

**ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА ИНТРОСКОПИИ
БЫСТРЫМИ МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ**

В. И. БОЙКО, В. В. ЕВСТИГНЕЕВ, В. М. ЗЫКОВ

(Представлена научным семинаром НИИ электронной интроскопии)

Для контроля неоднородностей и внутренних дефектов относительно тонких ($< 5 \text{ г/см}^2$), непрозрачных для света материалов возможно применить источники моноэнергетических электронов, излучение которых проникает сквозь образцы и создает теневое изображение внутреннего строения последних. Для преобразования невидимого электронного изображения в видимое необходимо использовать какой-либо электронно-оптический преобразователь. Перспективным в этом плане является сцинтилляционный метод электронно-оптического преобразования, дающий прямое оптическое изображение. Это изображение после соответствующего усиления электронно-оптическим усилителем света можно наблюдать непосредственно глазом или передавать на фотокатод телевизионной системы и наблюдать на экране телевизора.

А. М. Якобсон и Ф. Н. Новицкий произвели оценку чувствительности бета-интроскопа [1]. При этом они считали, что бета-изображение создается в основном первичной компонентой бета-излучения, а рассеянное излучение дает общий фон.

Очевидно, что толщина просматриваемого материала должна быть мала по сравнению с пробегом частиц.

Настоящая работа посвящена оценке возможностей сцинтилляционного метода электронной интроскопии с помощью моноэнергетического пучка быстрых электронов, когда толщина контролируемого материала почти равна экстраполированному пробегу электронов.

При прохождении электронного пучка через вещество изменяется интенсивность пучка, распределение частиц по энергии и направление их движения. Изменение этих характеристик определяется массовой толщиной образца, пройденной электронным пучком и слабо зависит от атомного номера материала. Это позволяет использовать электронный пучок для контроля неоднородностей и внутренних дефектов слоистых изделий и материалов [2]. При измерениях с помощью сцинтилляционного детектора его показания будут пропорциональны площади под кривой распределения поглощенной энергии в сцинтилляторе за образцом. Чувствительность сцинтилляционного метода для однородных образцов можно оценить из распределений поглощенной энергии ($D(x)$), полагая, что материал сцинтиллятора, расположенного непосредственно за образцом, несущественно искажает распределение $D(x)$. Кривая поглощенной энергии для всех веществ имеет максимум и сле-

дующий за ним быстрый, близкий к линейному спад. Быстрое спадание ионизации с глубиной материала обеспечивает необходимую точность измерения толщины всего образца или обнаружения места дефекта. Изменение поглощенной энергии $D(x)$, близкое к линейной зависимости, выполняется в интервале $(0,5 \div 0,9) R_0$, где R_0 — экстраполированный пробег. Чувствительность метода запишем в виде отношения

$$\frac{\delta D}{\delta x},$$

где $\delta D = \frac{\Delta D}{D}$ — относительное приращение поглощенной энергии,

$\delta x = \frac{\Delta x}{x}$ — относительное изменение толщины.

Для производной $D'(x)$ в пределах линейного участка выполняется соотношение:

$$D(x) = \frac{\Delta D}{\Delta x} = - \frac{D(x)}{R_0 - x}. \quad (1)$$

Тогда

$$\frac{\delta D}{\delta x} = \frac{D'(x) \cdot x}{1 - \frac{R_0}{x}}. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что относительное изменение интенсивности тем больше, чем больше x , т. е. с увеличением толщины для данной энергии выявляемость улучшается. Однако рабочим участком следует признать участок $x = (0,7 \div 0,9) \cdot R_0$, так как при $x < 0,7 \cdot R_0$ мало $\frac{\Delta D}{D}$, а при $x > 0,9 \cdot R_0$ мала интенсивность и велики флуктуации сигнала.

