

Выявление локальных неоднородностей на фоне
распределенных методами радиационного
просвечивания

Воробьев В.А., Кивран В.К., Колбин А.М.

Представлена объединенным семинаром секторов
ДСМ и МРД НИИ ЭИ

В некоторой однородной среде с коэффициентом ослабления распределены неоднородные включения, имеющие отличный коэффициент ослабления μ_1 . Неоднородность такой структуры определена коэффициентом линейной однородности ν со статистическими параметрами: $\bar{\nu}$ — плотность заполнения структуры неоднородными включениями, σ — среднеквадратическая флуктуация коэффициента линейной однородности, $K(\tau)$ — функция автокорреляционной зависимости этого коэффициента. Под коэффициентом линейной однородности здесь понимается отношение пути потока излучения через неоднородные включения ко всему пути в данной структуре [1].

Величина потока в каждой точке детектора определяется выражением

$$I(x) = I_0 e^{-\mu_0 H} \cdot e^{-(\mu_1 - \mu_0) \nu(x) H} + I_p, \quad (1)$$

где неоднородностью потока рассеянного излучения I_p можно пренебречь [2]. Здесь I_0 — начальный поток излучения, H — толщина барьера.

Средняя величина потока определяется как

$$\bar{I} = I_0 B e^{-\mu_0 H} \cdot e^{-(\mu_1 - \mu_0) \bar{\nu} H} = I_0 B e^{-\bar{\mu} H}, \quad (2)$$

где B — величина фактора накопления, а

$$\bar{\mu}_2 = \mu_1 \bar{v} + \mu_0 (1 - \bar{v}) \quad (3)$$

выступает в роли коэффициента ослабления поглотителя в целом, включая и неоднородности. Среднеквадратическая флуктуация потока определяется выражением

$$\sigma(I) = (\mu_1 - \mu_0) N \frac{\sigma}{B} \bar{I} \quad (4)$$

в предположении, что флуктуации рассеянного излучения за барьером малы по сравнению с флуктуациями первичного излучения.

Присутствие в структуре дополнительного локального включения толщиной $h(x)$ в направлении распространения потока и с коэффициентом ослабления μ_2 приводит к изменению потока за этой неоднородностью согласно выражению

$$I(x) = I_0 e^{-\mu_0 N} e^{-(\mu_1 - \mu_0) v(x) N} e^{-h(x) [(\mu_2 - \mu_0) - (\mu_1 - \mu_0) v(x)]} \quad (5)$$

Задача выявления этой локальной неоднородности подобна задаче выделения сигналов из шумов, где изменение потока ΔI от локального включения можно трактовать как сигнал на фоне случайного потока, который можно рассматривать как шум, то есть выявление такой неоднородности определяется так называемым соотношением сигнал-шум, то есть

$$\Delta I = \mathcal{K} \sigma(I),$$

где \mathcal{K} — множитель, определяемый коэффициентом доверия, обычно он принимается равным трем (правило трех сигма).

Отсюда следует, что при амплитудном анализе потоков минимальная выявляемая неоднородность определяется выражением

$$\frac{h}{N} = \mathcal{K} \frac{\mu_2 - \mu_0}{\mu_1 - \mu_0} - \bar{v} \sqrt{\sigma \frac{\xi}{B}}, \quad (6)$$

где коэффициент ξ определяется поперечными размерами локальной неоднородности (протяженностью его) и глубиной её залегания. Так, если локальное включение имеет значительную протяженность, или оно расположено вблизи детектора, $\xi \rightarrow 1$, если же неоднородность залегает достаточно глубоко и имеет незначительную протяженность, то множитель $\frac{\xi}{B} \rightarrow 1$.

Если поперечные размеры локальной неоднородности превышают

интервал автокорреляционной зависимости коэффициента линейной однородности, используя различные способы усреднения флуктуаций, можно улучшить выявляемость локальной неоднородности [3].

Один из этих способов сводится к вычислению по данным радиограмм полного ослабления потока по всей длине радиограммы (или среднего значения его по этой радиограмме). Величина сечения локального включения определяется из выражения

$$S = L \frac{N[(\mu_1 - \mu_0)\bar{v} + \mu_0] + \rho_n \frac{\bar{I}}{I_0} - \rho_n B}{\mu_2 - \mu_0 - (\mu_1 - \mu_0)\bar{v}}, \quad (7)$$

если имеется предположение относительно коэффициента ослабления локального включения μ_2 (L - длина радиограммы). В противном случае образец можно просветить по двум направлениям и решить систему аналогичных уравнений относительно коэффициента ослабления включения и его объема.

Величину сечения включения можно получить и из выражения

$$S = \frac{\rho_n \frac{\bar{I}_1}{I_2}}{\left(\frac{1}{L_2} - \frac{1}{L_1}\right) [\mu_2 - \mu_0 - (\mu_1 - \mu_0)\bar{v}]} \quad (8)$$

если произвести вычисление средних потоков \bar{I}_1 и \bar{I}_2 по одной и той же радиограмме, но при использовании разных отрезков ее, L_1 и L_2 .

При использовании дифференциальных схем измерения, то есть вычислении средних потоков по двум соседним участкам радиограммы, сечение включения определяется выражением

$$S = L \frac{\rho_n \bar{I}_1 / \bar{I}_2}{\mu_2 - \mu_0 - (\mu_1 - \mu_0)\bar{v}}. \quad (9)$$

Вышеописанный способ усреднения флуктуаций одинаково применим как в радиометрии, так и в радиографии, где вместо среднего ослабления потока вычисляется среднее значение снимаемых с детектора показаний, функционально связанных с величиной потока. В выражениях по определению размеров выявляемых включений могут войти дополнительные коэффициенты, величину которых можно определить экспериментально.

