

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РАДИАЦИОННОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ НЕОДНОРОДНЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. А. ВОРОБЬЕВ

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института электронной  
интроскопии)

Внедрение в промышленность дефектоскопов, основанных на использовании проникающих излучений, может идти по пути создания уникальных специализированных установок для скоростного контроля однотипных изделий или материалов. В этом случае основными требованиями к установке будут высокая чувствительность, большая производительность, максимальная автоматизация процессов контроля и управления технологическим процессом на основе текущих данных, полученных в ходе контроля, и высокая надежность всей системы в целом. Другой путь направлен на разработку и создание универсальных дефектоскопов, предназначенных для контроля уникальных изделий или деталей, выпускаемых на одном предприятии. Основными требованиями к таким типам дефектоскопов будут: надежность, чувствительность и универсальность.

Под универсальностью понимается возможность быстрой перестройки дефектоскопа на другой режим работы, на контроль другого типа изделия или материала. Основными условиями, которые должны выполняться при перестройке на новый режим, являются воспроизводимость эксплуатационных характеристик установки в новом режиме и быстрое и надежное их определение. Определение чувствительности дефектоскопа при смене режима работы и параметров контролируемого объекта при их экспериментальном определении требует много времени и должно проводиться опытными специалистами. Использование оборудования дефектоскопической лаборатории для экспериментальных определений эксплуатационных характеристик и выбора оптимального режима работы установки в новых условиях требует наличия дополнительных комплектов контрольной аппаратуры, дополнительных помещений и вызывает значительные расходы. Все это устраняется, если будет применен теоретический расчет необходимых параметров исходя из экспериментальных данных, полученных при проведении контроля другого изделия или из специально проведенных экспериментов на образцах из специально выбранных материалов, которые принимаются за эталонные. Для проведения таких расчетов необходимо было разработать теорию и найти выражение, связывающее чувствительность, которая может быть выражена как минимальный размер выявляемого дефекта, с параметрами исследуемого объекта и допустимыми пределами их изменения при условии обеспечения заданного значения чувствительности.

Такое выражение основанное на уравнении ослабления интенсивности узкого пучка проникающего излучения в многокомпонентном материале, содержащем включения с параметрами, отличными от параметров самого объекта, может быть получено исходя из условия:

$$I = I_0 e^{-\mu_0(x\varphi - \delta) - \mu_0 \delta} \quad (1)$$

Эквивалентный линейный коэффициент поглощения излучения многокомпонентной неоднородной средой может быть записан

$$\mu_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i m_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\rho_i}} \quad (2)$$

где  $\alpha$  — весовое содержание каждой компоненты в единице веса исследуемого материала,  $m_i$  и  $\rho_i$  — соответственно массовый коэффициент поглощения излучения веществом компоненты и плотность  $i$ -й компоненты.

В неоднородных многокомпонентных материалах имеется большое число отдельных простых веществ. Это вызывает необходимость больших расчетов. Расчеты облегчаются, если ввести группирование компонент, близких по своим свойствам или входящих в состав материала в связанном виде. Примером таких групповых компонент может служить, например, гравий или щебень в бетоне, который состоит из многих элементов таблицы Менделеева, а в расчетах рассматривается как одна групповая компонента.

Записав закон прохождения излучения через поглотитель для двух объектов и взяв их отношение, получим

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{I_{01}}{I_{02}} e^{M_2 \rho_2 (x_2 \varphi_2 - \delta_2) - M_1 \rho_1 (x_1 \varphi_1 - \delta_1) + m_{\Delta_2} \rho_{\Delta_2} \delta_2 - m_{\Delta_1} \rho_{\Delta_1} \delta_1} \quad (3)$$

Выразив приращение величин в отношении их к соответствующим величинам, из [3] получим выражение, связывающее параметры двух многокомпонентных сред, параметры излучения, чувствительность приборов и величину наименьших выявляемых дефектов в двух контролируемых материалах.

