

## ЭЛЕКТРОННАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Б. А. КОНОНОВ

(Представлена научным семинаром НИИ ЭИ)

Совершенно очевидно, что не может быть универсального метода неразрушающего контроля качества изделий и материалов, пригодного для дефектоскопии всей многообразной промышленной продукции. Очевидно также, что требования к качеству изделий, а следовательно, и контролю непрерывно растут, поэтому актуальность проблемы совершенствования методов контроля, уточнения границ их наиболее эффективного применения и разработки новых способов контроля постоянно увеличивается.

В настоящем сообщении рассмотрены состояния и некоторые задачи одного из методов радиационного контроля — дефектоскопии быстрыми электронами или электронной дефектоскопии.

Электронная дефектоскопия (ЭД), как любой другой способ радиационного контроля, основана на зависимости поля излучения (т. е. пространственных и энергетических характеристик его) за барьером от толщины его, атомного номера и плотности поглотителя, наличия неоднородностей в нем. Область разумного использования ЭД и чувствительность метода определяются закономерностями взаимодействия электронов с веществом и в первую очередь пробегом, рассеянием и потерей энергии частиц, основные особенности которых кратко напомним [1—4].

Потери энергии. Взаимодействуя с атомами вещества, электрон теряет энергию, причем среднюю энергию, потерянную на единице пути частицей  $dE/dx$ , называют линейной потерей энергии (ЛПЭ) или тормозной способностью среды, а энергию, поглощенную единицей массы вещества, отождествляют с поглощенной дозой, ЛПЭ могут быть рассчитаны по теории Бете-Гейтлера или измерены экспериментально и к настоящему времени имеется достаточное количество данных [4—8]. В области от 1 до 30 МэВ ЛПЭ почти линейно возрастают с энергией от 1,5 до  $2,5 \div 5$  МэВ  $\cdot$  г  $\cdot$  см $^{-1}$  для вещества с атомным номером от 13 до 82, причем при энергии свыше 6 МэВ большие потери энергии наблюдаются в веществах с большим  $Z$ . В слое конечной толщины  $\Delta t$  потеря

энергии  $\Delta E$  будет большей, чем  $\int_0^{\Delta t} \left( \frac{dE}{dx} \right) dx$  вследствие рассеяния электронов. Рассеяние приводит к увеличению пути электрона в барьере и росту потерь энергии. Рассеяние электронов растет с  $Z$  вещества и уменьшения энергии электронов. Поэтому, если рассматривать потерю энергии в слоях конечной толщины для не слишком узкого пучка — задача, представляющая для дефектоскопии практический интерес.

они оказываются не зависящими от  $E$  и слабо растущими с  $Z$ . Среда как бы оказывает постоянное сопротивление проникновению электрона: на малых энергиях ( $1 \div 5$  Мэв) малы ЛПЭ, но велико рассеяние частиц. Наоборот, с ростом энергии растут ЛПЭ, но уменьшается рассеяние.

Независимость потерь энергии от начальной энергии частицы подтверждается рис. 1, на котором представлена связь глубины проникновения в вещество электронов с энергией для веществ с  $Z$  от 6 до 82. Используются экспериментальные данные наши и Хардера [9], цифры у кривых соответствуют порядковому номеру элементов.

Пробег линейно растет с  $E$ . Из кривых нетрудно найти значения  $\Delta E/\Delta t$  для разных  $Z$ , которые можно использовать для подсчета средней энергии электронов за барьером.

Линейность потери энергии с ростом толщины барьера иллюстрируется рис. 2 по результатам наших с В. М. Антоновым измерений [10]. С увеличением толщины барьера от 50 до 500  $\text{мг}/\text{см}^2$  средние потери энергии линейно растут. Потери энергии слабо зависят от  $Z$ , хотя химический состав и кристаллическая структура могут влиять на торможение частиц в пределах 10% (рис. 2, кривые для Al и KCl).

