

## ЭЛЕКТРОННАЯ ИНТРОСКОПИЯ

В. И. ГОРБУНОВ, В. Е. ЕВСТИГНЕЕВ, В. И. БОЙКО, А. Л. ПЛОТНИКОВ

### Введение

Все увеличивающийся объем и ассортимент промышленных изделий, контроль качества которых необходим, вызывает не только усовершенствование традиционных классических методов контроля, но и поиск, разработку новых принципов и методов неразрушающих испытаний.

Сравнительно недавно получила признание и практическое применение дефектоскопия изделий пучком быстрых моноэнергетических электронов [1]. Однако в современных условиях крупномасштабного производства однопараметровый контроль качества становится недостаточным. В этой связи актуальной стала проблема разработки метода электронной интроскопии, который призван, сохранив замечательные качества электронной дефектоскопии, обеспечить определение формы и характера дефекта непосредственно во время контроля.

В данной работе на основе существующих источников быстрых электронов и электронно-оптической и телевизионной аппаратуры рассматривается возможность создания эффективных электронных интроскопов для контроля качества материалов и изделий.

### Физические основы метода электронной интроскопии

Основой электронной интроскопии, как и любого радиационного метода неразрушающего контроля, является взаимодействие проникающего излучения с веществом. Взаимодействие излучения с веществом характеризуется как изменением коэффициента поглощения энергии или числа частиц по пути его распространения внутри изучаемого объекта, так и изменением параметров потока, связанных с рассеянием, ионизацией, ядерными реакциями и т. п.

Информационная способность средств электронной интроскопии определяется физической природой и механизмом взаимодействия электронов с веществом, интенсивностью, спектром и геометрией распределенного потока. Кроме того, она зависит от структуры, формы, материала контролируемого объекта, вида дефекта и других факторов.

Наибольшая чувствительность методов неразрушающего контроля быстрыми моноэнергетическими электронами достигается, когда энергия зондирующих частиц составляет  $(0,7 \div 0,9)R_0$  (где  $R_0$  — экстраполированный пробег электронов в веществе). Однако при таких толщинах спектральное и угловое распределение потока электронов, прошедших барьеры, не исследовано.

Для изучения энергетических распределений электронов разработан безжелезный магнитный бета-спектрометр, обладающий однородным магнитным полем, со сцинтилляционным детектором, работающим в счетном режиме. Источником электронов служит бетатрон с введенным электронным пучком, который затем использован в первом варианте электронного интроскопа. Изучение угловых распределений проведено с помощью камеры рассеяния, внутри которой помещен дистанционно управляемый сцинтилляционный детектор.

Исследовано угловое и энергетическое распределение электронов с начальной энергией 3,0; 5,1 и 8,0 Мэв, прошедших алюминиевые, медные и свинцовые барьеры в диапазоне толщин  $(0,1 \div 1,0) R_0$ . Анализ энергетических и пространственных распределений и распределений поглощенной дозы по глубине позволил выделить следующие особенности взаимодействия электронов с веществом, играющие решающую роль для электронной интроскопии.

1. Потери энергии не зависят от энергии электронов (в исследованном диапазоне), поэтому частицы разных энергий, проходя сквозь данный барьер, теряют одинаковое количество энергии. При этом по мере проникновения электронов в поглотитель их энергия линейно уменьшается с толщиной.

2. Зависимость распределения поглощенной энергии от толщины наиболее сильно проявляется на больших  $(0,7 \div 0,9) R_0$  глубинах поглотителя, что обеспечивает высокую контрастную чувствительность.

3. Потери энергии в веществе слабо зависят от  $z$  ( $z$  — атомный номер элемента). Эта особенность обуславливает возможность контроля качества слоистых материалов и изделий различной плотности и химического состава.

4. Трансформация разных энергетических групп спектрального распределения электронов, вызванная изменением толщины барьера, неодинакова. Наиболее сильно изменяется высокоэнергетическая часть спектра. При толщинах  $(0,7 \div 0,9) R_0$  в низкоэнергетической области спектра появляется дополнительный максимум, обусловленный накоплением электронов с энергией около 1 Мэв. Отчетливо накопление наблюдается в поглотителях с высоким  $z$ .

