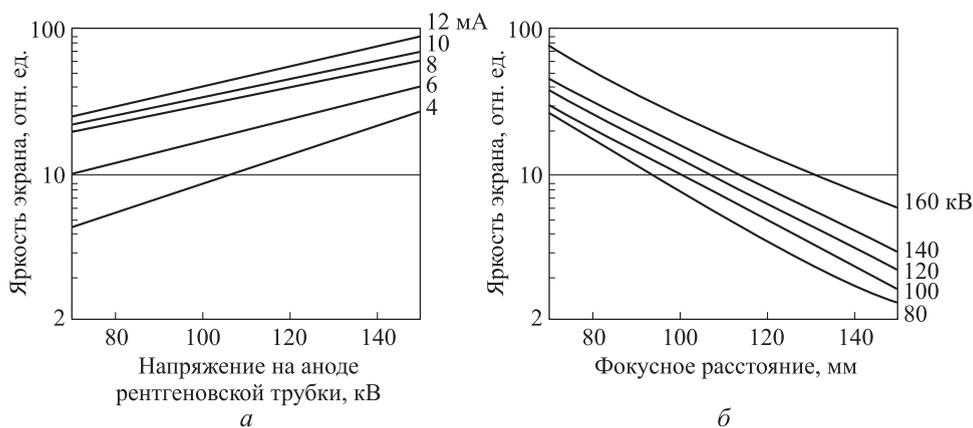


Рис. 6. Зависимость яркости экрана от напряжения на рентгеновской трубке (а) и от фокусного расстояния (б)

яркость свечения экранов составляет $10^{-4} \dots 10$ кд/м². Это намного меньше, чем при просмотре рентгеновских снимков. При такой яркости экрана пороговый контраст зрительной системы ухудшается (рис. 7).

Таким образом, при определенной контрастности радиационных изображений для повышения чувствительности к выявлению дефектов необходимо увеличить яркость оптического изображения. Яркость свечения экрана пропорциональна мощности дозы излучения и поэтому возрастает с увеличением напряжения и тока рентгеновской трубки (рис. 6, а) и с уменьшением фокусного расстояния (рис. 6, б). Увеличение яркости экрана с повышением напряжения на трубке — это результат действия нескольких конкурирующих эффектов (процессов), основными из которых являются возрастание поглощенной дозы излучения; уменьшение коэффициента ослабления излучения материалом экрана, т. е. уменьшение поглощенной дозы излучения и уменьшение фильтрации излучения начальными слоями экрана, ведущее к повышению яркости свечения экрана.

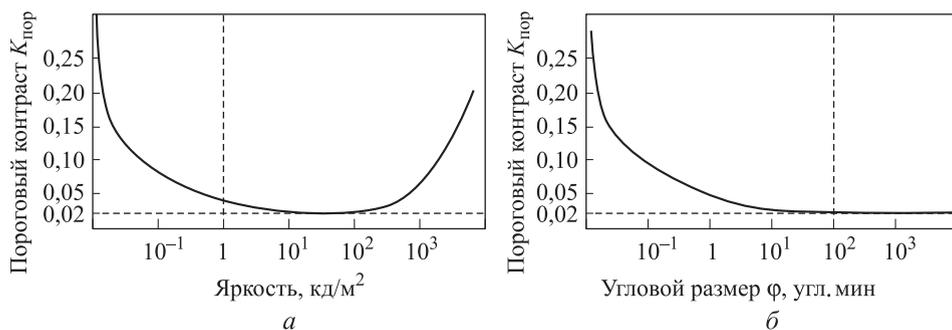


Рис. 7. Зависимость порогового контраста от яркости объекта при угловых размерах объекта $\phi > 180$ угл. мин (а) и зависимость порогового контраста от угловых размеров объекта при яркости объекта более 1 кд/м² (б)

На яркость изображения существенно влияют толщина и плотность просвечиваемого материала. На практике при контроле объектов используют максимальный анодный ток. Поэтому при контроле материала, данных плотности и толщины возможным средством повышения чувствительности метода (за счет увеличения яркости изображения) является увеличение напряжения на трубке и уменьшение фокусного расстояния. Однако при увеличении анодного напряжения и сокращении фокусного расстояния снижается контраст и четкость радиационного изображения. Значительное уменьшение фокусного расстояния возможно лишь для остро- и микрофокусных трубок. Таким образом, при рентгеноскопическом контроле не всякое радиационное изображение может быть преобразовано в оптическое с удовлетворительными характеристиками.

Из полученных условий формирования радиационных изображений дефектов, размеры которых составляют не менее 2 % просвечиваемой толщины объекта контроля в направлении оси пучка излучения, а также 0,05 мм в направлении, перпендикулярном оси пучка излучения, рассчитаны относительные линейные коэффициенты ослабления излучения веществом дефекта, который может быть обнаружен рентгеноскопическим и рентгенографическим методами: $\mu_{\text{деф}}/\mu_{\text{о.к}} = 25B/(\mu_{\text{о.к}}d) - 1$ — для рентгеноскопического метода; $\mu_{\text{деф}}/\mu_{\text{о.к}} = 0,5B/(\mu_{\text{о.к}}d) - 1$ — для рентгенографического метода.