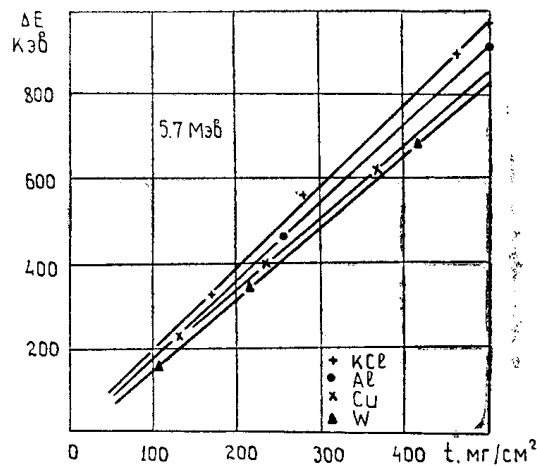
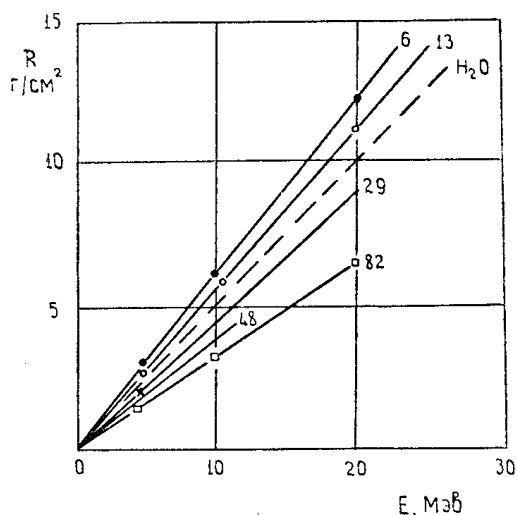


Рис. 1. Рост пробега с увеличением энергии электронов

Рис. 2. Средние потери энергии узкого пучка электронов в барьерах  $50 \div 500 \text{ мг}/\text{см}^2$

Отметим три следствия рассмотренных особенностей взаимодействия электронов с веществом. Во-первых, потеря энергии не зависит от энергии электрона (в указанном выше интервале), и, следовательно, электроны разных энергий, проходя сквозь данный барьер, теряют одну и ту же энергию. Во-вторых, потерянная энергия пропорциональна толщине барьера, и, следовательно, по мере проникновения электронов в поглотитель их энергия линейно уменьшается с глубиной. В-третьих, потеря энергии в барьере слабо зависит от  $Z$ , что позволяет использовать электронный пучок для контроля переменных по химическому составу или слоистых материалов.

Толщина материалов  $t$ , контролируемая электронным пучком с хорошей чувствительностью, лежит в области  $t = (0,6 \div 0,9) R_0$ ,

где  $R_0$  — экстраполированный пробег электронов в материале. Используя предложенную нами связь между начальной энергией и пробегом электрона, можно оценить энергию частиц, необходимую для контроля изделий заданной толщины, или для заданной максимальной

энергии электронов оценить толщины, доступные электронной дефектоскопии:

$$t = (0,6 \div 0,9) R_0 = (0,6 \div 0,9) \cdot [0,53E - 0,1 - (2,5E + 1)(Z - 13) \cdot 10^{-3}],$$

где  $t$  и  $R_0$  — в г/см<sup>2</sup>, а  $E$  — Мэв.

К толщине или наличию дефектов в просвечиваемом изделии чувствительны интенсивность и доза пучка и энергия электронов за барьером. Поэтому, как и в случае гамма-дефектоскопии, возможны следующие методы электронной дефектоскопии: ионизационный (сцинтилляционный), спектрометрический, радиография.

Вид зависимостей числа электронов, дозы и энергетического спектра от толщины и атомного номера поглотителя хорошо известен [1, 3, 8] и определяет чувствительность метода контроля.

Чувствительность ионизационного метода контроля может быть представлена в виде

$$|\delta x|_{\min} = \xi \cdot \omega / a(Zx), \quad (1)$$

где  $|\delta x|_{\min}$  — минимальный размер выявленного дефекта  $\Delta x$ , отнесенный к толщине изделия  $x$ ,  $\omega$  — чувствительность детектора;  $\xi$  — коэффициент надежности, обычно принимаемый равным 3;  $a(Z, x)$  — отношение относительного изменения интенсивности излучения за образцом к вызвавшему его изменению толщины образца. Выражение (1) не учитывает отношения площадей дефекта и коллиматора (т. е. предполагается  $S_{\text{деф}}/S_{\text{кол}} = 1$ ), которое может быть учтено обычным способом.

Для моноэнергетического электронного пучка с энергией в несколько Мэв, например,  $a(Z, x)$ , легко может быть получен в пределах от 20 до 30, что при  $\omega = 0,05$  позволяет достичь чувствительности порядка 0,5%.

Наиболее важным является то обстоятельство, что эту высокую чувствительность можно достичь в случае контроля слоистых материалов практически при любом сочетании толщины и атомных номеров вещества слоев, что недостижимо при других методах дефектоскопии.

Если в качестве детектора использовать рентгеновскую пленку, неоднородности изделия можно документировать [11]. Отличие от рентгенографии состоит в меньшей области просвечиваемых толщин  $t = (0,6 \div 0,9) R_0$ , при которых сохраняется корреляция между почернением пленки и размером дефекта при заданной энергии электронов, а также в большем размытии изображения, увеличивающемся с удалением от поверхности, из которой выходят электроны. В настоящее время границы целесообразного применения электронной радиографии не определены.