5. Большое сечение рассеяния электронов атомами среды приводит к тому, что на толщинах  $> 0,5 R_0$  наблюдается пространственное распределение, близкое к диффузному. Эта особенность обеспечивает эффективный контроль различно ориентированных протяженных дефектов типа микротрещин. Таким образом, исследование прохождения электронов через толстые слои вещества не только позволяет выбрать элементы интроскопа и рассчитать его основные характеристики, но и наметить пути улучшения их.

#### **Теоретическое исследование основных характеристик метода электронной интроскопии**

Одна из главных проблем интроскопии — преобразование невидимого распределенного потока излучения в видимое изображение. Любой «снимок» в проникающем излучении принципиально может быть преобразован в электрический рельеф, и задача преобразования в большинстве случаев сводится к его трансформации и усилению. Анализ функциональной схемы средств интроскопии позволил выбрать следующую принципиальную схему электронного интроскопа.

Широкий пучок мононаправленных и моноэнергетических электронов из источника проходит через коллиматор и падает на исследуемый образец. Распределенный поток электронов, вышедших из образца, фор-

мирует в чувствительном слое преобразователя световой рельеф внутреннего строения объекта контроля. С поверхности преобразователя изображение проектируется оптикой переноса на фотокатод электронно-оптического усилителя. Усиленное по яркости изображение телевизионной установкой передается на пункты наблюдения и документирования результатов неразрушающих испытаний. К источнику электронов для целей интроскопии предъявляются следующие требования: относительно высокая плотность потока  $\left( \sim 10^{11} \frac{\text{эл}}{\text{см}^2 \text{сек}} \right)$ , равномерность

плотности потока по поперечному сечению и во времени, моноэнергетичность, стабильность, низкий  $\gamma$ -фон и т. д. Этим требованиям в той или иной мере удовлетворяют линейный ускоритель, микротрон и бетатрон с выводом пучка [2].

Преобразование электронного изображения в видимое наиболее перспективно катодолюминофорами типа  $\text{ZnS}(\text{Cu})$  в виде тонких  $\sim 15$  мг/см<sup>2</sup> экранов, обладающих максимальной конверсионной эффективностью для электронов при минимальной чувствительности к  $\gamma$ -излучению. Для получения наибольшего разрешения предпочтительно также применение органических и пластических преобразователей.

Большой коэффициент усиления, способность работать при малых освещенностях и возможность наблюдать изображение непосредственно на выходном экране обуславливает выбор многокамерных электронно-оптических усилителей, например, типа У-72М.

В качестве оптики переноса изображений используется светосильный фотообъектив, для передачи изображений на пункт наблюдения — телевизионная установка на базе суперортикона, для документирования результатов контроля — фотографический метод.

В общем случае контроля по изменению потока энергии электронов  $\Phi(t)$  чувствительность метода удобно выразить через параметр [3]

$$A = \frac{\Delta\Phi(t + \Delta t)}{\Delta t} \cdot \frac{t}{\Phi(t)} = \frac{\delta\Phi(t)}{\delta t},$$

равный отношению изменения функции  $\Phi(t)$  к вызвавшему его относительному изменению массовой толщины  $t$ . В статическом режиме контрастную чувствительность можно определить, учитывая коэффициент надежности  $\xi$ , характеризующий отношение полезного сигнала к шуму, и относительный уровень шума  $\omega$ , обусловленный воздействием всех дестабилизирующих факторов

$$|\delta t|_{\min} \equiv \left| \frac{\Delta t}{t} \right|_{\min} = \frac{\xi\omega}{A}.$$

Связав  $\Phi(t)$  с энергией, поглощенной сцинтиллятором  $E_{\text{погл}}(t)$  и энергией светового излучения  $E_{\text{д}}(t)$ , и пренебрегая нелинейностью зависимости  $E_{\text{д}}(t)$  на малом участке в окрестности  $t=t_0=0,8 R_3$ , получаем

$$|\delta t|_{\min} = \frac{\xi \cdot \omega \cdot E(t_0) \cdot dt}{dE_{\text{погл}}(t_0) \cdot t_0}.$$

Таким образом, задача сводится к определению энергии, поглощенной чувствительным объемом преобразователя, и определению относительного уровня шумов.

