



ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ НА ВОЗМОЖНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ, ИМЕЮЩИМИ ВЫСОКУЮ ЧАСТОТУ ИЗЛУЧЕНИЯ

С. А. САПРЫКИН, И. Б. КОЛБИН, Ю. А. ВОЛКОВ, М. М. ТОПЧИЙ, В. Н. ГОРБЕНКО

В последние годы наблюдается тенденция расширения сферы применения современных ультразвуковых преобразователей, имеющих высокую частоту излучения. Но, несмотря на то, что они имеют очевидные преимущества: узкую направленность, малое значение мертвой зоны и высокую разрешающую способность в некоторых случаях это не может компенсировать всех сложностей, возникающих во время проведения контроля. Показано, что состояние внутренней поверхности контролируемых изделий может вносить существенные ограничения на применение преобразователей с высокой частотой излучения.

The recent trend is to extension of the field of application of modern ultrasonic transducers characterized by a high emission frequency. Despite the fact that they have apparent advantages, such as a narrow directivity range, small size of the silent zone and high resolution, there are cases where this cannot compensate for all the difficulties arising during monitoring. It is shown that the state of an internal surface of parts monitored may impose substantial limitations on the use of the transducers with a high emission frequency.

Улучшение технических средств для проведения ультразвукового контроля (УЗК) привели к массовому использованию приборов и преобразователей (прямых, наклонных совмещенных и раздельно-совмещенных), которые рассчитаны на частоты выше 5 МГц. Это в первую очередь связано с желанием обеспечить наиболее оптимальные условия проведения контроля изделий, имеющих небольшую толщину стенок. К таким условиям следует отнести: уменьшение габаритов преобразователей, размера их стрелы и «мертвой» зоны, обеспечение ввода в изделие более узкого пучка УЗ колебаний, а также увеличение разрешающей способности. Но в то же время в существующих методиках проведения УЗК сварных соединений и основного металла не приведены те условия, при которых применение преобразователей с высокой частотой излучения (5 МГц и выше) является корректным и оправданным. Следует отметить, что в большинстве отраслей промышленности до сих пор действуют документы, регламентирующие порядок проведения контроля, которым уже больше 20–30 лет. Естественно, что в них не отражены технические новшества последних десятилетий, которые привели к значительным изменениям аппаратуры для проведения контроля.

Не всегда использование высоких частот излучения УЗ сигналов дает положительный эффект, о котором сказано выше. Примером, который это подтверждает, может стать явление, замеченное при проведении выходного контроля таврового сварного соединения стерилизатора-автоклава водяного технологического (рис. 1). Оно связано с влиянием качества донной поверхности проверяемого изделия на амплитуду отраженного сигнала. Следует отметить, что такие изделия в последнее время находят широкое применение в пищевой промышленности. Они рассчитаны на низкое давление (до 0,25 МПа), имеют сравнительно небольшую толщину стенки (7...10 мм) и, следовательно, к ним применимы изложенные выше соображения,

относящиеся к использованию для проведения контроля высоких частот излучения сигналов. В соответствии с этим контроль слоя наплавленного металла, прилегающего к катету шва, параллельному обечайке (см. рис. 1 и 2), проводят прямыми преобразователями с использованием частоты излучения 5 или 10 МГц. В процессе контроля оператор перемещает преобразователь 8 по траектории 10 (см. рис. 2). В его крайних положениях — а и в, на экране дефектоскопа появляются импульсы, которые соответствуют сигналам, отраженным от участков поверхности обечайки 1, расположенных в непосредственной близости от границ усиления шва на расстоянии S_1 от поверхности ввода (соответствующая осциллограмма приведена на рис. 3, а). Именно момент появления таких импульсов (при движении преобразователя слева направо или справа налево) служит для опытного специалиста сигналом о необходимости смены направления движения на обратное. В промежуточных положениях преобразователя (между а и в), например, в поло-