В несколько раз большая чувствительность достигнута при спектрометрическом методе электронной дефектоскопии. Автором совместно со Ю. М. Степановым детально проанализированы возможности спектрометрического метода применительно к контролю однородных и слоистых материалов, о чем будет сделано дополнительное сообщение. Показано, в частности, что чувствительность дефектоскопа определяется величиной вероятных потерь энергии электронов в контролируемом изделии и флуктуациями энергии пучка. Величина минимального выявляемого дефекта не зависит от толщины и слабо уменьшается с ростом атомного номера материала мишени, составляя  $3 \div 5$  мг/см<sup>2</sup>, или 0,1% от толщины изделия.

Каждый из рассмотренных выше методов электронной дефектоскопии, и особенно спектрометрический, требует высокой стабильности интенсивности и энергии электронного пучка, а также возможности плавной регулировки начальной энергии и хорошей моноэнергетичности электронов.

Какие ускорители электронов наиболее удовлетворяют требованиям

электронной дефектоскопии? Рассмотрим некоторые параметры ускорителей, представленных в таблице.

Т а б л и ц а

**Некоторые важные для дефектоскопии параметры электронных ускорителей**

|                             | $E_{\text{макс}},$<br>МэВ | Моноэнергетич-<br>ность, % | Стабильность<br>энергии | Регулировка<br>энергии | Интенсивность,<br>част/сек | Стабильность ин-<br>тенсивности |
|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Ускорители прямого действия | до 5                      | 0,1                        | $10^{-3}$               | плавная                | до $10^{17}$               | высокая                         |
| Линейные ускорители         | 1000                      | 5-15                       | $10^{-2}$               | ступенчатая            | $10^{12}$                  | средняя                         |
| Микротроны                  | 30                        | 0,5                        | $10^{-3}$               | »                      | $10^{12}-10^{14}$          | хорошая                         |
| Бетатроны                   | 30                        | 0,5                        | $10^{-3}$               | плавная                | $10^{10}-10^{12}$          | средняя                         |

Ускорители прямого действия имеют высокую моноэнергетичность, стабильность, но малую энергию электронов. Линейные ускорители плохи из-за моноэнергетичности пучка, сложности управления и дороговизны. Микротрон удовлетворяет всем требованиям, кроме плавной регулировки, которая сложна. Его использование целесообразно, если требуется высокая производительность контроля. Бетатрон позволяет получить сравнительно просто стабилизированный моноэнергетический пучок с легко регулируемой энергией. Однако в установках, изготовляемых серийно или мелкими партиями, частота следования импульсов излучения 50 Гц, а интенсивность порядка  $10^{10}$  эл/см<sup>2</sup>сек, что ограничивает производительность контроля, например, швов, скоростью до 1 м/мин. Область целесообразного использования электронного пучка микротрона или бетатрона подлежит уточнению и технико-экономическому анализу. Одно несомненно, в настоящее время имеются источники быстрых электронов, удовлетворяющие требованиям электронной дефектоскопии.

Сложнее с детекторами. В Томском политехническом институте разработана методика выбора детектора с целью достижения большей чувствительности. В основе методики лежит создание условий наиболее полного использования той части прошедшего электронного пучка, которая несет наибольший удельный объем информации. В некоторых случаях достаточно использование сцинтилляционных детекторов, но, по-видимому, для электронной дефектоскопии должен быть создан специальный детектор.

# ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Воробьев, Б. А. Кононов. Прохождение электронов через вещество. Томск, Изд. ТГУ. 1966.
2. В. М. Антонов, Б. А. Кононов, В. В. Евстигнеев. Изв. АН СССР, т. XXVIII, № 2, 400, 1964.
3. Б. А. Кононов и др. Дозиметрия больших доз. Сб. докл. Ташкент. Изд. ФАН, 1966.
4. Б. А. Кононов и др. Изв. АН СССР. Сер. физ., 28, 400, 1964.
5. M. I. Berger, S. M. Seltzer, Publ. 1133, NAS-NRC, 1964.
6. H. E. Halletal, Phys. Rev, 115, 633, 1959.
7. K. I. Vancamp, V. I. Vanhuse, Zeit. Phys, 211, 152, 1968.
8. Б. А. Кононов, Е. А. Гусев. Физика. 1969, № 6, 12.
9. D. Harder, Roschet, Phys. Let 24 B, N 10, 519, 1967.
10. В. М. Антонов, Б. А. Кононов. Тезисы VI межвуз. конференции по электронным ускорителям. Томск, Изд. ТГУ. 1967.
11. Б. А. Кононов и др. «Дефектоскопия». 1967, № 4, 81; 1968; № 4,