

О погрешностях измерения эквивалентного диаметра дефекта прямыми преобразователями с использованием АРД-диаграмм.

Луценко Г. Г.

НПФ «Ультракон-Сервис», г. Киев

ВВЕДЕНИЕ

Использование АРД-диаграмм (в качестве одного из приёмов дефектометрии) описано в известной справочной и монографической литературе [1, 2, 3]. Эффективность использования АРД-диаграмм основана на том, что изменяющиеся от эксперимента к эксперименту параметры среды (скорость продольных волн) и пьезоэлектрического преобразователя (рабочая частота, размеры) входят в обобщённые (нормированные) переменные g, x , от которых зависит амплитуда эхо-сигнала A , выраженная в дБ. Сама же функция $A(g, x)$, где $g = d/D$ - отношение диаметров дефекта и пьезопреобразователя (ПЭП) и $x = \lg(r/R)$ - логарифм отношения расстояния по лучу к длине ближней зоны ($R = D^2 f / 4c$), остаётся неизменной при вариации параметров измерительного эксперимента. При измерении амплитуды, частоты и пр. неизбежны погрешности, приводящие в итоге к ошибке в определении эквивалентного диаметра дефекта. Оценка величины погрешности в зависимости от допусков на точность измерения исходных данных является предметом данной работы.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ДИАМЕТРА.

Рассмотрим более детально процедуру измерения. Основному измерению предшествует калибровочный эксперимент, устраняющий неопределённость сквозного коэффициента передачи электроакустического тракта. Будем предполагать, что калибровка производится по величине донного эхо-сигнала с использованием соответствующей кривой Крауткремера $A_b(x)$. Тогда нетрудно получить следующее выражение для приведенной амплитуды A эхо-сигнала от дефекта через непосредственно измеренные амплитуды эхо-сигналов: донного A_{b1} и от дефекта A_1 :

$$A = A_1 - (A_{b1} - A_b(x_H)) + 2(\alpha r - \alpha_1 H) 20 \lg(e) \quad (1)$$

Амплитуда A_b определяется по донной кривой АРД-диаграмм Крауткремера при $x = x_H = 4c_1H/D^2f$. Здесь мы рассматриваем общий случай, когда параметры материала образца при калибровке (скорость звука c_1 и коэффициент поглощения α_1) отличаются от параметров материала детали (c, α). По приведенной амплитуде A и рассчитанному обобщённому расстоянию $x = \lg(4cr/D^2f)$ находят эквивалентный диаметр дефекта. При этом в явной или неявной форме используется зависимость, «обратная» функции АРД-диаграмм: $g(A, x)$, так что $d = Dg(A, x)$.

Остановимся на способах задания зависимостей $A(g, x)$ и $g(A, x)$. Как правило, зависимость $A(g, x)$ задана в виде набора графиков, параметром которых является аргумент g , принимающий значения из дискретного набора в интервале от 0.05 до 1. С ростом обобщённого расстояния x графики асимптотически переходят в прямые линии, которые соответствуют закону обратных квадратов для амплитуд эхо-сигналов в дальней зоне в среде без потерь. Граница дальней зоны весьма условна. С достаточной для практики точностью можно принять в качестве граничного значение $x = 1$ ($r/R = 10$). В области $x > 1$ (и в указанном диапазоне аргумента g) справедливы энергетические соображения, в соответствии с которыми амплитуда эхо-сигнала пропорциональна площади отражателя (или квадрату диаметра). Из этого следует, что в координатах (u, x) , где $u = 40 \lg(g)$, поверхность $A(u, x)$ в указанных пределах представляет собою плоскость и определяется как $A = B + u - 40(x - 1)$. Константа B здесь выбирается так, чтобы согласовать эту плоскость со значениями АРД-диаграмм при $x = 1$. Соответственно, «обратная» зависимость определяется простыми соотношениями: $u = A + 40(x - 1) - B$, $g = 10^{u/40}$. АРД-диаграмма донного сигнала в рассматриваемой области представляет собой прямую линию вида: $A_b(x) = B_b - 20(x - 1)$. При уменьшении x (в области $x < 1$) линейность связи приведенной амплитуды с аргументами u, x утрачивается, однако зависимость $A(u)$ при любом $x = const$ остаётся монотонной, лишь постепенно отклоняясь от линейной. Это позволяет подобрать для каждого значения $x = const$ полином $P_1(u)$, достаточно точно описывающий зависимость $A(u)$, и другой полином $P_2(A)$, описывающий «обратную» зависимость $u(A)$. Таким образом, АРД-диаграммы $A(u, x)$ и «обратные»