Итак, для стального объекта толщиной 6 мм регламентировано анодное напряжение 120 кВ. По данным [4, 5] при анодном напряжении 120 кВ $\mu_{\text{Fe}} = 4,67 \text{ см}^{-1} B = 2,1$. Дефект размером $0,12 \times 0,05 \text{ мм}$ может быть обнаружен рентгенографическим методом, если $\mu_{\text{деф}}$ и μ_{Fe} различаются, по крайней мере, в 2 раза. При рентгеноскопическом контроле $\mu_{\text{деф}}$ и μ_{Fe} должны различаться почти в 10–20 раз и более.

На рис. 8 приведены результаты расчетов относительных линейных коэффициентов ослабления излучения материалом дефекта для стальных объектов толщиной 1...20 мм.

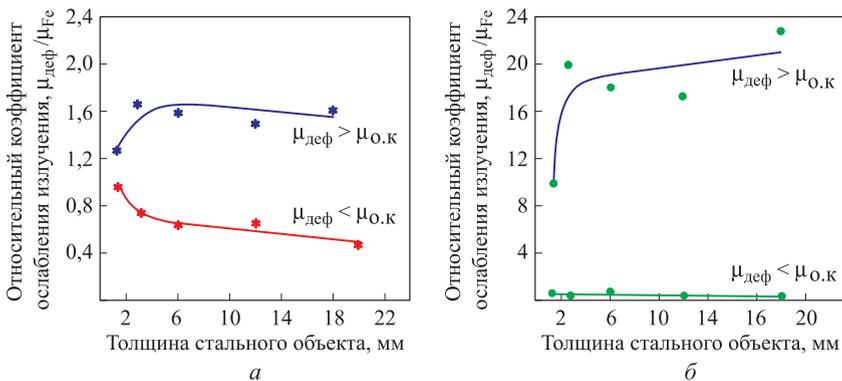


Рис. 8. Зависимость относительного линейного коэффициента ослабления излучения материалом дефекта для стальных объектов толщиной 1...20 мм с обнаруживаемым дефектом размером 2 % просвечиваемой толщины по лучу и 0,05 мм перпендикулярно лучу: а — рентгенографический контроль; б — рентгеноскопический контроль

Выводы. 1. Рассмотрен спектральный метод исследования радиационных изображений объектов контроля.

2. Определены предельные размеры дефектов, которые могут быть сформированы в радиационное изображение.

3. Установлена аналитическая зависимость между параметрами источника излучения и размером дефекта в плоскости, перпендикулярной оси пучка излучения.

4. Установлена аналитическая зависимость между физическими параметрами дефектов: размерами, плотностью его вещества и преобразования их радиационного изображения в оптическое при рентгенографическом и рентгеноскопическом методах неразрушающего контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Моисеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. М.: Либроком, 2012. 488 с.
2. *Калман Р., Фарб П., Арбиб М.* Очерки по математической теории систем. М.: Либроком, 2012. 354 с.
3. *Сухарев А.Г.* Минимаксные алгоритмы в теории численного анализа. М.: Либроком, 2009. 304 с.
4. *Головинский П.А.* Математические модели. В 2 кн. М.: Либроком, 2011. Кн. 1. 238 с. Кн. 2. 232 с.
5. *Муравская Н.П.* Метрология в неразрушающем контроле. М.: Спектр, 2011. С. 162–164.
6. *Соснин Ф.Р.* Неразрушающий контроль: Справочник. В 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 1: В 2 кн. Кн.1: Визуальный и измерительный контроль. Кн. 2: Радиационный контроль. М.: Машиностроение, 2006. 560 с.
7. *Сасанпур М.Т., Косарина Е.И.* Рекомендации по выбору анодных напряжений при рентгеновском контроле стальных объектов // Дефектоскопия. 2011. № 5. С.48–53.
8. *Степанов А.В., Косарина Е.И., Саввина Н.А.* Радиографические технические пленки РТ-К и РТ-7Т. Результаты их испытания // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 1. С. 37–42.
9. *Степанов А.В., Косарина Е.И., Саввина Н.А.* Разработка методики по испытанию радиографических пленок с целью определения целесообразности их применения в дефектоскопии // Контроль. Диагностика. 2011. № 12. С. 65–67.
10. *Степанов А.В.* Методы рентгеновского контроля в производстве авиационных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2010. № 3. С. 28–32.
11. *Косарина Е.И., Михайлова Н.А., Демидов А.А., Турбин Е.М.* Рентгеновский контроль крупногабаритных отливок сложной формы из сплавов группы «силумин» // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 2. С. 55–58.

