

**СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ДЕФЕКТΟΣКОПИИ
МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ**

Б. А. КОНОНОВ, В. В. ЕВСТИГНЕЕВ, В. М. ЗЫКОВ

(Представлена научным семинаром НИИ электронной интроскопии)

В работе [1] было показано, что в области толщин $2 \div 3 \text{ г/см}^2$ контроль качества изделий целесообразно вести с использованием моноэнергетического пучка быстрых электронов. Использование моноэнергетического пучка электронов наиболее целесообразно для контроля слоистых изделий, когда производится контроль слоя легкого материала, экранированного слоями тяжелого материала. В определенной области отношений массовых толщин тяжелого и легкого слоев контроль рентгеновским излучением невозможен из-за сильного ослабления пучка тормозного излучения в слое из тяжелого материала. В работе [1] приведен анализ достижимой чувствительности контроля моноэнергетическим электронным пучком на основе экспериментально полученного распределения поглощенной энергии пучка в материалах с различным химическим составом и показано, что для контроля наиболее целесообразно использовать линейный участок распределения поглощенной энергии. В настоящей работе приведен приближенный анализ чувствительности сцинтилляционного метода контроля моноэнергетическим пучком электронов и приведены экспериментальные результаты исследования чувствительности.

Оценку чувствительности сцинтилляционного метода дефектоскопии электронным пучком наиболее просто осуществить в предположении, что материал детектора (сцинтиллятор и световод) по эффективному атомному номеру мало отличается от материала контролируемого изделия, а зондирующий электронный пучок является узким по сравнению с радиусом детектора, расположенного за контролируемым изделием, $r_0 \ll 0,5R_0$, где R_0 — экстраполированный пробег электронов в материале контролируемого изделия. В этом случае для оценки чувствительности можно воспользоваться известными данными по диссипации энергии моноэнергетического электронного пучка в полубесконечном однородном поглотителе. В зависимости от размера чувствительной области сцинтилляционного детектора x_c в направлении просвечивания, начальной энергии электронного пучка E_0 и массовой толщины контролируемого изделия x показания детектора будут пропорциональны энергии электронного пучка $D(x)$, поглощенной на глубине x в материале изделия или полной энергии электронного пучка $I(x)$ за контролируемым изделием. Энергия электронного пучка, поглощенная в чувствительном объеме детектора, в случае, когда $x_c \gg R_{ост}$, где $R_{ост}$ — остаточный пробег электронов в материале сцинтиллятора, в зависимости от толщины контролируемого изделия x может быть представлена в виде

$$I(x) = \bar{E}(x) \cdot \eta(x), \quad (1)$$

где

$E(x)$ — средняя энергия электронов за контролируемым изделием, $\eta(x)$ — ослабление потока электронов в пучке контролируемым изделием. В формуле (1) величина $I(x)$ нормирована на один электрон, подающий на контролируемое изделие. Средняя энергия электронов с начальной энергией E_0 за слоем материала толщиной x с достаточным приближением может быть записана в виде

$$\bar{E}(x) = E_0 \left(1 - \frac{x}{R_3}\right). \quad (2)$$

Подставляя значение $\bar{E}(x)$ в выражение (1), имеем

$$I(x) = E_0 \left(1 - \frac{x}{R_3}\right) \eta(x). \quad (3)$$

Здесь R_3 — экстраполированный пробег электронов с начальной энергией E_0 в материале контролируемого изделия, выраженной в $г/см^2$. Энергию, поглощенную на глубине x , можно найти по формуле

$$D(x) = \frac{dI(x)}{dx} = E_0 \left[\frac{d\eta}{dx} \left(1 - \frac{x}{R_3}\right) - \frac{\eta}{R_3} \right]. \quad (4)$$

Для ослабления числа электронов $\eta(x)$ моноэнергетического электронного пучка барьерами различного химического состава при различных начальных энергиях имеется ряд эмпирических формул, основанных на экспериментальных исследованиях и расчетах по методу Монте-Карло [2, 3, 4].