АРД-диаграммы $u(A, x)$ можно описать таблицами полиномиальных коэффициентов на некотором дискретном наборе значений обобщённого расстояния x . Такое представление «обратных» АРД-диаграмм оказалось удобным для вычисления погрешности измерения эквивалентного диаметра отражателя.

Остановимся на факторах, обуславливающих эту погрешность. Исходные величины, необходимые для расчёта эквивалентного диаметра отражателя, сами определяются измерением. Расстояния r, H и скорости c, c_1 могут быть измерены с весьма малой относительной погрешностью и поэтому в дальнейшем будем предполагать эти величины точно известными. Значительно более существенными и трудно устранимыми являются ошибки при измерении амплитуд эхо-сигналов A_1 и A_{b1} , вызванные разбросом условий контакта. Существенную роль играет неточность определения коэффициентов поглощения. Наконец, неточность определения рабочей частоты приводит к неверному вычислению нормированного расстояния и, вследствие этого, к ошибке в определении эквивалентного диаметра.

Переходя к количественным соотношениям, будем предполагать, что ошибки не слишком велики, так что в приводимых ниже выражениях дифференциалы можно заменить конечными приращениями. Учитывая приведенные выше формулы для обобщённых переменных x и u , нетрудно установить, что относительная погрешность вычисления эквивалентного диаметра отражателя:

$$\frac{\delta d}{d} = 0.025 \left(- \left(\frac{\partial u}{\partial A} \frac{\partial A_b}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\delta f}{f} + \frac{\partial u}{\partial A} \delta A' \right) \quad (2)$$

Здесь величина $\delta A' = \delta A_1 - \delta A_{b1} + (r\delta\alpha - H\delta\alpha_1)40 \lg(e)$ определяет собой погрешность измерения приведенной амплитуды, вызванную ошибками при непосредственном измерении амплитуд эхо-сигналов и при измерении поглощения звука в материалах детали и контрольного образца. Формула (2) определяет относительную погрешность как случайную величину, линейно зависящую от других случайных величин, являющихся результатами непосредственных измерений. Среднеквадратичное значение случайной относительной погрешности вычисляется по обычным правилам математической статистики с учётом средних значений (смещений) и дисперсий результатов непосредственных измерений, которые в данном случае можно считать статистически независимыми. Если предположить, что оценка значения рабочей

частоты является несмещённой, то эффективную относительную погрешность измерения эквивалентного диаметра следует определять по формуле:

$$\frac{\delta d}{d} = 0.025 \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial A} \frac{\partial A_b}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \frac{\langle \delta f^2 \rangle}{f^2} + \left(\frac{\partial u}{\partial A} \right)^2 \langle \delta A'^2 \rangle} \quad (3)$$

(Треугольные скобки означают статистическое усреднение).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЁТОВ.

В общем случае значения производных, входящих в формулу (3), должны быть определены численно. В соответствии со способом задания функции $u(A, x)$, который описан в предыдущем разделе, частная производная $\partial u / \partial A$ вычислялась как производная от полинома, а частные производные $\partial u / \partial x$ и $\partial A_b / \partial x$ находились как конечно-разностные производные.

Ниже приведен пример распределения относительной погрешности для случая, когда $\langle \delta A'^2 \rangle = 2$ дБ, неточность определения рабочей частоты составляет 5%, $x_H = 0.5$.