Минимальная толщина выявляемых включений определяется выражением

$$\frac{h}{H} = \alpha \sqrt{\frac{Lz}{\ell}} \left| \frac{\mu_2 - \mu_0}{\mu_1 - \mu_0} \right|^{-1} \frac{\sigma}{B} + \frac{L}{\ell} \frac{(\mu_1 - \mu_0) \Delta V + \Delta \mu \bar{V}}{\mu_2 - \mu_0 - (\mu_1 - \mu_0) \bar{V}}. \quad (10)$$

Здесь ℓ - протяженность включения, а z - интервал основной автокорреляционной зависимости коэффициента линейной однородности, ΔV и $\Delta \mu$ - погрешности в определении плотности заполнения и коэффициентов ослабления. Зависимость выявляемости от глубины залегания включений незначительна, а с увеличением толщины относительная выявляемость улучшается также за счет увеличения протяженности выявляемых включений, так как абсолютная выявляемость их радиационными методами, вообще говоря, понижается.

Для улучшения чувствительности может быть использован другой способ усреднения флуктуаций, основанный на построении по измеренным детекторами показаниям специальных кривых функционалов, имеющих специфический вид в присутствии инородного локального включения. Предложенный способ требует, чтобы локальное включение полностью уместилось на длине радиограммы, а еще лучше, если длина рассматриваемого участка теневого изображения в 2-5 раз была бы длиннее протяженности локальной неоднородности. Здесь предполагается построение по данным радиограммы функционала

$$F(x) = \int_0^x \left[\ln I(x) - \frac{1}{L} \int_0^L \ln I(x) dx \right] dx. \quad (11)$$

Кривая этого функционала имеет явно выраженные минимум и максимум на границах локального включения с переходом через нуль над ним. На границах радиограмм эта кривая исходит от нуля. Величина включения определяется размахом кривой функционала ΔF и находится из выражения

$$S = \frac{\Delta F}{1 - \frac{\ell}{L}} \frac{1}{\mu_2 - \mu_0 - (\mu_1 - \mu_0) \bar{V}}. \quad (12)$$

Минимальная ширина выявляемой локальной неоднородности определяется выражением

$$\frac{h}{H} = \alpha \sqrt{\frac{\ell z}{(L-\ell)\ell}} \left| \frac{\mu_2 - \mu_0}{\mu_1 - \mu_0} - \bar{\mu} \right|^{-1} \frac{\sigma}{3}. \quad (13)$$

Зависимость выявляемости от глубины залегания локальных включений еще меньше, чем при первом способе усреднения флуктуаций, так как здесь практически используются более длинные радиодиаграммы, в 2-5 раз превышающие протяженность выявляемых неоднородностей.

При использовании описываемого способа усреднения флуктуаций можно строить другой функционал

$$\Psi(x) = \int_0^x \left[I(x) - \frac{1}{L} \int_0^L I(x) dx \right] dx, \quad (14)$$

который имеет те же особенности кривой, что и функциональная (II). Величина сечения определяется аналогичным выражением, что и (I2),

$$S = I_0 e^{\mu_0 H} e^{(\mu_1 - \mu_0) \sqrt{H}} \frac{\Delta \Psi}{1 - \frac{P}{L} (\mu_2 - \mu_0) - (\mu_1 - \mu_0) \sqrt{H}} \quad (15)$$

то есть сечение локального включения определяется величиной размаха функционала, общий коэффициент при котором можно определять и экспериментально.

Физический смысл функционала (I4) состоит в том, что здесь производится сравнение величины потока в каждой точке со средним потоком по всей радиодиаграмме, при этом, как правило, эта разность за локальной неоднородностью одного знака, а за участками радиодиаграммы без неё — другого знака.

Вообще говоря, вместо величины $\ln I(x)$ и $I(x)$ в функционалах (II) и (I4) можно ставить любые другие показания, снимаемые с детекторов, функционально связанные с величиной потока. Выявляемость локальных включений от этого не изменится, а сечение их определяется, как и прежде, величиной размаха соответствующих кривых функционалов.

Оба способа усреднения флуктуаций могут быть использованы при выявлении локальных неоднородностей как в первичном, так и в полном потоке, однако выявляемость их в полном потоке выше, чем в первичном за счет дополнительного уменьшения относительных флуктуаций потока рассеянным излучением.

Л и т е р а т у р а

1. Воробьев В.А., Кивран В.К., Наац И.Э. Математическое моделирование распределения потоков излучения за барьерами с гетерогенной зернистой структурой. Труды I Межвуз. научно-технической конференции по радиационной физике. Изд. ТГУ, Томск, 1969.
2. Воробьев В.А., Гаякалов Ю.Д., Тарасов Г.П. Чувствительность радиационной дефектоскопии неоднородных материалов. Физика. Краткое содержание докладов к 26 научной конф. ЛИСИ, Л., 1968.
3. Воробьев В.А., Кивран В.К., Наац И.Э. Разработка методов выявления дефектов в телах с неоднородной структурой при радиационной дефектоскопии. Ученые записки педагогического института г. Улан-Удэ, 1969.