Определение  $dE_{\text{погл}}(t)$  можно провести, используя спектральное распределение электронов, распределение средних потерь или распределение поглощенной энергии  $D(t)$  по глубине образца. Так, если предположить, что преобразователь с подложкой несущественно искажают

распределение  $D(t)$ , тогда после преобразований для линейного участка  $D(t)$  получаем

$$|\delta t|_{\min} = \frac{\xi \omega \cdot t}{\left(1 - \frac{t}{R_9}\right) \cdot R_9}.$$

Численный расчет показывает, что в реальных условиях контрастная чувствительность равна 0,7%.

При расчете  $|\delta t|_{\min}$  полагается, что поперечный размер дефекта  $l$  произвольно большой. Расчет детальной чувствительности должен учитывать поперечные размеры дефекта, его форму и флуктуации потока электронов. Поэтому предположим, что изменение толщины образца на величину  $|\delta t|_{\min}$  произошло на участке, имеющем форму квадрата со стороной  $l$ . Тогда среднее число участвующих в формировании изображения дефекта электронов определится выражением

$$N = \eta_N \cdot N_0 \cdot l^2 \cdot \tau.$$

В результате флуктуационных колебаний число электронов, вызванных вероятностным характером прохождения и регистрации, яркость  $B$  элемента  $l^2$  будет воспринята приемником со временем накопления  $\tau$  как величина, изменяющаяся случайным образом со средней относительной амплитудой колебаний

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

Тогда с учетом коэффициента надежности, коэффициента пропускания числа электронов  $\eta_N$ , чувствительности приемника, плотности потока электронов  $N_0 \sim 10^{11} \frac{\text{эл}}{\text{см}^2 \text{сек}}$  определяем, что при  $|\delta t|_{\min} \geq 0,7\%$  выявляется дефект с  $l \geq 0,03$  мм.

Расчет разрешающей способности метода электронной интроскопии проведен по контрасту изображения дефекта известной величины с использованием экспериментальной зависимости разрешения многокамерных ЭОУ от контраста входного изображения. При этом предполагается, что дефект располагается на стороне образца, обращенной к преобразователю. Энергия, поглощаемая экраном за дефектным и бездефектным участками образца, определяется по результатам измерения средних потерь энергии электронами в толстых поглотителях. При передаче изображения по элементам электронно-оптического тракта неизбежны потери качества и яркости изображения. В расчете освещенности фотокатода учитывается спектральное соответствие характеристик элементов и потери в оптике переноса. Результаты расчета показывают, что разрешающая способность электронного интроскопа, изготовленного в соответствии с описанной выше принципиальной схемой, составляет около 10 пар линий на миллиметр в оптимальном случае.

Методом контрастно-частотных характеристик проведен анализ системы в целом на основе функций рассеяния и нерезкости. При этом предполагается, что функции рассеяния всех элементов подчиняются нормальному закону или близки к нему.

### Экспериментальное исследование характеристик электронного интроскопа и его применение

Телевизионная электронно-интроскопическая установка состоит из бетатрона с выведенным пучком электронов конструкции Томского политехнического института, электронно-оптического блока и телевизион-

ной установки. Конструктивно электронно-оптический блок объединяет электронно-оптический усилитель У-72М, блок высоковольтного питания, оптику переноса изображений и устройство для установки объектов контроля и преобразователей излучения в одном металлическом корпусе.

Проведено экспериментальное исследование метрологических характеристик изготовленного бетатронного электронного интроскопа БЭИ-1. Получены следующие результаты. Предельная контрастная чувствительность, определенная по ступенчатым дефектометрам, составляет 1,0%, детальная чувствительность, исследованная проволочными эталонами, равна 2,1%, максимальная разрешающая способность составляет 5 пар линий на миллиметр. Все значения приведены для случая, когда дефект располагался на стороне образца, обращенной к преобразователю (т. е. при нулевой глубине залегания дефекта).