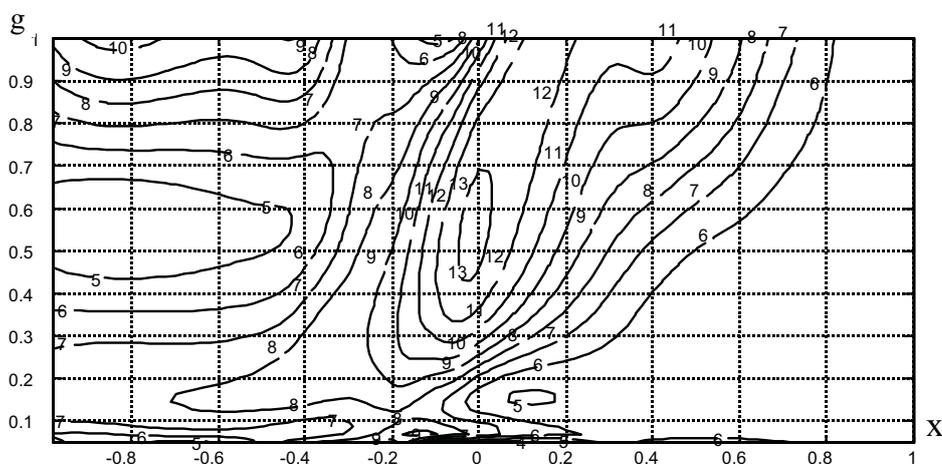


Рис. 1.

Видно, что погрешность достигает наибольших значений, если дефект расположен в конце ближней зоны.

Экспериментальное исследование погрешностей определения диаметра дефекта проводилось на стандартных образцах МДМ, содержащих плоскодонные дефекты различных диаметров на различной глубине. Использовались по 10 образцов преобразователей следующих типов: 1.25К20, 2.5К12, 2.5К20, 5К12.

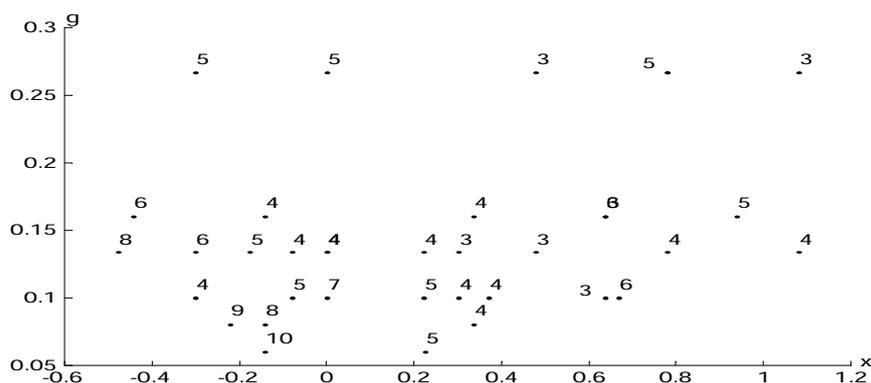


рис. 2

Для каждого из преобразователей производилась независимая калибровка на донный сигнал на том же образце, где располагался контрольный плоскодонный дефект. Это минимизировало погрешность, связанную с неопределённостью коэффициента поглощения, а также погрешность, связанную с влиянием боковых стенок образца. Кроме того, рабочая частота ПЭП дополнительно измерялась, что уменьшило погрешность $\delta f/f$. Комбинациям номинальных частот, размеров дефектов и расстояниям до них соответствует набор точек на плоскости нормированных расстояний и диаметров (x, g) . Для каждой из них измерялась погрешность измерения заранее известного диаметра. Эта погрешность содержала систематическое уклонение и разброс. Систематическое уклонение можно объяснить несовершенством поверхности образца (износ). Значения среднеквадратического разброса в процентах приведены на рис.2 для разных (x, g) .

ЛИТЕРАТУРА.

1. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995, 488 с.
2. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.
3. Алёшин Н. П., Белый В. Е., Вopilкин А. Х., Воцанов А. К., Ермолов И. Н., Гурвич А. К. Методы акустического контроля металлов. М.: Машиностроение, 1989. 456 с.