Для получения выражения $D(x)$ на ее прямолинейном участке ($x = 0,6 \div 0,9 R_3$) следует учесть, что экстраполированные пробеги, определенные по прямолинейным участкам $\eta(x)$ и $D(x)$, практически совпадают. Значение производной $d\eta/dx$ на линейном участке $\eta(x)$ можно выразить через R_3

$$\frac{d\eta(x)}{dx} = - \frac{\eta(x)}{R_3} \frac{1}{1 - \frac{x}{R_3}}. \quad (5)$$

Отсюда для линейной части $D(x)$ имеем

$$D(x) = -2 \frac{E_0}{R_3} \eta(x), \quad (6)$$

знак «минус» указывает на то, что происходит уменьшение энергии электронного пучка.

Из выражений (3) и (6) можно оценить чувствительность сцинтилляционного метода дефектоскопии быстрыми электронами в случаях, когда $x_c \ll R_{ост}$ и $x_c \gg R_{ост}$. Для случая $x_c \ll R_{ост}$, дифференцируя выражение (6) по x и переходя к конечным приращениям, получим с учетом (5)

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{1}{1 - \frac{x}{R_3}} \frac{\Delta x}{x}, \quad (7)$$

где $\frac{\Delta D}{D} \equiv \delta D$ — относительное изменение поглощенной энергии, обусловленное относительным изменением толщины контролируемого изделия $\frac{\Delta x}{x} \equiv \delta x$. Минимально выявляемое относительное изменение толщины контролируемого изделия равно

$$\delta x_{min} = \xi \left(1 - \frac{x}{R_3}\right) \delta D_n, \quad (8)$$

где

δD_n — пороговая чувствительность дефектоскопа, равная отношению изменению выходного сигнала за счет суммарного действия всех дестабилизирующих факторов,

$\xi = 3$ — коэффициент надежности,

$x = (0,6 \div 0,9) R_0$ — изменяется в пределах линейного участка $D(x)$.

Для случая сцинтиллятора с полным поглощением ($x_c \geq R_{ост}$) чувствительность контроля, с учетом выражения для dI/dx в виде (6), равна:

$$\delta x_{\min} = \xi \frac{R_0}{2x} \left(1 - \frac{x}{R_0} \right) \delta I_n, \quad (9)$$

где δI_n — пороговая чувствительность дефектоскопа для рассматриваемого случая. Из сравнения чувствительности контроля в случае, когда $x_c \ll R_{ост}$, и в случае, когда $x_c \geq R_{ост}$, следует, что сцинтиллятор с полным поглощением электронов обеспечивает в $\frac{2x}{R_0}$ большую чувствительность.

На практике электронный пучок сопровождается тормозным излучением, которое генерируется в элементах конструкции источника моноэнергетических электронов, коллимирующем устройстве и в контролируемом изделии. Тормозное излучение, сопровождающее электронный пучок, регистрируется детектором как фон, который испытывает флуктуации, связанные с флуктуациями интенсивности электронного пучка, что приводит к уменьшению чувствительности контроля. Чувствительность одноканальной схемы дефектоскопа с учетом фона равна

$$\delta x'_{\min} = \xi \frac{2x}{R_0} \left(1 - \frac{x}{R_0} \right) (1 + N) \delta I'_n,$$

где

N — отношение составляющей сигнала детектора, обусловленной постоянной компонентой фона, к составляющей сигнала детектора, обусловленной электронами, прошедшими контролируемое изделие,

$\delta I'_n$ включает в себя флуктуации сигнала детектора за счет фона. Так как на практике основной вклад в тормозное излучение вносит тормозное излучение, генерируемое в элементах конструкции источника моноэнергетических электронов, то вклад тормозного излучения в сигнал детектора можно уменьшить, применяя фокусировку электронного пучка на входе в коллимирующее устройство и используя дополнительную защиту блока детектора от рассеянного тормозного излучения.

Эффективность регистрации тормозного излучения сцинтилляционным детектором возрастает с увеличением размеров сцинтиллятора. Поэтому для уменьшения вклада тормозного излучения в сигнал детектора начальную энергию электронного пучка E_0 нужно выбирать таким образом, чтобы толщина изделия была ближе к экстраполированному пробегу электронов R_0 . При этом нужно учитывать, что по мере приближения величины R_0 к размеру изделия увеличиваются статистическая погрешность измерения и погрешность за счет флуктуации начальной энергии электронов E_0 .

