

Дифракционно-временной метод контроля



**Ермолов
Игорь Николаевич**

Главный научный
сотрудник
НПО ЦНИИТМАШ.
Д. т. н., профессор,
III уровень
по акустическому
виду НК.

Во всех странах, занимающихся УЗК, большое внимание привлекает к себе дифракционно-временной метод (ДВМ), позволяющий надежно выявлять наиболее опасные плоскостные дефекты, определять характер дефекта и размеры. На VII Европейской конференции по НК (1998 г., Копенгаген) очень много докладов было посвящено этому методу [2]. На XV Всемирной конференции (2000 г., Рим) этому вопросу было посвящено специальное заседание одной из секций [3].

Метод также называют времяпролетно-дифракционным, буквально переводя английское название (The OT RISE IT YONGAS TOP — TOPO). Метод основан на приеме волн, рассеянных на концах плоскостного дефекта (трещины, непровара). По заявлению директора Датского института сварки (он прочитал доклад на пленарном заседании VII Европейской конференции), метод сделал УЗК пригодным не только для оценки качества работы сварщика, но также для оценки влияния дефекта на прочностные свойства сварной конструкции.

В России ДВМ почти не употребляется, хотя уже довольно давно были выполнены серьезные исследования по особенностям этого метода [4, 5]. Он отсутствует в действующих российских стандартах и ведомственных методических рекомендациях.

Систематическое изложение особенностей метода содержится в британском стандарте BS 7706:1993 [1] (далее БС). По сообщениям английских специалистов стандарт действует также в настоящее время. Однако этот документ содержит много ошибок в формулах, повторах, общих рассуждений. В ЦНИИТМАШ

выполнен перевод этого стандарта, исправлены ошибки, устранены повторы. В сокращенном виде стандарт и комментарии к нему направлены для публикации в журнал «Дефектоскопия» [6]. Учитывая важность широкого распространения метода в России для надежного контроля и разбраковки сварных соединений, ниже излагаются его основные положения.

Принцип метода

ДВМ реализуется с использованием пары преобразователей, расположенных по разные стороны от дефекта (рис. 1). Пучок ультразвуковых лучей из одного преобразователя взаимодействует с поверхностью дефекта и принимается другим преобразователем. Волны, получившиеся в результате дифракции на концах дефекта, складываются с обычными отраженными волнами и распространяются от кончиков в виде широких пучков лучей.

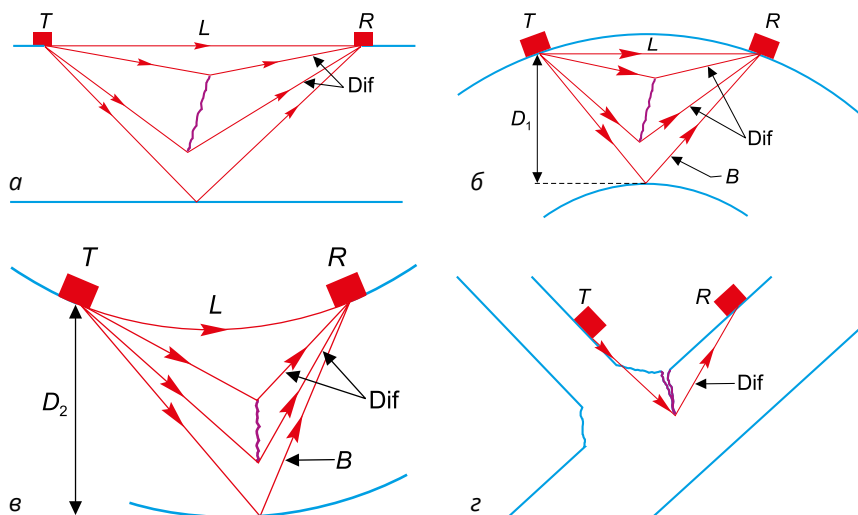


Рис. 1. Схемы контроля ДВМ: а — плоского изделия; б — изделия с выпуклой поверхностью; в — изделия с вогнутой поверхностью; г — таврового сварного шва (сложная геометрия). Т — излучающий преобразователь; R — приемный преобразователь; L — головная волна; Dif — дифрагированные волны; B — донный сигнал; D_1 — расстояние от преобразователя до выпуклой поверхности, меньше толщины стенки; D_2 — расстояние от преобразователя до вогнутой поверхности, больше толщины стенки

