

УДК 620.179.1

А.А. Демидов¹, А.В. Степанов¹, Е.М. Турбин¹, О.А. Крупнина¹**О РЕЖИМАХ РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ФОРМИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ
ИЗОБРАЖЕНИЙ С ЗАДАННЫМ КОНТРАСТОМ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-80-85

Представлено аналитическое формирование радиационного изображения объектов рентгеновского контроля, получено приближенное выражение контраста радиационного изображения как меры полезной информации. Радиационный контраст представляет собой монотонную функцию, не имеющую экстремальных точек, поэтому для выбора оптимальных режимов рентгеновского контроля следует задаваться определенным уровнем чувствительности и определять необходимую для него энергию излучения. Проведен расчет минимального значения радиационного контраста исходя из требований к оптическому контрасту. Определены минимальные значения анодных напряжений рентгеновского контроля стальных объектов толщиной до 80 мм. Проведена экспериментальная проверка расчетных данных и получено их совпадение. Полученные данные по выбору энергии излучения значительно ниже приведенных в нормативных документах.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.3. «Методы неразрушающих исследований и контроля» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: рентгеновский контроль, радиационный контраст, энергия излучения, оптический контраст, оптимальный режим экспонирования.

The process of analytical formation of radiation image of x-ray inspection objects is presented and approximate contrast expression of the radiation image as a measure of useful information is obtained. Radiation contrast is a monotonic function that has no extreme points, so a certain level of sensitivity and necessary energy of the radiation should be given for the optimum x-ray inspection. The calculation of the minimum value of the radiation contrast based on requirements of the optical contrast is performed. The minimum value of anode voltage of x-ray inspection of steel objects up to 80 mm thickness is determined. The experimental verification of the calculated data and the analysis of the results are performed. The obtained data on the radiation energy selection is much lower than those in standard documents.

The work is executed within the implementation of the complex scientific direction 2.3. «Methods of nondestructive researches and control» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: x-ray inspection, radiation contrast, radiation energy, optical contrast, optimum exposure mode.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Безотказная работа авиационной техники может быть обеспечена при условии полного соблюдения технологии ее производства и правил эксплуатации [1, 2]. Однако даже при соблюдении этих требований как в процессе производства авиационных материалов, так и при эксплуатации объектов авиационной техники возникают дефекты. Причины появления дефектов в сплавах могут быть самыми различными, зачастую непредсказуемыми. Природа, размеры, количество и тип дефектов весьма разнообразны. Каждому виду технологического процесса производства и эксплуатации сопутствуют определенные типы дефектов, но сколько их, каковы их размеры и какой конкретно тип дефек-

та – без проведения испытаний сказать трудно. В числе прочих видов испытаний важное место занимают методы неразрушающего контроля (НК) – эффективное и всестороннее средство оценки качества материалов, в том числе радиографический метод. Традиционный рентгенографический НК, несмотря на трудоемкость, остается одним из наиболее популярных методов в производстве продукции ответственного назначения. Метод регламентирован целым рядом российских государственных и отраслевых стандартов, а также международных (ISO), европейских (EN) норм [3–5]. В частности, российский стандарт ГОСТ 20426–82 (Контроль неразрушающий. Методы дефектоскопии радиационные. Область

применения) и европейские нормы EN444: 1994 (Неразрушающий контроль. Принципы радиографического метода контроля металлов рентгеновским и гамма-излучением) регламентируют выбор энергии излучения, которая определяется значением анодного напряжения на рентгеновской трубке [6, 7]. В стандартах показана зависимость максимально допустимого значения анодного напряжения от толщины сплавов на основе магния, алюминия, титана, железа. В европейских нормах и отечественных стандартах эти значения различны. Авторами был поставлен вопрос – каковы критерии выбора анодных напряжений при рентгеновском контроле? Для ответа на этот вопрос проведено теоретическое исследование формирования и преобразования радиационного изображения.

Материалы и методы Формирование радиационного изображения дефектов

При рентгеновском контроле происходит ослабление дозы излучения широкого пучка по закону:

$$D = D_0 \cdot e^{-\mu x} \cdot B,$$

где D_0 , D – соответственно экспозиционные дозы излучения на поверхности объекта контроля (ОК) и прошедшей ОК, Кл/кг; μ – эффективный линейный коэффициент ослабления излучения материалом ОК, см^{-1} , зависящий от плотности материала ОК и энергии рентгеновского излучения; x – толщина ОК в направлении излучения, см; B – фактор накопления рассеянного излучения.