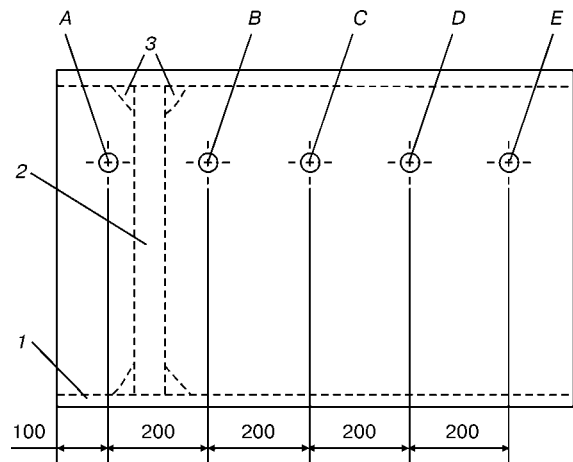


Рис. 1. Схема расположения участков А–Е, использованных для измерения амплитуд эхо-сигналов, отраженных от внутренней поверхности стерилизатора-автоклава: 1 — обечайка; 2 — днище; 3 — усиления швов, соединяющих обечайку и днище

жении **б**, импульсы на экране не появляются (при условии, что на данном участке шва нет дефекта, а при его наличии в зоне между S_1 и K появляется импульс (рис. 3, б).

Описанные выше чередования осциллограмм при сканировании преобразователем по траектории **10** (см. рис. 2) характерны для случаев, когда внутренняя поверхность обечайки не имеет существенных отклонений от нормального состояния. Иная картина наблюдается при контроле изделий, внутренняя поверхность которых имеет значительные коррозионные повреждения либо другие отклонения ее рельефа от характерного для изделия. Наиболее типичные примеры таких отклонений: большая шероховатость, неровности после первичной обработки (литья, прокатки, формовки), наличие пятен окалины, а также риски, вмятины, забоины и т. п.

В процессе сканирования поверхности обечайки стерилизатора с толщиной стенки 7 мм (толщина днища — 14 мм) было замечено, что при достижении преобразователем положений **а** и **в** сигнал от внутренней поверхности сосуда не фиксировался. Для его фиксации приходилось увеличивать поисковый уровень чувствительности на 6 дБ и более. При помещении преобразователя на рабочий эталон (РЭ), который имел такую же толщину, как и контролируемое изделие, импульс на экране (на расстоянии S_1), соответствующий донному сигналу, можно было наблюдать на поисковом уровне чувствительности. При этом амплитуда сигнала превышала установленный для $S_{пр} = 5 \text{ мм}^2$ браковочный уровень на 10...12 дБ. Чтобы изучить это явление, внутреннюю поверхность обечайки обследовали с применением визуально-оптического метода контроля. Установлено, что обечайка сосуда, изготовленная из отрезка трубы диаметром 800 мм, была подвержена длительному атмосферному воздействию (очевидно, труба хранилась под открытым небом). Ее внутренняя поверхность покрыта сплошным слоем продуктов коррозии (на наружной поверхности продукты коррозии во время операций изготовления сосуда были удалены, а в зоне расположения таврового соединения поверхность обработана до класса чистоты не хуже Rz 20).

Для того чтобы установить зависимость между амплитудой отраженных от внутренней поверхности сосуда сигналов и степенью ее коррозионного поражения проведены эксперименты, описанные ниже. Вдоль линии, совпадающей с образующей сосуда, на его наружной поверхности было подготовлено пять участков. Диаметр каждого участка находился в пределах 25...30 мм, класс чистоты обработки — Rz 20. Для проведения измерений использованы прямые преобразователи трех типов: П111-10-К6-001, П111-5-К6-001 и П111-5-3х4-002. С помощью каждого из них на участках выполнено по пять измерений амплитуды эхо-сигналов от внутренней поверхности. Данные по каждому из участков были усреднены. Абсолютные значения отклонений результатов в каждой из