Дифракция очень хорошо подходит для обнаружения дефектов, так как сигналы могут быть зафиксированы от кончиков дефектов различной ориентации с использованием только одной пары преобразователей. Этот эффект также позволяет измерять размеры дефектов, поскольку пространственное (или временное) разделение (разрешение) отраженных волн прямо связано с высотой дефекта. Обычно ДВМ использует продольные волны, так как они прибывают первыми на приемник, что упрощает интерпретацию результатов.

Амплитуды полученных таким образом дифрагированных сигналов от кончиков плоскостных дефектов очень малы, однако они на порядок больше амплитуд, возникающих от кончиков дефектов, при контроле по совмещенной схеме [7], поэтому выявляемость ДВМ плоскостных дефектов значительно улучшается по сравнению с совмещенным методом. Амплитуды дифрагированных сигналов зависят от различных факторов, таких как силы сжатия поверхностей дефекта, ориентация дефектов по отношению к преобразователям, форма самих кончиков дефектов.

Величина амплитуды эхо-сигнала не используется в этом методе для измерения размеров дефектов. Приемы методов, основанных на измерении амплитуд, оказываются в большинстве случаев непригодными, когда используется ДВМ, хотя они могут применяться для дальнейших оценок. Амплитуда эхо-сигнала учитывается в ДВМ в связи с решением таких задач, как отстройка от структурных помех; определение типа дефекта по относительным амплитудам эхо-сигналов от верхнего и нижнего концов дефекта; для подтверждения, что настройка чувствительности не изменилась при переходе от контроля одного сварного соединения к другому.

БС рекомендует два способа сканирования и представления результатов при контроле ДВМ: поиск и определение размеров дефектов с помощью *D*-развертки (рис. 2, *а*) и определение размеров дефектов с помощью *B*-развертки (рис. 2, *б*). Такие способы сканирования и представления результатов пригодны для ряда важных контролируемых объектов, включая стыковые швы труб, сосудов и листовых конструкций.

На первом этапе контроля рекомендуется выполнение только однократного *D*-сканирования (и получения изображения в виде *D*-развертки), например, вдоль сварного соединения. Данные по распознаванию и измерению размеров возможных дефектов, выявленных таким образом, будут основываться на результатах этого единственного