Для наименьшего выявляемого размера дефекта

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \delta_1}{\delta_1} > \eta \frac{\frac{\Delta I_1}{I_1} + \frac{\Delta I_{01}}{I_{01}} + x_1 \varphi_1 \rho_1 M_1 \left[ \left( 1 - \frac{\delta_1}{x_1 \varphi_1} \right) \left( \frac{\Delta \rho_1(\rho)}{\rho_1} + \frac{\Delta \rho_1(\alpha)}{\rho_1} + \frac{\Delta M_1(m)}{M_1} + \right. \right.}{M_1 \rho_1 \delta_1 + m_{\Delta_1} \rho_{\Delta_1} \delta_1} \\ \left. \left. + \frac{\Delta M_1(\alpha)}{M_1} \right) + \frac{\Delta x_1}{x_1} + \frac{\Delta \varphi_1}{\varphi_1} \right] + x_2 \varphi_2 M_2 \rho_2 \left[ \left( 1 + \frac{\delta_2}{x_2 \varphi_2} \right) \left( \frac{\Delta \rho_2(\rho)}{\rho_2} + \frac{\Delta \rho_2(\alpha)}{\rho_2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\Delta M_2(m)}{M_2} + \frac{\Delta M_2(\alpha)}{M_2} \right) + \frac{\Delta x_2}{x_2} + \frac{\Delta \varphi_2}{\varphi_2} + \frac{\Delta \delta_2}{x_2 \varphi_2} \right] + \\ \left. + m_{\Delta_1} \rho_{\Delta_1} \delta_1 \left( \frac{\Delta m_{\Delta_1}}{m_{\Delta_1}} + \frac{\Delta \rho_{\Delta_1}}{\rho_{\Delta_1}} \right) + m_{\Delta_2} \rho_{\Delta_2} \delta_2 \left( \frac{\Delta m_{\Delta_2}}{m_{\Delta_2}} + \frac{\Delta \rho_{\Delta_2}}{\rho_{\Delta_2}} + \frac{\Delta \delta_2}{\delta_2} \right) \right), \quad (4) \end{aligned}$$

где

$$\frac{\Delta \frac{I_1}{I_2}}{\frac{I_1}{I_2}}$$

— относительная погрешность, вносимая в измерения за счет неточности определения отношения интенсивностей потоков излучения и за счет изменения этого отношения в процессе контроля вследствие изменения значения интенсивности одного из потоков, иначе может быть охарактеризована как изменение отношения относительных чувствительностей регистрирующих приборов.

$$\frac{\Delta \frac{I_{0_1}}{I_{0_2}}}{\frac{I_{0_1}}{I_{0_2}}}$$

— проведя аналогичные рассуждения, определяем как относительную нестабильность интенсивности источника в процессе проведения контроля исследуемого объекта;

$$x_1 \text{ и } x_2$$

— толщина первого и второго объектов соответственно;

$$\frac{\Delta x_1}{x_1} \text{ и } \frac{\Delta x_2}{x_2}$$

— точность измерения толщины и точность поддержания постоянства просвечиваемой толщины по всей области контроля для первого и второго объектов соответственно;

$$\varphi_1 \text{ и } \varphi_2$$

— коэффициент заполнения первого и второго материалов соответственно;

$$\frac{\Delta \varphi_1}{\varphi_1} \text{ и } \frac{\Delta \varphi_2}{\varphi_2}$$

— точность измерения коэффициентов заполнения и точность поддержания постоянства расчетного значения пористости по всей контролируемой области первого и второго материалов;

$$\alpha_1 \text{ и } \alpha_2$$

— весовые концентрации групповых компонент, входящих в материал первого и второго объектов соответственно;

$$\frac{\Delta \alpha_1}{\alpha_1} \text{ и } \frac{\Delta \alpha_2}{\alpha_2}$$

— точность измерения концентраций отдельных групповых компонент в материале и точность поддержания постоянства концентраций во всей контролируемой области первого и второго объектов соответственно;

$$\mu_1 = M_1 \rho_1 \text{ и } \mu_2 = M_2 \rho_2$$

— эквивалентные линейные коэффициенты поглощения излучения материалом первого и второго объектов соответственно;