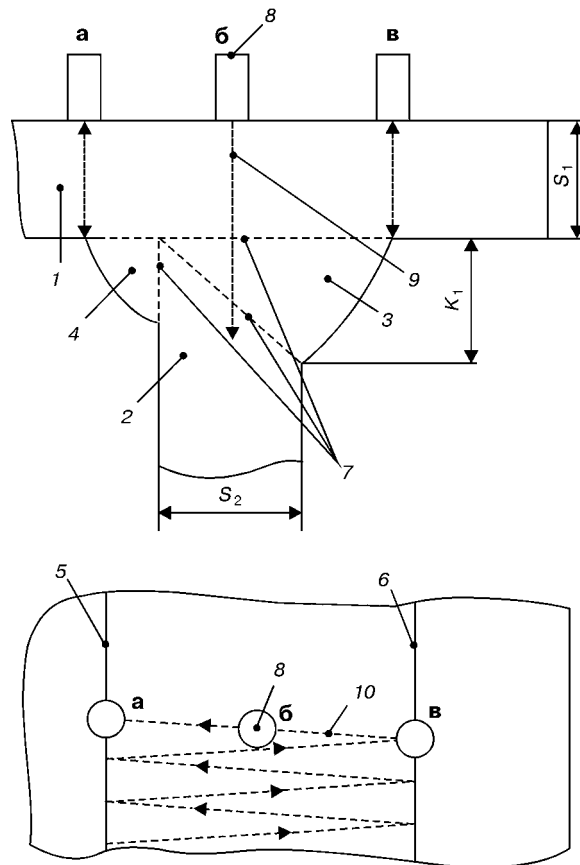


Рис. 2. Схема проведения контроля таврового сварного соединения с применением прямого преобразователя: 1 — обечайка; 2 — днище; 3, 4 — усиление наружного и внутреннего швов; 5, 6 — риски, обозначающие проекции границ усиления швов на поверхность обечайки; 7 — контуры деталей в зоне сплавления; 8 — прямой преобразователь; 9 — акустическая ось преобразователя; 10 — траектория перемещения преобразователя по поверхности обечайки

серий измерений не превышали 1...2 дБ. С использованием этих результатов построены графики зависимости амплитуды эхо-сигналов от координаты участка вдоль образующей (рис. 4).

Следует отметить, что благодаря применению регулировки амплитуды зондирующих импульсов

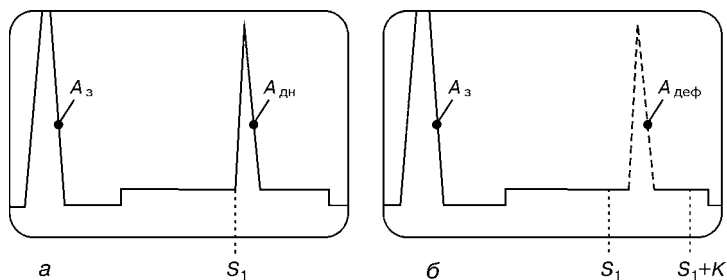


Рис. 3. Осциллограммы, наблюдаемые на экране дефектоскопа при проведении контроля тавровых сварных соединений прямым преобразователем: а — осциллограмма, получаемая в случае нахождения преобразователя в положении **а** и **в** (см. рис. 2); б — осциллограмма, получаемая в случае нахождения преобразователя в положении **б** (см. рис. 2); $A_з, A_д$ — зондирующий и донный импульсы; $A_{деф}$ — импульс, появляющийся при наличии сигнала от дефекта в зоне сварного соединения; S_1 — координата на горизонтальной оси развертки в месте появления импульса, соответствующего сигналу от внутренней поверхности изделия; S_1+K — координата на горизонтальной оси развертки, ограничивающая зону индикации сигналов от дефектов в сварном соединении, которые находятся на максимальной глубине от наружной поверхности изделия

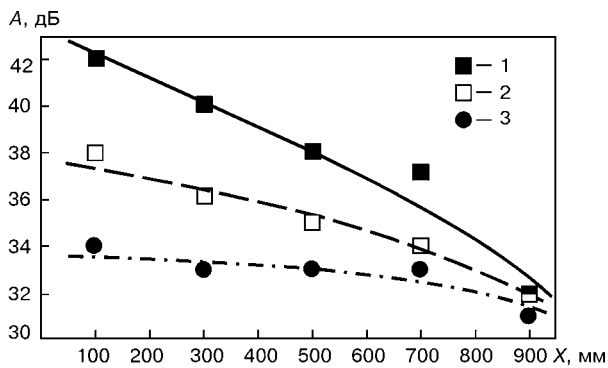


Рис. 4. Зависимости амплитуд эхо-сигналов, полученные с применением трех различных преобразователей, помещенных на участках поверхности обечайки вдоль образующей А-Е (см. рис. 1): П111-10-К6-001 (1), П111-5-К6-001 (2), П112-5-3х4-002 (3)

перед проведением измерений каждым из трех преобразователей, мы добились расположения всех полученных зависимостей в одной области значений амплитуд. Для изучения проблемы важны не абсолютные значения амплитуды сигналов, а их относительные изменения, зафиксированные с помощью каждого из преобразователей в пределах последовательности из пяти участков. Графики представляют собой монотонно убывающие кривые, отличающиеся только углом наклона к оси X. По оси X отложены расстояния вдоль образующей цилиндрической поверхности от того торца сосуда, вблизи которого расположено сварное соединение, до участка, на котором проводились измерения.