На рис. 1 показана схема взаимодействия широкого пучка рентгеновского излучения с веществом ОК. Источник рентгеновского излучения

генерирует излучение с экспозиционной дозой на поверхности объекта контроля D_0 ; при взаимодействии материала объекта контроля с широким пучком излучения образуются рассеянные фотоны. Доза излучения за объектом контроля ослабляется в зависимости от толщины ОК и плотности его материала до величины D . Если дефект представляет собой несплошность, заполненную газом, шлаком, оксидами или другим веществом, плотность которого d_d [$\text{г}/\text{см}^3$] менее плотности материала объекта контроля $d_{\text{ОК}}$ [$\text{г}/\text{см}^3$], то на дефектном участке ОК ослабление излучения происходит в меньшей степени, поэтому доза излучения, соответствующая дефектному участку ОК, будет больше дозы излучения, соответствующей бездефектному участку – $D_d > D$ [8–11].

Энергетический спектр рентгеновского излучения зависит от величины анодного напряжения U_a . Максимальная энергия фотонов в спектре ε_{max} определяется соотношением:

$$\varepsilon_{\text{max}} = h\nu_{\text{max}} = e^- \cdot U_a,$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; e^- – заряд электрона, равный $-1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; ν_{max} – частота колебаний, с^{-1} ; U_a – напряжение на аноде рентгеновской трубки, кВ.

Максимальное количество фотонов в спектре рентгеновского излучения обладает энергией, равной $2/3 e^- \cdot U_a$. Широкий пучок фотонов с разной энергией в материале контролируемого объекта ослабляется неодинаково, поэтому при описании механизма ослабления дозы излучения материалом ОК при расчетах используют так называемый эффективный линейный коэффициент ослабления μ .

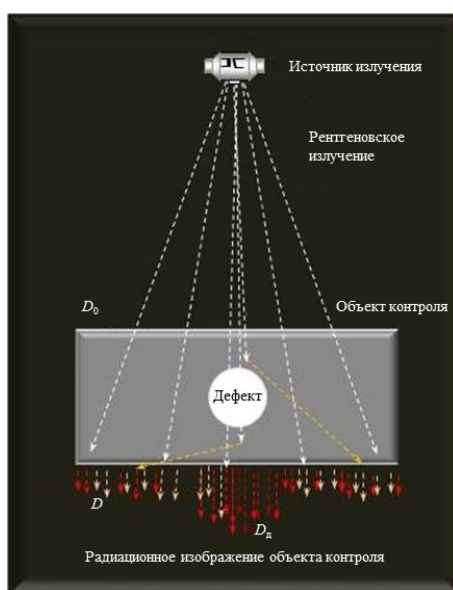


Рис. 1. Формирование радиационного изображения объекта контроля

Распределение излучения за ОК принято называть радиационным изображением. Это связано не только с изменением толщины материала ОК, но и со значением коэффициента ослабления излучения веществом дефекта (μ_d). Поскольку коэффициент ослабления излучения материалом ОК на дефектном и бездефектном участках имеет разное значение, при расчете величины контраста радиационного изображения следует учитывать эту разницу.

При рентгеновском контроле полезная информация об ОК формируется на стадии формирования радиационного изображения. Мерой полезной информации является контраст радиационного изображения, определяемый как относительная разница доз излучения на дефектном и бездефектном участках ОК:

$$K_p = \frac{D_d - D}{D_\phi}$$

где $D_d = D_0 \cdot e^{-\mu(x-\delta)} \cdot e^{-\mu_d \delta}$ – экспозиционная доза излучения за ОК, соответствующая дефектному участку, Кл/кг; μ , μ_d – эффективные линейные коэффициенты ослабления излучения материалом ОК и веществом дефекта соответственно, см^{-1} ; δ – размер дефекта в направлении по оси пучка излучения, см.