$$M_1 \text{ и } M_2$$

— эквивалентные массовые коэффициенты поглощения излучения материалом первого и второго объектов соответственно;

$$\rho_1 \text{ и } \rho_2$$

— эквивалентные плотности материалов первого и второго объектов соответственно;

$$\Delta \rho_1(\alpha) \text{ и } \Delta \rho_2(\alpha)$$

— изменение эквивалентной плотности материалов первого и второго объектов соответственно за счет изменения концентраций отдельных групповых компонент в материале;

$$\frac{\Delta \rho_1(\alpha)}{\rho_1} \text{ и } \frac{\Delta \rho_2(\alpha)}{\rho_2},$$

где

$$\frac{\Delta \rho(\alpha)}{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\rho_i} \frac{\Delta \alpha_i}{\alpha_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\rho_i}}$$

— точность определения и точность поддержания постоянства значения эквивалентной плотности материала во всем контролируемом объеме первого и второго объектов соответственно, учитывая только изменение концентраций отдельных групповых компонент;

$$\Delta \rho_1(\rho) \text{ и } \Delta \rho_2(\rho)$$

— изменение эквивалентной плотности отдельных групповых компонент;

$$\frac{\Delta \rho_1(\rho)}{\rho_1} \text{ и } \frac{\Delta \rho_2(\rho)}{\rho_2},$$

$$\frac{\Delta \rho(\rho)}{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\rho_i} \frac{\Delta \rho_i}{\rho_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\rho_i}}$$

— точность определения и точность поддержания постоянства значения эквивалентной плотности материалов первого и второго объектов соответственно при учете исключительно изменения эквивалентной плотности за счет изменения плотности отдельных групповых компонент;

$$\Delta M_1(\alpha) \text{ и } \Delta M_2(\alpha)$$

— изменение эквивалентного массового коэффициента поглощения излучения материалом первого и второго объектов соответственно за счет изменения концентраций отдельных групповых компонент в материалах;

$$\frac{\Delta M_1(\alpha)}{M_1} \text{ и } \frac{\Delta M_2(\alpha)}{M_2},$$

где

$$\frac{\Delta M(\alpha)}{M} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i m_i \frac{\Delta \alpha_i}{\alpha_i}}{\sum_{i=1}^n \alpha_i m_i}$$

— точность определения и точность поддержания постоянства значения эквивалентного массового коэффициента поглощения излучения материалов первого и второго объектов соответственно при учете исключительно изменения величины коэффициентов поглощения за счет изменения концентраций отдельных групповых компонент в исследуемых материалах;

$$\Delta M_1(m) \text{ и } \Delta M_2(m)$$

— изменение эквивалентного массового коэффициента поглощения излучения материалами первого и второго объектов соответственно за счет изменения массовых коэффициентов поглощения излучения отдельными групповыми компонентами, материалами;

$$\frac{\Delta M_1(m)}{M_1} \text{ и } \frac{\Delta M_2(m)}{M_2},$$

где

$$\frac{\Delta M(m)}{M} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i m_i \frac{\Delta m_i}{m_i}}{\sum_{i=1}^n \alpha_i m_i}$$

— точность определения и точность поддержания постоянства значения эквивалентного массового коэффициента поглощения излучения материалом первого и второго объектов соответственно при учете исключительно изменения величины эквивалентного коэффициента поглощения за счет изменения массовых коэффициентов поглощения излучения отдельных групповых компонент рассматриваемых материалов;

$m_{\Delta_1}$  и  $m_{\Delta_2}$

— массовые коэффициенты поглощения излучения веществом, заполняющим полости дефектов в первом и втором объектах соответственно;

$$\frac{\Delta m_{\Delta_1}}{m_{\Delta_1}} \text{ и } \frac{\Delta m_{\Delta_2}}{m_{\Delta_2}}$$

— точность измерения или точность теоретического расчета величин массового коэффициента поглощения излучения материалом, заполняющим полости дефектов в первом и втором объектах соответственно;