Значения амплитуд эхо-сигналов, принимаемые каждым из трех преобразователей, уменьшались по мере приближения к торцу обечайки сосуда, совпадающим с краем трубы, из которой сосуд был изготовлен. Изменение наклона кривых в точке, которая соответствует значению X, равному 900 мм (см. рис. 4), можно объяснить более интенсивным протеканием коррозии на внутренней поверхности E обечайки (участок находился в непосредственной близости от края сосуда). Так, по сравнению с внутренней поверхностью участков A-D (см. рис. 1) внутренняя поверхность участка E была покрыта более толстым слоем продуктов коррозии. Под этим слоем зафиксированы коррозионные язвы большего диаметра и глубины, чем на поверхности напротив участков A-D. Визуально-оптический и измерительный контроль, проведенный с помощью микроскопа МПБ-2 и индикатора часового типа ИЧ-10, позволил установить, что размеры язв (высота, диаметр) на участке E находились в пределах 0,3... 0,4 мм. На остальных участках их максимальные размеры не превышали значений 0,2 мм, причем в от точки D к точке A эти размеры уменьшались. Плотность расположения язв на участке E также была выше, чем на остальных (в направлении от A к E наблюдалась тенденция увеличения плотности язв). Именно значительным различием параметров коррозионных повреждений, которые зафиксированы во время проведения визуального осмотра внутренней поверхности E по сравнению с A-D, можно объяснить изменение наклона кривых в точке, соответствующей этому участку.

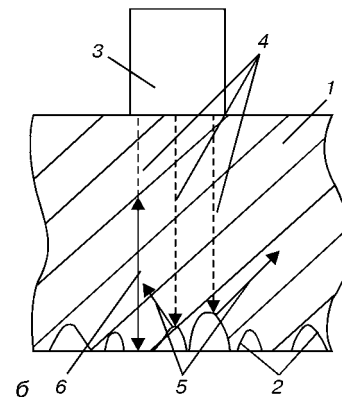
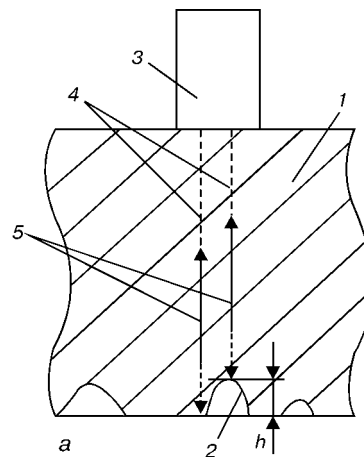


Рис. 5. Графическая интерпретация условий возникновения явлений интерференционных (а) и рассеяния (б) в изделии, имеющем язвенные коррозионные повреждения внутренней поверхности (h — высота коррозионной язвы)

Следовательно, интенсивность отраженного от донной поверхности УЗ сигнала в данном случае зависела не только от интенсивности излучаемых сигналов, диаграммы направленности, акустических свойств среды, но и от рельефа поверхности изделия, а также от длины волны УЗ колебаний. При значительных коррозионных повреждениях внутренней поверхности именно два последних фактора оказывают определяющее влияние.

На рис. 5 показана взаимосвязь между рельефом внутренней поверхности и акустическими волнами, распространяющимися в среде. Схематически изображены два механизма формирования отраженных от донной поверхности изделия сигналов при наличии коррозионных язв: интерференционный и рассеяния.

Интерференционные явления и их взаимосвязь со свойствами объекта, в котором распространяются УЗ волны, подробно рассмотрены в [1]. Выводы, сделанные там, мы попытались представить с помощью рис. 5, а. На нем схематически изображены две элементарные волны 4, излученные преобразователем 3. На границе раздела эти волны меняют направление распространения на обратное — 5. Допустим, одна из них отражается от донной поверхности изделия 1, а вторая от поверхности коррозионной язвы 2. Вполне очевидно, что полости определенной высоты h приведут к возникновению разности фаз этих двух элементарных волн — отраженной от полости и от ровного участка дна



изделия, расположенного возле полости. Причем в случае, если такая разность составляет половину длины волны или приближается к такому значению (т. е. $h \approx \lambda/2$), колебания частиц в волнах 4, 5 находятся в противофазе и гасятся. А следствием этого может стать изменение интенсивности сигнала, регистрируемого приемником. Естественно, что при увеличении плотности расположения полостей, высота h которых сравнима с $\lambda/2$, доля энергии, переносимая элементарными волнами в направлении приемника, будет уменьшаться.