Косарина Екатерина Ивановна — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Неразрушающие методы контроля» Всероссийского НИИ авиационных материалов (ВИАМ) (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Степанов Александр Вячеславович — канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории «Неразрушающие методы контроля» Всероссийского НИИ авиационных материалов (ВИАМ) (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Демидов Александр Александрович — инженер 1-й категории лаборатории «Неразрушающие методы контроля» Всероссийского НИИ авиационных материалов (ВИАМ) (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Михайлова Наталья Александровна — канд. техн. наук, начальник сектора лаборатории «Неразрушающие методы контроля» Всероссийского НИИ авиационных материалов (ВИАМ) (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Крупнина Ольга Александровна — инженер лаборатории «Неразрушающие методы контроля» Всероссийского НИИ авиационных материалов (ВИАМ) (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Косарина Е.И., Степанов А.В., Демидов А.А., Михайлова Н.А., Крупнина О.А. Формирование радиационных изображений дефектов при радиационном неразрушающем контроле // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 4. С. 81–92. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4-81-92

FORMATION OF RADIATION DEFECT IMAGES WITH RADIATION NONDESTRUCTIVE TESTING

E.I. Kosarina

A.V. Stepanov

A.A. Demidov

N.A. Mikhailova

O.A. Krupnina

comekaterina-kosar@mail.ru

avsavia@yandex.ru

lagazz@yandex.ru

natsavv@inbox.ru

Fess.m.d@gmail.com

Federal State Unitary Enterprise All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, Moscow, Russian Federation

Abstract

In radiation nondestructive testing an important task is both practical and theoretical estimate of contrast sensitivity. The theoretical estimate helps to predict testing capabilities and results depending on the selected scheme and the X-ray source and control object parameters. Application of spectral method allows us to estimate the frequency-contrast characteristics of radiation nondestructive testing systems. We made a mathematical model of forming the spatial spectrum of the radiation image. The analysis of this mathematical model helps to set an analytical relationship between such a parameter of the radiation source, as the size of the focal spot and size of the defect in a plane perpendicular to the beam axis. With a focal length of 700 mm and thickness of 10 mm in the control object, we defined the minimum size of defects reconstructed on the radiation and optical (X-ray and fluoroscopic) images

Keywords

Radiation testing system, frequency-contrast characteristic, minimum size of the defect

REFERENCES

- [1] Moiseyev N.N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems of systems analysis]. Moscow, Librokom Publ., 2012. 488 p.
- [2] Kalman R.E, Falb P.L., Arbib M.A. *Topics in mathematical system theory*. McGraw-Hill, N.Y., 1969.
- [3] Sukharev A.G. *Minimaksnyye algoritmy v teorii chislennogo analiza* [Minimax algorithms in the numerical analysis theory]. Moscow, Librokom Publ., 2009. 304 p.
- [4] Golovinskiy P.A. *Matematicheskie modeli. V 2 kn.* [Mathematical models]. Moscow, Librokom Publ., 2011.
- [5] Muravskaya N.P. *Metrologiya v nerazrushayushchem kontrole* [Metrology in non-destructive testing]. Moscow, Spektr Publ., 2011, pp. 162–164.
- [6] Sosnin F.R., ed. by V.V. Klyuev. *Nerazrushayushchiy kontrol': Spravochnik. V 8 t. T. 1: V 2 kn. Kn.1: Vizual'nyy i izmeritel'nyy kontrol'. Kn. 2: Radiatsionnyy kontrol'* [Non-destructive testing: Handbook in 8 volumes. Vol. 1 in 2 books. Book 1: Visual control and control by measurement. Book 2: Radiation testing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 560 p.
- [7] Sasanpur M.T., Kosarina E.I. Recommendations on selection of anode voltages in X-ray testing of steel specimens. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011, vol. 47, no. 5, pp. 329–333. DOI: 10.1134/S1061830911050081
- [8] Stepanov A.V., Kosarina E.I., Savvina N.A. RT-K and RT-7T radiographic technical films and their study results. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2012, no. 1, pp. 37–42 (in Russ.).
- [9] Stepanov A.V., Kosarina E.I., Savvina N.A. Development of the methodology for X-ray films testing in order to determine the feasibility of their application in flaw detection. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing Diagnostics], 2011, no. 12, pp. 65–67 (in Russ.).
- [10] Stepanov A.V. X-ray nondestructive control methods in the production of aircraft engines. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2010, no. 3, pp. 28–32 (in Russ.).
- [11] Kosarina E.I., Mikhaylova N.A., Demidov A.A., Turbin E.M. X-ray testing of large-sized intricate castings made from aluminum alloys. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2013, no. 2, pp. 55–58 (in Russ.).

Kosarina E.I. — Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, Chief Research Scientist of Nondestructive Testing Methods Laboratory, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (VIAM) (ul. Radio 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Stepanov A.V. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, Leading Research Scientist of Nondestructive Testing Methods Laboratory, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (VIAM) (ul. Radio 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Demidov A.A. — first-rank engineer of Nondestructive Testing Methods Laboratory, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (VIAM) (ul. Radio 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Mikhailova N.A. — Cand. Sci. (Eng.), Head of the sector of Nondestructive Testing Methods Laboratory, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (VIAM) (ul. Radio 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Krupnina O.A. — engineer of Nondestructive Testing Methods Laboratory, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (VIAM) (ul. Radio 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kosarina E.I., Stepanov A.V., Demidov A.A., Mikhailova N.A., Krupnina O.A. Formation of Radiation Defect Images with Radiation Nondestructive Testing. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 4, pp. 81–92. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4-81-92