$\rho_{\Delta_1}$  и  $\rho_{\Delta_2}$

плотности вещества, заполняющего полости дефектов в первом и втором объектах соответственно;

$$\frac{\Delta \rho_{\Delta_1}}{\rho_{\Delta_1}} \text{ и } \frac{\Delta \rho_{\Delta_2}}{\rho_{\Delta_2}}$$

— точность измерения или теоретического расчета плотности вещества, заполняющего полости дефектов в первом и втором объектах соответственно;

$\delta_1$  и  $\delta_2$

— линейные размеры дефектов в направлении распространения излучения в первом и втором объектах соответственно (эталонные размеры дефекта);

$\Delta \delta_1$  и  $\Delta \delta_2$

— изменение линейного размера дефекта в направлении распространения излучения, фиксируемое регистрирующим прибором (наименьший выявляемый размер дефекта при расчете выявляемости дефекта);

$$\frac{\Delta \delta_1}{\delta_1} \text{ и } \frac{\Delta \delta_2}{\delta_2}$$

— отношение наименьшего выявляемого размера дефекта к эталонному при расчете выявляемости дефектов. Точность определения величин дефектов в первом и втором объектах соответственно при исследовании условий моделирования одного объекта другим;

$x_1 \varphi_1$  и  $x_2 \varphi_2$

— толщина материала первого и второго объекта соответственно, т. е. толщина объекта в направлении распространения излучения за вычетом суммарной толщины воздуха пор в многокомпонентном неоднородном материале;

$$\frac{\delta_1}{x_1 \varphi_1} \text{ и } \frac{\delta_2}{x_2 \varphi_2}$$

— отношение линейного размера эталонного дефекта в направлении распространения излучения к толщине материала поглотителя для первого и второго объектов соответственно;

$$\frac{\Delta \delta_1}{x_1 \varphi_1} \text{ и } \frac{\Delta \delta_2}{x_2 \varphi_2}$$

— отношение линейного размера наименьшего выявляемого размера дефекта в направлении распространения к толщине материала поглотителя.

Примечание: Величина  $\Delta \delta$  характеризует размер наименьшего выявляемого размера дефекта при данных значениях параметров, входящих в уравнение. Условие  $\Delta \delta > \delta$  означает, что заданный эталонный размер дефекта  $\delta$  при данных условиях и данных параметрах не фиксируется регистрирующим прибором.

Из (4) может быть определен любой из членов при условии, что остальные заданы или определены теоретически или экспериментально.

При прохождении электромагнитного излучения через контролируемый объект в результате процессов взаимодействия излучения с веществом, наряду с поглощением и рассеянием первичного, идет накопление вторичного излучения. Это увеличение вторичных потоков излучения с толщиной поглотителя, накладываясь на поток первичного излучения, являющегося носителем информации о дефекте, и снижает чувствительность. Ухудшение выявляемости за счет накопления вторичного излучения может быть учтено через фактор накопления и будет пропорционально увеличению фактора накопления при переходе от эталонного объекта к исследуемому,  
т. е.

$$\Delta\delta \sim \frac{B_1}{B_2}.$$

Учитывая, что  $B_2 = B_1 + \Delta B_1$ , можем записать

$$\Delta\delta \sim 1 + \frac{\Delta B}{B}.$$

При анализе эксплуатационных характеристик дефектоскопов, проведении контроля материалов с различными толщинами и эффективными атомными номерами, влияние фактора накопления на чувствительность может быть учтено с помощью выражения

$$\frac{\Delta\delta}{\delta} = \eta \frac{\Delta\delta_1}{\delta_1} \left( 1 + \frac{\Delta B}{B} \right), \quad (5)$$

где  $\frac{\Delta\delta_1}{\delta_1}$  — рассчитывается по уравнению (4).

$\eta$  — коэффициент моделирования,

$\frac{\Delta\delta_2}{\delta_2}$  — изменение величины фактора накопления при переходе от эталонного материала к исследуемому.

Вышерассмотренный метод теоретического исследования чувствительности радиационной дефектоскопии дает возможность учитывать влияние параметров, входящих в (4) и (5), на выявляемость и рассчитывать ожидаемую чувствительность при просвечивании объектов с известными параметрами.