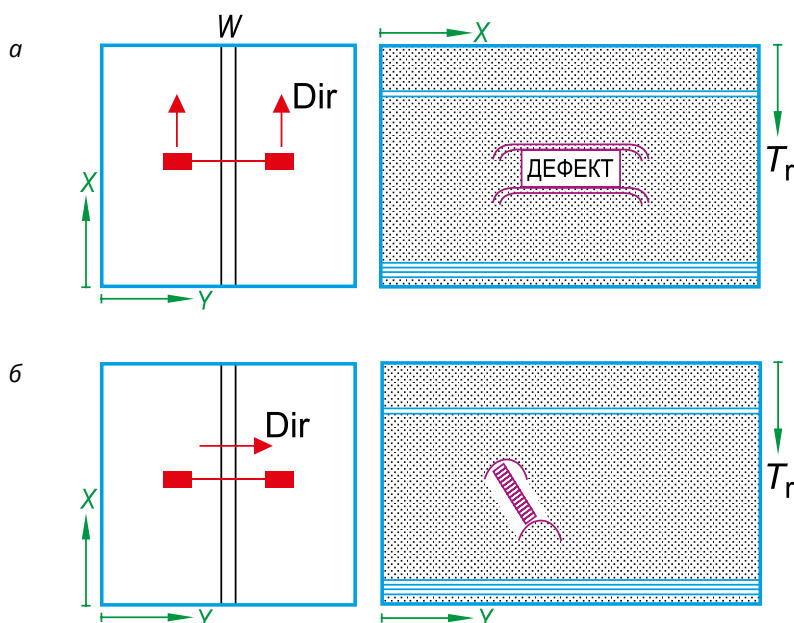


Рис. 2. Схемы сканирования и развертки: *а* — типа *D*, *б* — типа *B*. *Dir* — направление движения пары преобразователей; *W* — сварной шов; T_r — шкала времени растространия импульса

сканирования. Однако при этом возможная точность метода не будет полностью достигнута.

Для критичных дефектов рекомендуется использовать ДВМ в его более полной модификации, а именно — второй способ. Он включает линейное сканирование парой преобразователей поперек сварного шва, перпендикулярно к направлению протяженности дефекта. Этот процесс известен как *B*-сканирование, а представление результатов как *B*-развертка. Этот, более точный ДВМ, позволяет выполнять измерения размеров более детально.

Для измерения размеров дефектов используется значение интервала между временами пробега. Опуская эффект трансформации типов волн (для упрощения) и представляя распространение УЗ в виде лучей, отмечают траектории распространения ультразвуковой энергии. Вид примерной настройки показан на рис. 1, *а*. Геометрия других подобных схем контроля показана на рис. 1, *б-г*.

Энергия от нижнего конца или крайней точки дефекта приходит на приемник позже, чем от верхнего конца, и дополнительное время прогона характеризует высоту дефекта. Кроме того, обычно присутствуют два импульса: вызванный головной волной, бегущей вдоль поверхности объекта контроля, и соответствующий отражению от противоположной поверхности объекта — донный сигнал (рис. 3). Таким образом, обычно можно получить определенную информацию о расположении дефекта в толще исследуемого объекта. Картина эхо-сигналов, изображенная на рис. 3, наиболее простая. Если дефект выходит на верхнюю поверхность, то исчезает головная волна.

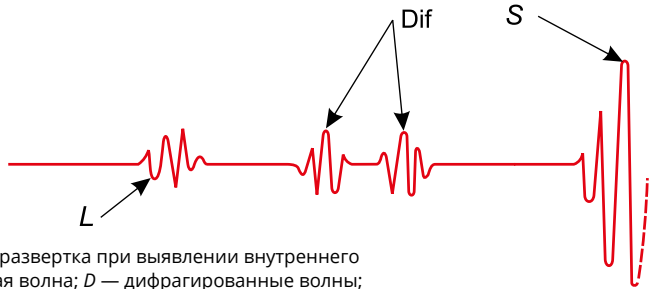


Рис. 3. Типичная А-развертка при выявлении внутреннего дефекта: L — головная волна; D — дифрагированные волны; S — донный сигнал

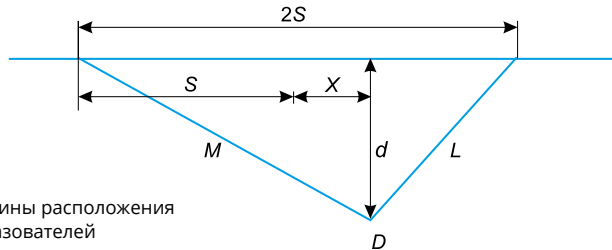


Рис. 4. Измерение глубины расположения точки D парой преобразователей

Предполагается, что ультразвуковая энергия вводится в образец и выходит из него в определенных точках под преобразователями, разделенными расстоянием $2S$ — раздвижкой (рис. 4). Это упрощение действительной ситуации, но оно обеспечивает достаточную точность во многих случаях. Время t , необходимое, чтобы ультразвуковая энергия от излучателя провзаимодействовала с кончиком дефекта в точке D и поступила на приемный преобразователь, вычисляется как:

$$ct = [d^2 + (S - X)^2]^{1/2} + [d^2 + (S + X)^2]^{1/2}, \quad (1)$$

где c — скорость ультразвука, d — глубина залегания точки D под поверхностью ввода, X — сдвиг точки, на которой происходит дифракция, от центральной плоскости между преобразователями.

