

К ТЕОРИИ РАДИАЦИОННОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ТЕЛ С НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ ТИПА БЕТОНА

В. А. ВОРОБЬЕВ, Ю. Д. ГАВКАЛОВ

(Представлена объединенным научным семинаром секторов ДСМ и МРД).

Повышение экономической эффективности строительства с использованием сборных железобетонных конструкций определяет необходимость разработки теории и техники неразрушающих методов контроля применительно к неоднородным материалам типа бетона. Одним из таких методов является просвечивание изделий тормозным излучением бетатрона. Как показали исследования [1], созданные в Томском политехническом институте переносные, передвижные и стационарные бетатроны успешно могут быть применены для выявления несплошностей и элементов армирования и скрытых коммуникаций в бетонных изделиях толщиной до 2 м. В настоящей статье рассматриваются основные положения теории радиационной дефектоскопии неоднородного материала типа бетона и методики экспериментального исследования выявляемости несплошности в бетоне.

Общим условием обнаружения дефекта в прямых методах регистрации информации при просвечивании изделий является

$$\Delta U = \kappa \delta_U, \quad (1)$$

где ΔU — величина сигнала на выходе регистрирующей системы, вызванного дефектом,

δ_u — приведенные к выходу среднеквадратичные шумы, обусловленные различными случайными процессами всей системы в целом (в предположении отсутствия их корреляций),

κ — коэффициент вероятности обнаружения.

В отличие от системы с однородным поглотителем при просвечивании бетона преобладающими по уровню шумов являются флуктуации интенсивности излучения δJ , за слоем бетона вызванные неоднородностью его структуры.

При случайном гауссовском распределении мелких воздушных пор, мелкого заполнителя (песка) по объему обусловленные последним флуктуации δJ имеют порядок статистических флуктуаций поглощения излучения слоем однородного материала. Поэтому вся величина δJ определяется неравномерным распределением крупного заполнителя (гравия, щебня) в квазиоднородной среде (вода + цемент + песок) [2].

В интервале энергии гамма-излучения $E_\gamma = 0,5 \div 30$ Мэв отличие массовых коэффициентов ослабления μ_p крупного заполнителя и среды

(химический состав взят из [3]) для обычного бетона не превышает 1,5%, т. е. $\Delta\mu \simeq 0$, откуда

$$\Delta\mu = \mu \frac{\Delta\rho}{\rho}, \quad (2)$$

где μ — линейный коэффициент ослабления бетона,
 $\Delta\rho$ — разность плотности крупного заполнителя и среды,
 ρ — плотность бетона.

Значение $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ достигает для обычного бетона 30%. Однако для энергии тормозного излучения ≥ 6 Мэв и слоя обычного бетона > 10 см подобного изменения μ недостаточно для выявления отдельного зерна заполнителя и флуктуации интенсивности δ_I обусловлены флуктуациями распределения крупного заполнителя по всей толщине слоя бетона.

Интенсивность излучения за поглотителем составляет первичное излучение I и рассеянное J_p . В общем случае изменением J_p за счет дефекта можно пренебречь [3], аналогично показанному во [2], можно пренебречь флуктуациями рассеянного излучения δ_{J_p} , обусловленными неоднородной структурой бетона. Тогда изменение интенсивности излучения, обусловленное дефектом типа воздушной полости диаметром Δx , равно

$$\Delta I = I\mu\Delta x, \quad (3)$$

а среднеквадратичные флуктуации интенсивности равны

$$\delta_I = I\Delta\mu\delta_n = I \frac{\Delta\rho}{\rho} \mu\delta_n, \quad (4)$$

где δ_n — среднеквадратичные флуктуации суммарной длины h отрезков луча излучения через крупный заполнитель.

Согласно (1), из (3) и (4) получаем условие выявляемости воздушной полости

$$|\Delta x| \leq \Delta x \geq \kappa \frac{\Delta\rho}{\rho} \delta_n, \quad (5)$$

где $[\Delta x]$ — выявляемость в слое гомогенного материала тождественной слою бетона толщины h с тождественным ослабляющим излучением свойством.

При энергии излучения, когда становится возможным выявление отдельного зерна крупного заполнителя ($E_\gamma \leq 1$ Мэв) и когда детектором регистрируется и рассеянное излучение (например, рентгенография), ввиду намного лучшей выявляемости дефектов, прилегающих к детектору (примерно в B раз, где B — фактор накопления), условие (5) принимает вид

$$\Delta x = \kappa \frac{\Delta\rho}{\rho} (\delta_n + h_0), \quad (6)$$

где $h_0 = h_0(E_\gamma)$ и по величине порядка диаметра крупного заполнителя.

Значения δ_n могут быть определены расчетным путем посредством моделирования распределения зерен в ограниченном объеме или экспериментально

$$\delta_n = \delta_n \frac{\rho}{\Delta\rho} K, \quad (7)$$

где $K = \frac{|\Delta x|}{\Delta D}$, или $K = \frac{|\Delta x|}{\Delta U}$,

$\Delta D, \Delta U$ — изменение оптической плотности снимка дефектом при радиографии и сигнала на выходе электронной схемы при радиометрическом методе регистрации соответственно,

Δx — толщина эталона, имеющего плотность бетона,

δ_n — равны δ_D или δ_u — среднеквадратичные флуктуации оптической плотности снимка или сигнала с радиометрической схемы.