Минимальный размер дефекта по толщине в статическом режиме определим из выражения (2)

$$\delta x = \frac{\delta D \cdot D(x)}{D'(x) \cdot x} = \delta D \left(1 - \frac{R_0}{x} \right). \quad (3)$$

В последнем выражении заменим δD на порог контрастной чувствительности детектирующего устройства K , учтем, что рабочая точка находится на $x = 0,8 \cdot R_0$ и введем коэффициент надежности $\xi = 30$, тогда

$$|\delta x|_{\min} = \xi \cdot K \left(1 - \frac{R_0}{x} \right). \quad (4)$$

K примем равным 2%, так как чувствительность существующих электронно-оптических преобразователей равна $(2 \div 4) \%$.

Таким образом, предельное значение чувствительности метода электронной интроскопии равно

$$|\delta x|_{\min} \geq 1,5 \%.$$

Наибольший эффект следует ожидать в случае слоистых изделий, когда на тяжелый материал толщиной $(0,6 \div 0,8) R_0$ нанесен тонкий, легкий материал (пленки, крышка), причем контролировать необходимо последний. Суммарная толщина не должна превышать $0,9 R_0$. В этом случае контроль будет производиться в области толщин, равных $(0,7 \div 0,9) R_0$, и электронный пучок будет падать на образец со стороны тяжелого материала. Электроны, пройдя весь образец, попадают в дефектную область в легком материале, а затем, почти не рассеиваясь, попадают на сцинтиллятор. Это позволит получить хорошую контраст-

ность. Изображения же дефектов, лежащих в области толщин $(0 \div 0,5)R_0$, будут размываться вследствие многократного рассеяния, которое претерпевает электрон в образце.

Выше была рассмотрена величина минимальной неоднородности Δx , которая может быть обнаружена электронным интроскопом. При этом полагалось, что поперечный размер дефекта q может быть произвольным. В действительности количество электронов N , поглощаемое элементом сцинтиллятора площадью q^2 за время t , будет испытывать флуктуации, средний квадрат которых равен N . Число электронов определим следующим образом:

$$N = \eta(x) \cdot N_0 \cdot q^2 \cdot t, \quad (5)$$

где

$\eta(x)$ — коэффициент поглощения электронов,

N_0 — число электронов, падающих на единицу площади образца в единицу времени.

В результате флуктуационных колебаний числа N яркость B элемента q^2 будет воспринята глазом или приемником со временем накопления t как величина, изменяющаяся случайным образом со средней относительной амплитудой колебаний

$$\left| \frac{\Delta B}{B} \right|_{\text{фл}} \approx \frac{\Delta N}{N} \approx \frac{1}{\sqrt{N}}. \quad (6)$$

При этом предполагается, что каждый поглощенный в сцинтилляторе электрон порождает достаточно большое число световых квантов. Для нормального видения дефекта необходимо, чтобы относительная амплитуда флуктуационных колебаний была в несколько раз меньше, чем минимальный контраст изображения, т. е.

$$\xi \left| \frac{\Delta B}{B} \right| \leq K, \quad (7)$$

где

ξ — коэффициент превышения сигнала над шумом — $(2 \div 4)$.

Из формулы (7) на основании формул (5, 6) получим

$$q^2 \geq \frac{\xi^2}{N_0 \cdot \eta(x) \cdot t \cdot K^2}.$$

Полагая время накопления глаза $t \approx 0,1$ сек., $K = 0,02$, $\xi = 4$, $N_0 = 10^{12}$ электронов/см² сек, коэффициент поглощения электронов на глубине около $(0,8 \div 0,9)R_0$; $\eta(x) = (0,1 \div 0,2)$, определим минимальный линейный размер дефекта, выявляемого интроскопом

$$q = (0,1 \div 0,2) \text{ мм.}$$

Таким образом, проведенные расчеты показывают, что на существующей аппаратуре и источниках моноэнергетических электронов можно создать эффективные электронные интроскопы.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Якобсон и Ф. Н. Новицкий. «Заводская лаборатория», № 10, 1194, 1963.
2. Б. А. Кононов, К. А. Дергобузов, Ю. М. Степанов. «Дефектоскопия», № 4, 77, 1968.