Значение t минимально, когда $X = 0$. В этом простом случае выражение приобретает вид:

$$ct = 2[d^2 + S^2]^{1/2}. \quad (2)$$

Часто начинают отсчет от сигнала, соответствующего головной волне, то есть глубина d рассчитывается, исходя из разницы t_0 времени прихода сигнала, соответствующего головной волне, и времени прихода эхо-сигнала от дефекта, соответствующего дифрагированному импульсу. Следовательно:

$$d = 1/2[t_0^2 c^2 + 4t_0 cS]^{1/2}. \quad (3)$$

При анализе данных, полученных ДВМ, главным образом используется уравнение (2). Оно является основным. Предположение, что дефект расположен симметрично между преобразователями, приводит к ошибке, но, как будет показано далее, ошибка может быть уменьшена, оказывая лишь небольшое влияние на точность оценки глубины дефекта.

Из описания метода и уравнения (1) видно, что достижимая точность измерения размера дефекта зависит от точности измерения временного интервала, положения преобразователей и параметра X , который определяет асимметрию пары преобразователей по отношению к дефекту. Достижимая точность может быть оценена, если использовать уравнение (1) и учесть условия нахождения дефекта. Из числа многих обстоятельств доминирующий фактор — это степень неопределенности параметра X . Вообще о нем известно только то, что эхо-сигналы от дефекта, по-видимому, приходят от наплавленного металла сварного шва или от зоны термического влияния.

Из уравнения (1) можно найти соотношение между X и вычисленной глубиной дефекта d . Оно имеет вид

$$d^2 = (c^2 t^2 - S^2)[0,25 - (X/ct)^2]. \quad (4)$$

Максимально возможная глубина достигается, если принять $X = 0$. При этом уравнение (1) превращается в уравнение (2).

Знания особенностей исследуемого объекта и выбор преобразователей обычно дают возможность указать значение X в определенных пределах. Так ширина сварного шва и протяженность зоны термического влияния обычно определяют верхний предел X . Аналогично нижний

край пучка лучей определяет предел, за которым не могут быть зафиксированы эхо-сигналы от дефектов.

Для того чтобы сделать вариацию X относительно меньшей, целесообразно использовать достаточно большие расстояния между преобразователями, что делает ct больше. Следует принять меры для исключения из рассмотрения эхо-сигналов, возникающих от трансформации мод, так как при раздвижке преобразователей могут быть ошибочно измерены сигналы, соответствующие более, чем четырехкратному времени пробега УЗ в образце по толщине.

Оборудование

Оборудование состоит из дефектоскопа с наклонными преобразователями и сканирующего устройства, обеспечивающего перемещение пары преобразователей в двух перпендикулярных направлениях (например, вдоль сварного шва для получения развертки типа D и поперек шва для получения развертки типа B). Перемещение преобразователей сканирующим устройством синхронизировано с разверткой на экране дефектоскопа. Обычные дефектоскопы, как правило, не используются для этого метода контроля, но применение их, в принципе, возможно. В простейшем виде при ручном контроле приспособление может состоять из скобы, соединяющей преобразователи, на начальном этапе освоения возможно использование А-развертки.

Одно из наиболее существенных требований к аппаратуре — высокая лучевая разрешающая способность. Отсюда следуют требования к минимальной длительности импульса, широкополосности приемника, скорости работы цифрового блока автоматизированной записывающей системы. Так как получаемые сигналы при работе с ДВМ обычно очень слабы, то существенно иметь более высокое, чем нормальное усиление с большим отношением сигнал — помеха. Применение стандартного дефектоскопа вполне возможно, хотя при этом не исключены некоторые потери в точности и разрешающей способности.