Коэффициент K в (7) в общем случае зависит от энергии излучения и толщины слоя бетона.

В каждом сечении блока бетона плоскостью, параллельной плоскости облучения бетона, распределение зерен в конкретном случае может быть различным, например, из-за наличия включений, из-за недостаточно равномерного уплотнения и т. д. Однако для общего анализа основных характеристик функции $h(z, y)$ от энергии излучения, толщины слоя бетона и его технологического состава можно принять, что $h(\vec{r})$ обладает эргодическим свойством, т. е. ее вероятностные характеристики не зависят от направления \vec{r} (Z, Y — плоскость поглотителя, противоположная облучаемой).

Нами были исследованы характеристики флуктуаций оптической плотности рентгеновских снимков при просвечивании блоков бетона тормозным излучением бетатронов.

Определялись

1. Математическое ожидание

$$\langle D \rangle \simeq \frac{1}{R} \int_0^R D(r) dr. \quad (8)$$

2. Среднеквадратичное изменение

$$\delta_D = \sqrt{\frac{1}{R} \int_0^R [D(r) - \langle D \rangle]^2 dr}. \quad (9)$$

3. Корреляционная функция

$$K_D(r) = \frac{1}{R-r} \int_0^{R-r} [D(\xi) - \langle D \rangle][D(\xi+r) - \langle D \rangle] d\xi, \quad (10)$$

где $D(r)$ — определялось как изменение D вдоль произвольной линии на плоскости негатива,

R — отрезок прямой линии на негативе, равный или больший $10 r_0$, а r_0 определяется из условия $K(r_0) \leq 0,1 K(0)$

Экспозиции при просвечивании подбирались достаточными для получения $D = 1,5 \pm 0,2$ единиц. Негатив фотометрировался по произвольно выбранному направлению при площади развертывающего пучка света $0,2 \times 0,2$ мм².

Из полученных данных следует, что интервал корреляции $t = 2r_0$ зависит от технологического состава бетона. В интервале толщин слоя обычного бетона 10—30 см t изменяется на 15% при отклонении количества крупного заполнителя на 30%. С увеличением энергии излучения (от 6 Мэв до 30 Мэв) интервал корреляции остается постоянным, изменяются только среднеквадратичные флуктуации δ_D , что подтверждает отмеченный выше вывод о независимости δ_I от величины рассеянного излучения.

Расчетным условием выявляемости несплошности на фоне флуктуаций почернения негатива, обусловленных конгломератной структурой бетона, наряду с (5) или (6) может быть

$$\Delta D = x\delta_D, \quad (11)$$

где ΔD — изменения оптической плотности дефектом для однородного материала ($\Delta D = K^{-1}\Delta x$; (7)). Подставляя значение ΔD и коэффициента K в (II), получим

$$\Delta x = Kx\delta_D = \frac{2,3B \cdot x \cdot \delta_D}{g \cdot \mu}, \quad (12)$$

где g — градиент контрастности рентгеновской пленки,
 B — фактор накопления.

Таким образом, если известны $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ и δ_h или δ_D и μ , g , B , то выявляемость воздушной полости может быть рассчитана по (5) или (12).

Экспериментальная проверка расчетных значений выявляемости воздушной полости, выполненных нами по (12), проведена при просвечивании образцов тормозным излучением малогабаритного бетатрона. Поскольку ΔD является четной функцией от Δx (на линейном участке характеристической кривой) в качестве эталона использовались специально подобранные зерна гравия, имеющие диаметр 5—20 мм. Излучение бетатрона направлялось вверх, и на подставке устанавливалась тонкая алюминиевая пластина, на которую укладывались случайным образом зерна, а затем на них образцы бетона и кассета с пленкой. Если по двум снимкам оказывалось возможным обнаружить 9 зерен из 10, зерно считалось выявленным. Получено в пределах 20% соответствие с расчетными значениями выявляемости воздушной полости, которые составили 7,8 и 10 мм для 10, 20 и 40 см обычного бетатона соответственно. Это составляет выявляемость в 4—2,5% для основной массы выпускаемых заводами элементов бетонных строительных конструкций.

Представленные в статье данные могут служить основой для составления методики и проектирования радиационной дефектоскопии железобетонных конструкций в заводских условиях и на строительномонтажных площадках.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Воробьев. Труды 4-й Международной конференции по бетатронам. 332, Прага, 1966.
2. В. А. Воробьев, Ю. Д. Гавкалов, Г. П. Тарасов. В сб.: «Физика», доклады XXVI научной конференции ЛИСИ, 48, Л., 1968.
3. Неразрушающие испытания. Справочник под ред. Р. Мак-Мастера, изд. «Энергия», М.—Л., 1965.