В стандартах [6, 7] показано, что изображение дефекта формируется узким пучком излучения, тогда $D = D_0 \cdot e^{-\mu x}$ – доза излучения на бездефектном участке в непосредственной близости от дефекта, Кл/кг; $D_\phi = D_0 \cdot e^{-\mu x} \cdot B$ – доза излучения на всех бездефектных участках радиационного изображения, формируемого широким пучком излучения, Кл/кг.

Для дефектов в виде газовых несплошностей $\mu << \mu_d$

$$K_p = \frac{D_d - D}{D_\phi} = \frac{D_0 e^{-\mu(x-\delta)} \cdot e^{-\mu_d \delta} - D_0 \cdot e^{-\mu x}}{D_0 \cdot e^{-\mu x} \cdot B} = \frac{e^{-(\mu-\mu_d)\delta} - 1}{B} \approx \frac{\mu \cdot \delta}{B}$$

поскольку $e^x - 1 \approx x$ для малых значений x .

Если размер минимального дефекта, подлежащего обнаружению, вдоль пучка излучения составляет 2% от толщины объекта контроля, то

$$\delta = 0,02 \cdot x \text{ и соответственно } K_p = \frac{\mu \cdot \delta}{B} = \frac{0,02 \cdot \mu \cdot x}{B}$$

Исследование функции $K_p(E)$

Если функция $K_p(E)$ при каком-то значении энергии излучения имеет максимум, то ее полный дифференциал в этой точке равен нулю. Полный дифференциал радиационного контраста представляет собой выражение:

$$dK_p = \frac{\partial K_p}{\partial \mu} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial E} \cdot dE + \frac{\partial K_p}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial E} \cdot dE + \frac{\partial K_p}{\partial B} \cdot \frac{\partial B}{\partial E} \cdot dE = 0,$$

поскольку $K_p = \frac{0,02 \cdot \mu \cdot x}{B}$, получаем:

$$dK_p = 0,02 \left[\frac{x}{B} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial E} \cdot dE + \frac{\mu}{B} \cdot \frac{\partial x}{\partial E} \cdot dE - \frac{\mu x}{B^2} \cdot \frac{\partial B}{\partial E} \cdot dE \right] = 0.$$

Преобразуем это выражение:

$$dK_p = 0,02 \cdot \frac{\mu x}{B} \left[\frac{\mu'}{\mu} + \frac{x'}{x} - \frac{B'}{B} \right] \cdot dE = K_p \cdot \left[\frac{\mu'}{\mu} + \frac{x'}{x} - \frac{B'}{B} \right] \cdot dE \neq 0.$$

Анализ зависимостей коэффициента ослабления и фактора накопления (B) показал, что это монотонные функции, не имеющие экстремумов. Суммарная функция является неравномерно убывающей. Определим, при каких условиях минимальное значение радиационного контраста позволяет обнаружить дефект.

Результат

Преобразование радиационного изображения в оптическое и расчет минимального значения радиационного контраста

Дефект на радиографическом снимке может быть надежно зафиксирован глазом дефектоскописта, если разность оптических плотностей его изображения и фонового участка снимка с учетом шумовых колебаний оптической плотности снимка не менее 0,1 Б. В расчетах увеличим эту величину до 0,5 Б.

Оптический контраст представляет собой выражение:

$$K_o = \frac{S_d - S_\phi}{S_\phi} = K_p \cdot g,$$

где S_d , S_ϕ – соответственно оптическая плотность участков рентгенограммы, соответствующая изображению дефекта и фона, Б; g – средний градиент радиографической пленки.

Согласно требованиям нормативных документов минимальное значение оптической плотности снимка должно быть не менее 1,5 Б (по ГОСТ) и 2 Б (по ISO). Рентгеновский контроль изделий ответственного назначения следует осуществлять, используя радиографическую пленку класса С4, например D5 (Agfa), у которой средний градиент рабочего участка в области оптических плотностей, близких к 2 Б, составляет $g = 4,4$.

Тогда величина радиационного контраста составляет:

$$K_p = \frac{K_o}{g} = \frac{S_d - S_\phi}{S_\phi} \cdot \frac{1}{g} = \frac{2,5 - 2}{2 \cdot 4,4} = 0,056.$$

Поскольку $K_p = \frac{0,02 \cdot \mu \cdot x}{B} = 0,056$, при выборе режимов контроля должно соблюдаться условие: $\frac{\mu \cdot x}{B} = 2,8$ или $\mu \cdot x = 2,8 \cdot B$.