Ширина пучка лучей преобразователя должна быть выбрана такой, чтобы озвучить все интересующее сечение сварного соединения, чтобы все дефекты были выявлены. Благодаря преломлению лучей на поверхности призма-объект контроля и применению более длинных (чем поперечные) продольных волн, как правило, нетрудно достигнуть большого раскрытия пучка лучей для контроля сварных соединений толщиной

до 50 мм. Так как измерение амплитуды не используется, однократное озвучивание прямым пучком лучей дает возможность получить приемлемое отношение сигнал-помеха даже для края пучка лучей с достаточной чувствительностью для обнаружения всех интересующих дефектов.

Чаще всего для контроля применяют преобразователи с центральной частотой от 2 до 10 МГц и диаметром от 6 до 20 мм. Подбор оптимального преобразователя рекомендуется начинать с использования широкополосного преобразователя на частоту 5 МГц с размером пьезоэлемента 12 мм.

Процедура настройки для выявления дефектов

Выбор схемы контроля

Когда контролируемый объект имеет плоскую поверхность, геометрическая схема контроля показана рис. 1, а. Этот случай относится также к контролю поперечных сварных швов труб и сосудов. Более сложные схемы контроля показаны на рис. 1, б–г. В приложении А приведены варианты схем контроля с отражением от донной поверхности, с трансформацией волн и с асимметричным расположением преобразователей относительно дефекта (большое значение параметра X).

Требования к поверхностям объекта контроля

Состояние поверхности ввода исследуемого изделия может влиять на точность результатов измерения. Достаточно такое же качество, которое применяют при обычном УЗК. Там, где требуется сканирование по поверхности шва, необходимо заглаживать валик. За качеством акустического контакта можно следить по таким сигналам, как головная волна или донный сигнал.

Состояние донной поверхности исследуемого объекта не имеет значения для применения этого метода. Однако неровная донная поверхность (подкладное кольцо, корневой непровар, подрез) затрудняет выявление дефектов небольшой глубины, близких к донной поверхности.

Выбор раздвижки преобразователей

Раздвижка преобразователей (2S на рис. 4), определяется расстоянием между их точками ввода. Раздвижка преобразователей влияет на оптимизацию озвучивания контролируемой области, обеспечение адекватной дифракции энергии от кончиков найденного дефекта, обеспечение достаточной разрешающей способности и точности измерения высоты дефектов.

Оптимальная раздвижка преобразователей с целью озвучивания большой площади сечения объекта контроля — это большая раздвижка. Оптимальная раздвижка преобразователей с целью повышения разрешения и точности измерения — это небольшая раздвижка. Оптимальная теоретическая раздвижка преобразователей для приема дифрагированных сигналов от кончиков вертикально ориентированного плоскостного дефекта — 120° . Это угол встречи между лучами преобразователей, когда они направлены на кончик дефекта. Затухание приводит к уменьшению энергии при распространении сигнала, поэтому оптимальная амплитуда дифрагированной на кончиках дефекта волны соответствует меньшей величине угла. Возможно, раздвижка преобразователей будет ограничена геометрией исследуемого объекта.

Вероятно обнаружится, что одна настройка преобразователей недостаточна для выполнения всех требований контроля. Тогда может потребоваться повторное сканирование с другой раздвижкой преобразователей, если соответствующая зона контроля не может быть охвачена одним сканированием.

Выбор угла ввода преобразователя

Угол ввода преобразователя определяется одновременно с выбором раздвижки преобразователей. Критерий для выбора угла преобразователя — направление лучей в контролируемую область. Типичные номинальные углы преобразователя — 35° , 45° , 60° и 70° от нормали. Большие углы ввода преобразователя вызывают увеличение интенсивности головной волны, делая более трудным распознавание дефектов, близких к поверхности ввода. Задание точного угла ввода луча не является необходимым условием для контроля ДВМ. Отклонения на $\pm 5^\circ$ от номинала в итоге не влияют на качество контроля.