Второй механизм, представленный на рисунке 5, б, связан с рассеянием УЗ волн, отраженных от внутренней поверхности изделия 1. Округлые полости язв 2 являются ненаправленными отражателями, которые изменяют направление распространения падающих элементарных УЗ волн 4 на диаметрально противоположное только в случае, если это направление совпадает с проведенной в точке падения нормалью к касательной плоскости полости (рис. 5, а). В остальных случаях будет наблюдаться рассеяние падающих на поверхность язв элементарных волн 4, и направления распространения отраженных волн 5 не будут совпадать с направлением акустической оси преобразователя. Следовательно, принимаемый преобразователем полезный сигнал будет формироваться только за счет отражений от локальных участков поверхности язв, а также за счет тех участков донной поверхности, которые свободны от язв (на рисунке показана отраженная от плоской поверхности дна элементарная волна б). Но и в этом случае, как было показано выше, возникающая интерференция приводит к ослаблению отраженного сигнала. Очевидно, что при наличии язвенной коррозии внутренней поверхности будут иметь место оба описанные выше механизмы ослабления донного сигнала, а доминирование одного из них будет зависеть от соотношения многих параметров: длины волны, размеров (высоты, диаметра) язв, их плотности расположения на поверхности изделия. Анализ влияния состояния внутренней поверхности изделия приведен в работах [2, 3] и он подтверждает сделанные нами выводы.

Анализируя полученные зависимости можно сделать вывод: наиболее восприимчивым к изменению качества внутренней поверхности обечайки оказался прямой совмещенный преобразователь с частотой излучения 10 МГц (на рис. 4 зависимость, полученная с применением такого преобразователя, изображена сплошной линией). Из графика видно, что по мере перемещения преобразователя от участка А к Е амплитуда эхо-сигналов снижается на 9 дБ. Отдельно следует рассмотреть участок Е, значительное уменьшение амплитуды эхо-сигнала на котором могло произойти вследствие интерференционного ослабления в результате совпадения половины длины волны (для частоты 10 МГц — 0,3 мм) со средним размером язв (0,3... 0,4 мм) на его донной поверхности. Кроме того, более высокая по сравнению с остальными участками плотность язв вносила свой вклад как в интерференционное ослабление отраженного сигнала, так и в ослабле-

ние за счет повышенного рассеяния. При использовании раздельно-совмещенного преобразователя с частотой излучения 5 МГц, влияние качества поверхности на значение амплитуды эхо-сигнала сказывается в наименьшей степени (соответствующая кривая изображена на том же рисунке штрихпунктирной линией). Это можно объяснить наличием фокусировки: обрабатываемый приемным устройством дефектоскопа сигнал формируется за счет отражения от участка поверхности, имеющего меньшую площадь, чем в случае применения совмещенных преобразователей. Вполне естественно, что попадание на шероховатую внутреннюю поверхность изделия сфокусированного пучка колебаний даст меньшую степень его рассеяния, чем степень рассеяния расходящегося пучка. Прямые преобразователи с частотой излучения 5 МГц по степени влияния на их показания неровностей внутренней поверхности изделия занимают промежуточное значение между двумя упомянутыми выше (зависимость изображена штриховой линией).

Следовательно, существенное влияние качества внутренней поверхности (при наличии на ней коррозионных язв, рыхлот) наблюдается при использовании преобразователей с высокой частотой излучения — в первую очередь 10 МГц. Это можно объяснить возникновением явлений, связанных с достижением наиболее неблагоприятного соотношения между длиной волны УЗ колебаний (при 10 МГц — 0,6 мм) и средними размерами коррозионных язв, рыхлот и т. п., образовавшихся на внутренней поверхности изделия при интенсивно протекающей коррозии.