В табл. 1 приведены значения изменения линейного коэффициента ослабления излучения железом в диапазоне энергий 80–240 кэВ (120–360 кВ), в табл. 2 – значения фактора накопления рассеянного излучения при $U=120-400$ кВ [9].

В соответствии с данными табл. 1 установлены предельные значения анодных напряжений при экспонировании стальных объектов.

При сравнении полученных расчетных данных с данными ГОСТ 20426–82 [6, 11] обнаружили, что при экспонировании стальных объектов толщиной до 20 мм для получения двухпроцентной чувствительности возможно экспонирование со значениями анодного напряжения, совпадающими с требованиями ГОСТ. Требования ГОСТ 20426–82: для объектов из стали толщиной 6, 12 и 20 мм анодное напряжение не должно превышать значений соответственно 120, 150 и 200 кВ. Это совпадает с данными, приведенными в табл. 2.

Для объектов толщиной >20 мм проведение рентгеновского контроля с чувствительностью 2% необходимо, чтобы анодное напряжение было значительно ниже требований ГОСТ 20426–82: для объектов из стали толщиной 23, 32 и 40 мм анодное напряжение не должно превышать значений соответственно 250, 300 и 400 кВ. Получен-

ные данные не противоречат результатам исследований и экспериментов, описание которых приведено в работах [12–15], но не совпадают с данными работы [11], где представлены высокие значения факторов накопления рассеянного излучения, которые снижают на порядок значения радиационного контраста.

Экспериментальная проверка расчетных данных

Авторами проведен следующий эксперимент. Стальной ступенчатый клин с высотой ступенек от 14 до 38 мм, состоящий из семи ступенек (шаг ступеньки 4 мм), установили на стальную плиту толщиной 50 мм, таким образом, толщина объекта контроля изменялась в пределах 64–88 мм. В каждой ступеньке клина размещены шесть плоскостных лунок. Глубина лунок составляет 1; 2; 3; 5; 7 и 10% от высоты ступеньки. Объект экспонировали на радиографическую пленку D7 в режиме: анодное напряжение 450 кВ, анодный ток 10 мА, продолжительность экспозиции 2 мин, фокусное расстояние 800 мм. Полученная рентгенограмма представлена на рис. 2. Качество полученного рентгеновского снимка – удовлетворительное, оптическая плотность 1,57 Б. На участке рентгенограммы с изображением ступеньки высотой 30 мм (суммарная высота 80 мм) видно изображение самой глубокой лунки (глубина 3 мм), что соответствует чувствительности 3,75% (рис. 2). В работах [16, 17] приведены результаты выбора режимов и параметров контроля крупногабаритных отливок, полученные авторами данной статьи, которые подтверждают представленные расчеты.

Обсуждение и заключения

1. Изучены законы формирования радиационного изображения и его преобразования в оптическое изображение.

Таблица 1

Зависимость линейного коэффициента ослабления излучения стали от энергии напряжения на аноде

E , кэВ	80	100	120	150	160	180	200	220	240
U , кВ	120	150	180	225	240	270	300	320	360
μ , см ⁻¹	4,67	2,93	2,21	1,54	1,41	1,28	1,15	1,10	1,09

Таблица 2

Выбор анодного напряжения при рентгеновском контроле объектов из стали с чувствительностью 2%

x , мм	6	10	20	30	40	50	60	80
μ	4,67	2,92	2,08	1,41	1,15	1,09	1,03	0,87
U , кВ	120	145	200	240	300	360	400	450
E , кэВ	80	100	137	160	200	240	267	300
B	1,00	1,01	1,43	1,45	1,58	1,88	2,13	6,96