Если цель контроля — только выявление трещин вблизи донной поверхности, то раздвижка преобразователей должна быть выбрана так, чтобы обеспечивался угол встречи около 110° на донной поверхности. Угол преобразователя выбирается так, чтобы энергия направлялась к фокальной точке (точке пересечения лучей) на донной поверхности.

Если ставится задача максимально охватить всю толщу объекта контроля, то фокальная точка должна располагаться в слое на двух третях толщины объекта, а преобразователи — иметь углы ввода между 45° и 60° . Шестидесятиградусные преобразователи более удобны для контроля толстостенных изделий, где верхний край пучка лучей преобразователя

с углом ввода 45° может быть ослаблен благодаря большому пути до дефекта. Эта рекомендация вызывает сомнение.

Выбор и настройка чувствительности

Как отмечалось ранее, при контроле ДВМ значение амплитуды не используется для определения размеров дефектов. Обычная калибровка, основанная на установке определенной амплитуды ультразвуковых сигналов, в значительной степени непригодна, когда используется ДВМ, и не может быть применена. Дифрагированные сигналы часто имеют меньшую амплитуду, чем отраженные. Соответственно необходимо более высокое усиление для их регистрации.

Рекомендуются четыре способа настройки и проверки чувствительности: по образцам с характерными дефектами; по сигналам, дифрагированным на щели; по сигналам, отраженным от боковых отверстий; по уровню структурных помех.

В качестве примера показан образец с искусственным дефектом в виде У-образного пропила (рис. 5). В идеале калибровочные образцы должны быть изготовлены с такой же толщиной, как контролируемое изделие, и из подобного материала.

Там, где контроль выполняется только с одной раздвижкой преобразователей, рекомендуется, чтобы кончик пропила был выполнен на глубине, равной половине толщины образца. Там, где используется несколько интервалов между преобразователями, рекомендуется, чтобы кончики нескольких калибровочных дефектов выполнялись на максимальных

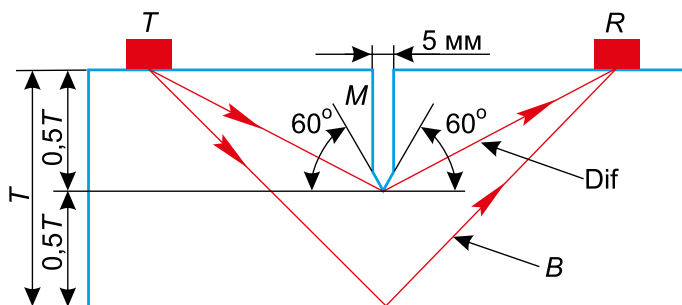


Рис. 5. Образец для калибровки ДВМ с V-образной щелью: T — излучающий преобразователь; R — приемный преобразователь; Dif — дифрагированная волна на кончике щели; B — донный сигнал; M — щель, выполненная механическим способом со стороны поверхности ввода.

глубинах в точках пересечения лучей для каждого отдельного слоя, контролируемого при определенной раздвижке преобразователей.

Для настройки чувствительности пара преобразователей располагается симметрично по сторонам щели так, чтобы дифрагированный сигнал получался от кончика щели. Щель должна выходить на поверхность ввода, а не на донную поверхность. В последнем случае используемый сигнал будет содержать нежелательную отраженную компоненту, которая прибавляется к дифрагированному сигналу. Используя высокочастотный импульс на А-развертке, чувствительность следует настроить так, чтобы диффрагированный сигнал от щели имел удвоенную амплитуду, соответствующую около 80% высоты полного экрана.

Интерпретация полученных данных

По данным ДВМ возможно различить следующие классы дефектов: плоскостные, объемные, нитевидные, точечные и неопределенные. Для расшифровки характера дефектов в БС предусмотрен анализ фаз и амплитуд сигналов от верхнего и нижнего концов дефектов, головной волны и донного сигнала; использование В-развертки. Например, используется то обстоятельство, что объемные дефекты имеют очень разные амплитуды эхо-сигналов от верхнего и нижнего кончиков. Сигнал от нижнего конца обычно значительно слабее, чем от верхнего. Фаза эхо-сигнала от верхнего конца плоскостного дефекта должна быть такой же, как фаза донного сигнала, но амплитуды сигнала значительно меньше. Фаза эхо от нижнего конца плоскостного дефекта должна быть такой же, как фаза головной волны.