Применение преобразователя той же конструкции, но с частотой излучения 5 МГц, что соответствует длине продольной волны 1,2 мм, позволило заметно снизить влияние состояния внутренней поверхности на амплитуду отраженного от нее сигнала. Наиболее благоприятные для проведения контроля результаты были получены при использовании раздельно-совмещенного преобразователя частотой 5 МГц. Он оказался наименее чувствительным к изменению состояния внутренней поверхности контролируемого изделия. Следовательно, при проведении контроля прямыми преобразователями тонкостенных изделий, имеющих значительные неровности внутренней поверхности, наиболее оптимальным вариантом будет использование раздельно-совмещенного преобразователя с частотой излучения 5 МГц или ниже (последнее будет зависеть от конкретных условий проведения контроля). Такой преобразователь по сравнению с остальными, упомянутыми выше в статье, не будет затруднять расшифровку принимаемых сигналов. Кроме того, за счет большей стабильности показаний он будет способствовать повышению достоверности проводимого контроля.

Точно такие же соображения можно распространить и на результаты измерения характеристик, обнаруженных в процессе контроля дефектов. Очевидно, что УЗ волны разной длины будут иметь разную интенсивность при отражении от тех дефектов, поверхность которых имеет существенные отклонения от геометрически «правильных» форм



(таких, как плоскость, овальная полость и т. п.). К таким дефектам можно отнести трещины; шлаковые включения; непровары, заполненные шлаком и т. п. Естественно, что при наличии в изделии этих дефектов, наибольшую достоверность проводимого контроля можно получить в том случае, если длина УЗ волн будет намного превышать средний размер неровностей поверхности (выступов или впадин). Если длину излучаемых волн по какой-то причине увеличивать не целесообразно, например, если при этом получают недопустимое увеличение мертвой зоны или поперечного сечения пучка УЗ колебаний, то достижение желаемого эффекта можно получить, используя фокусирующие преобразователи. В последнем случае следует иметь в виду, что положительный результат достигается лишь тогда, когда поперечное сечение пучка УЗ волн в месте расположения дефекта превышает поперечные размеры этого дефекта.

Соображения, приведенные выше, конечно же, относятся и к проведению контроля зеркально-теневым методом, где в качестве основного информативного параметра используют значение донного сигнала на дефектном и бездефектном участках. При наличии существенной разницы между донными сигналами на разных участках изделия (в которых нет дефектов) использование этого метода теряет смысл из-за сложности расшифровки принимаемых сигналов. В этом случае следует изучить возможность использования оптимальных параметров контроля (см. выше). В частности, снижение частоты может дать положительный эффект лишь тогда, когда вызванное этим увеличение мертвой зоны, лучевой и фронтальной разрешающей способности не будут играть определяющей роли для обнаружения наиболее часто встречающихся дефектов в данном изделии. То же самое можно сказать и о возможности перехода к проведению контроля фокусирующими ПЭП — по нашему мнению их можно применить только в том случае, если фокусное расстояние преобразователя находится в том же слое изделия, что и наиболее часто встречающиеся дефекты.

Выводы

1. При проведении УЗК изделий, имеющих значительную шероховатость внутренней поверхности (размеры неровностей сравнимы с половиной длины волны), особое внимание следует уделять определению возможности его осуществления без внесения существенной погрешности, связанной с различием амплитуд сигналов, отраженных от донных поверхностей рабочего эталона и изделия.

2. При наличии существенной разности (3 дБ) между амплитудами сигналов по п. 1 следует либо вводить поправку и добавлять ее к полученным результатам, либо использовать преобразователь с более низкой частотой излучения.

3. Неоднородности (дефекты) в контролируемом материале, имеющие извилистый характер или поверхностные неровности, так же, как и в описанном выше в п. 1 случае, могут приводить к значительному ослаблению эхо-сигнала. Поэтому во многих случаях после проведения УЗ контроля изделий следует проводить уточнение эквивалентной площади найденных дефектов, применяя преобразователи с более низкой частотой излучения.

4. Использование зеркально-теневого метода контроля требует еще более жестких ограничений к состоянию донной поверхности контролируемых изделий. Целесообразность его применения необходимо проверять путем сравнения сигналов, полученных на нескольких произвольно выбранных участках изделия (как между собой, так и с сигналом, получаемым при использовании рабочего эталона).

5. Во всех перечисленных случаях для уменьшения влияния упомянутых выше негативных факторов, связанных с состоянием поверхности изделий и дефектов, наиболее целесообразно не только снижать частоту излучаемых сигналов, но и применять для проведения контроля фокусирующие преобразователи (например, широко распространённые сейчас раздельно-совмещенные).

1. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. Справ. — М.: Машиностроение, 1991. — 750 с.
2. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. — М.: Машиностроение, 1981. — 240 с.
3. Гурвич А. К., Ермолов И. Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. — Киев: Техніка, 1972. — 460 с.