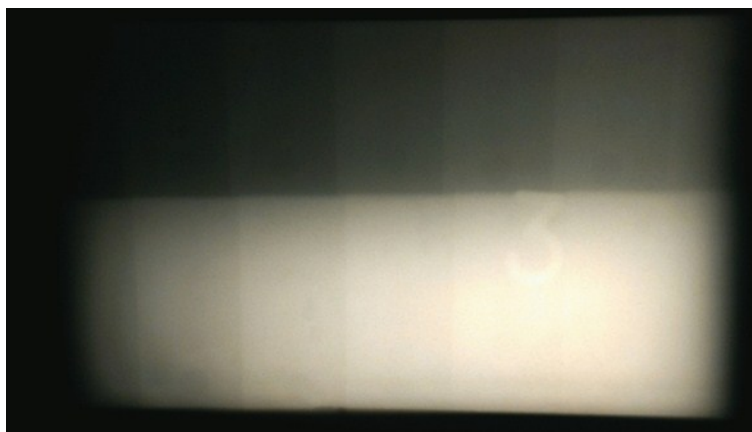


Рис. 2. Экспериментальный радиографический снимок

2. Получено аналитическое выражение контраста радиационного изображения объекта контроля и проведено теоретическое исследование аналитической зависимости с целью обнаружения экстремальных точек.

3. Показано, что контраст радиационного изображения в зависимости от энергии излучения представляет собой монотонно убывающую нелинейную функцию, следовательно, при расчете оптимального режима контроля необходимо задаваться уровнем чувствительности. На примере уровня чувствительности 0,02 сделано следующее:

– проведен расчет энергии излучения при рентгеновском контроле стальных объектов толщиной 6–80 мм;

– проведен расчет минимального значения радиационного контраста, который в результате

преобразуется в оптический контраст заданного уровня;

– определены минимальные значения анодных напряжений рентгеновского контроля стальных объектов толщиной до 80 мм.

4. Выполнена экспериментальная проверка расчетных данных для объекта толщиной 80 мм и получено совпадение расчета и эксперимента.

5. При сопоставлении полученных результатов с требованиями, приведенным в ГОСТ 20426–82, установлено, что при наличии сильноточного источника рентгеновского излучения возможно при контроле объектов толщиной (>50 мм) использовать низкие значения анодного напряжения, что не противоречит требованиям ГОСТ 20426–82, и в то же время получить снимки с высоким контрастом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. *Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2008. №3. С. 2–14.
3. Каблов Е.Н., Морозов Г.А., Крутиков В.Н., Муравская Н.П. Аттестация стандартных образцов состава сложнолегированных сплавов с применением эталона // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 9–11.
4. Каблов Е.Н. К 80-летию ВИАМ // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012. Т. 78. №5. С. 79–82.
5. Каблов Е.Н. *Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии*. 2012. № 3. С. 10–15.
6. ГОСТ 20426–82. Контроль неразрушающий. Методы дефектоскопии радиационные. Область применения. М.: ГОССТАНДАРТ СССР, 1982. 23 с.
7. Стандарт EN444: 1994. Неразрушающий контроль. Принципы радиографического метода контроля металлов рентгеновским и гамма-излучением. Аутентичный перевод. Европейский институт стандартизации. Стассарт 36, В 1050. Брюссель. 1994. 8 с.
8. Добромыслов В.А. *Радиационные методы неразрушающего контроля*. М.: Машиностроение, 1999. 101 с.
9. Румянцев С.В., Штань А.С., Гольцев В.А. *Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля*. М.: Энергоиздат, 1982. 240 с.
10. Шпагин А.П., Выстопов В.И. К расчету контраста рентгеновского изображения // *Дефектоскопия*. 1972. №3. С. 118–122.
11. Добромыслов В.А., Жаркова Л.В. Интегральные (эффективные) и дифференциальные линейные коэффициенты ослабления тормозного рентгенов-

- ского излучения и эффективные факторы накопления рассеянного излучения // Дефектоскопия. 1985. №1. С. 1–3.
12. Соснин Ф.Р. Оценка параметров радиационных изображений дефектов // Дефектоскопия. 1988. №4. С. 40–44.
 13. Okunade A.A. Parameters and computer software for the evaluation of mass attenuation and mass energy-absorption coefficients for body tissues and substitutes // Jour. Medical Physics. 2007. Vol. 32. P. 124–132.
 14. Сасанпур М.Т., Косарина Е.И. Рекомендации по выбору анодных напряжений при рентгеновском контроле стальных объектов // Дефектоскопия. 2011. №5. С. 48–53.
 15. Сасанпур М.Т., Саввина Н.А. Рентгеновский контроль изделий из стали при заданном уровне чувствительности // Вестник МЭИ. 2009. №1. С. 158–162.
 16. 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.
 17. 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.