В случае использования сцинтилляционного детектора нестабильность выходного сигнала регистрирующего устройства складывается из нестабильности за счет флуктуаций начальной энергии электронного пучка, нестабильности интенсивности источника электронов, нестабильности пространственного положения электронного пучка, статистической погрешности измерения за счет статистического характера взаимодействия электронов с веществом, нестабильности коэффициента усиления детектора, основной вклад в которую вносит нестабильность коэффици-

ента усиления фотоумножителя и нестабильность фона тормозного излучения. Нестабильности выходного сигнала, обусловленные нестабильностью начальной энергии, нестабильностью интенсивности источника электронов и фоном тормозного излучения можно уменьшить в несколько раз применением дифференциальной схемы измерений в силу детерминированного характера этих нестабильностей. Выражение для чувствительности контроля в форме (9) остается справедливым и для случая, когда используется дифференциальная схема измерений, если под δI_n понимать отношение флуктуаций на выходе дифференциальной схемы к величине сигнала на входе дифференциальной схемы. Чувствительность контроля, вычисленная по формуле (9), представлена на рис. 1 для случая, когда $\delta I_n = 0,02$. Из характера зависимости видно, что $\delta x_{\min}$ уменьшается при $x \rightarrow R_0$. Так как при вычислении чувствительности не учитывалось увеличение δI_n при $x \rightarrow R_0$ за счет увеличения вклада фона, статистической погрешности и влияния нестабильности энергии E_0 , то в реальном случае при $x \rightarrow R_0$ чувствительность возрастает до некоторого предела, определяемого суммарной нестабильностью за счет указанных факторов.

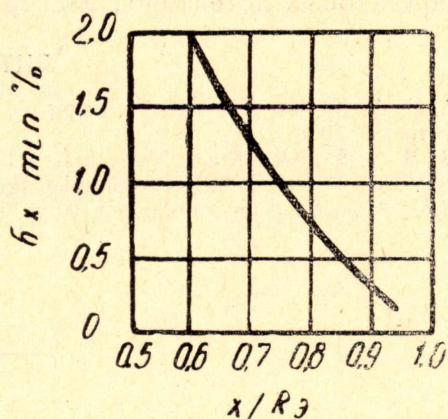


Рис. 1. Зависимость минимально выявляемого изменения толщины от отношения толщины изделия x к электрополированному пробегу электронов R_0 при $\delta I_n = 0,02$

Поскольку изменение характеристик электронного пучка при изменении толщины поглотителя, выраженной в $г/см^2$, слабо зависит от эффективного атомного номера материала поглотителя, то в случае контроля слоистых материалов, когда контролируемый слой материала с небольшим атомным номером экранирован материалом с большим атомным номером, чувствительность контроля будет практически определяться относительной неравномерностью толщины тяжелоатомного слоя δx_T

$$\delta x_{\min} = \kappa \xi \delta x_T, \quad (11)$$

где

κ — отношение массовой толщины слоя с большим атомным номером к массовой толщине слоя с малым атомным номером,

ξ — коэффициент надежности.

Чувствительность контроля легкоатомного материала, экранированного слоями тяжелоатомного материала, можно существенно повысить, если в сигнал на выходе сцинтилляционного дефектоскопа ввести коррекцию на изменение толщины тяжелоатомных слоев, измеряя их одним из известных методов контроля, например, электромагнитным.

Экспериментальное исследование чувствительности сцинтилляционного метода контроля быстрыми электронами было осуществлено при использовании практически моноэнергетического электронного пучка с энергией $3 \div 6$ Мэв и дифференциальной схемы измерений на образцах с массовой толщиной $1,5 \div 2$ $г/см^2$. Получена чувствительность контроля 0,3% от суммарной массовой толщины контролируемого образца при поперечных размерах имитаторов дефектов, равных диаметру зондирующего электронного пучка и линейной скорости контроля 0,25 м/мин.

В случае слоистых образцов экспериментально подтверждена справедливость выражения (II) для чувствительности контроля.

В заключение следует отметить, что приведенные выше формулы для оценки чувствительности сцинтилляционного метода контроля пучком моноэнергетических электронов применимы также для случая полупроводниковых детекторов электронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. А. Кононов, К. А. Дергобузов, Ю. М. Степанов. «Дефектоскопия», № 4, стр. 77, 1968.
 2. B. N. Subba Rao. Nucl. Instrum. and Methods. **44**, 155, 1966.
 3. B. W. Mar. Nucl. Science and Engin., **24**, № 2, 193, 1966.
 4. D. Harder, G. Posehet, Phys. Letters, **24B**, № 10, 510, 1967.
-