Как и следовало ожидать, исходя из особенностей взаимодействия электронов с веществом вообще и экспериментального изучения угловых распределений в частности, чувствительность электронной интроскопии ухудшается примерно в 10 раз при перемещении дефекта на сторону образца, обращенную к источнику электронов. Исследована зависимость детальности чувствительности от глубины залегания дефекта. Результаты показывают, что более сильная зависимость наблюдается при расположении дефекта на глубине  $(0 \div 0,08)t$  и  $(0,4 \div 0,5)t$ , где  $t$  — толщина изделия. Объясняется это сильным рассеянием электронов, несущих информацию в слоях вещества, лежащих после дефекта. Диапазон глубин  $(0,4 \div 0,5)t$  объясняется еще и тем, что процесс прохождения электронов через вещество в этой области характеризуется наибольшей беспорядочностью (максимальное число вторичных электронов, угловое распределение приближается к диффузному и т. п.). Изучение гарантированной чувствительности при различных начальных энергиях показало, что в пределах экспериментальных ошибок в исследованном диапазоне она не зависит от энергии. Однако необходимо отметить, что с ростом начальной энергии максимальная чувствительность достигается при больших толщинах образца. Так, при  $E_0 = 2$  Мэв оптимальная толщина равна  $0,8R_0$ , а при  $E_0 = 8$  Мэв она стремится к  $1,0 R_0$ .

При экспериментальном исследовании возможностей контроля методом электронной интроскопии однородных и слоистых изделий изучено прохождение электронов через протяженные неоднородности в веществе типа трещин. В соответствии с выводами, сделанными нами при анализе особенностей взаимодействия электронов с веществом, экспериментально показано, что в процессе прохождения через образец, имеющий протяженную неоднородность, часть электронов захватывается в полость неоднородности и эффективно транспортируется вдоль ее стенок. Это явление, названное нами макроканализированием (название подсказано качественным сходством этого эффекта с эффектом классического канализирования), сохраняется и в случае значительного (до  $60^\circ$ ) несовпадения ориентации трещины с направлением падающего пучка электронов. Изучено пространственное и энергетическое распределение электронов, прошедших сквозные наклонные плоские каналы. Определено, что деформация характеристик электронного пучка в этом случае несравненно меньше, чем при преодолении сплошного барьера. Так, при прохождении образца толщиной  $1,56R_0$  с каналом, ширина раскрытия которого 100 мкм, а угол ориентации  $30^\circ$ , вероятная энергия двухмэвного электрона уменьшается на 576 кэв для Al и 520 кэв для Si. Исследованиями БЭИ-1 показано, что сквозные трещины с углами ориентации надежно выявляются при ширинах раскрытия 10 мкм и более.

При углах ориентации  $45-60^\circ$  удается зарегистрировать сквозные дефекты с раскрытием около 100 мкм.

Оценка параметров метода при контроле легкого слоя слоистых изделий проведена с помощью эталонов, которые представляли собой плексигласовые дефектометры, экранированные с обеих сторон медными пластинами. При этом установлено, что контрастная чувствительность метода при обнаружении изменения толщины легкого слоя, массовая толщина которого составляет 30% от общей массовой толщины эталона, равна 8—9%, разрешающая способность не более 1 пары линий на миллиметр. Протяженные дефекты в легком наполнителе при углах ориентации  $0-30^\circ$  регистрируются, если ширины их раскрытия составляют 100 мкм и более. БЭИ-1 выявляет разноплотность легкого наполнителя, равную 10—12%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. А. Кононов, В. В. Евстигнеев и др. «Дефектоскопия», 1971, № 2.
  2. Б. А. Кононов, В. В. Евстигнеев, В. И. Бойко и др. Электронные ускорители. Вып. 2. М., Атомиздат, 1970.
  3. В. И. Бойко, В. В. Евстигнеев и др. «Дефектоскопия», 1973, № 1.
  4. В. И. Бойко, В. В. Евстигнеев и др. «Дефектоскопия», 1973, № 6.
-