В сложных случаях предусмотрено использование других УЗ методов (метода тандем, изменения направления озвучивания), а также магнитопорошкового и вихретокового видов контроля.

В приложениях В и Г приведены характерные признаки таких дефектов, как пора или непротяженное шлаковое включение, вертикально вытянутая пора, развитый по высоте протяженный шлак, сегментированный (несплошной) или нерегулярный протяженный шлак, внутренний щелевидный дефект, щелевидный дефект, выходящий на поверхность ввода и на донную поверхность, пористость. Предусмотрена возможность других эхосигналов. Особенности отражения от провисания или валика шва не рассмотрены, а известно, что такие отражения важны, поскольку от них возникают ложные сигналы.

Приведенные в БС рекомендации по расшифровке результатов контроля свидетельствуют о накоплении большого практического материала. Приложения В и Г можно рассматривать как атлас дефектов.

Точность измерений

В этом разделе рассмотрено влияние на точность измерения глубины залегания точек дефекта таких факторов, как погрешности измерения времени и скорости, боковая неопределенность в оценке расположения дефекта (параметр X), смещение точек ввода, погрешности системы сканирования и изменения контактного слоя. В нем содержится довольно много ошибочных формул, исправленных при переводе. Установлено, что очень большие погрешности (порядка 3 мм) в измерении глубины возникают под действием двух последних факторов в отличие от оценок БС.

В БС сказано: «Погрешности, возникающие из-за поднятия-опускания преобразователя при изменении акустического контакта и вариации в раздвижке преобразователей увеличиваются, если раздвижка преобразователей уменьшается, погрешности от неточного измерения времени и изменения скорости ультразвука уменьшаются. Некоторый комп-ромисс может быть достигнут в каждом измерении». Это положение основывается на неверных формулах. В действительности все абсолютные значения перечисленных погрешностей растут с увеличением раздвижки и уменьшаются с ее уменьшением. Для измерения высоты дефекта важна именно абсолютная погрешность измерения глубины, поскольку высота определяется как разность двух значений глубин.

Аттестация персонала

Приложение Д рекомендует введение трех уровней квалификации для персонала. Как и в обычной практике, предлагаются уровни: ДВМ 1 (дефектоскопист обеспечивает сбор данных), ДВМ 2 (дефектоскопист обеспечивает анализ данных), ДВМ 3 (дефектоскопист обеспечивает надзор за контролем). Функции для всех уровней в БС точно определяются.

Литература

1. Guide to Calibration and setting-up of the ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) technique for the detection, location and sizing of flows. BS 7706:1993.
2. Ермолов И. Н. Направления развития ультразвукового контроля металлов по материалам 7 Европейской конференции. — Контроль. Диагностика. 2000. (В печати)

3. 15-th Word Confrence on Non-Destructive Testing. Abstracts Book. Rome (Italy) — 15–21 October 2000. 800 p.
4. Григорьев М. В., Гребенников В. В., Гурвич А. К. Определение размеров трещин ультразвуковым методом. — Дефектоскопия. 1978. № 1. С. 8–12.
5. Григорьев М. В., Гурвич А. К., Гребенников В. В., Семерханов С. В. Ультразвуковой способ определения размеров трещин. Дефектоскопия. — Там же. 1979. № 6. с. 50–56.
6. Ермолов И. Н. Комментарии к британскому стандарту по дифракционно-временному методу контроля. — Там же (в печати).
7. Ермолов И. Н., Вopilкин А. Х. Расчет эквивалентных размеров для некоторых имитированных дефектов. — Там же. 1998. № 4, С. 3–10.