

СОЗДАНИЕ ОПОРНОГО СИГНАЛА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Realization of the reliable echo-signal in ultrasonic measurements

Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Сергеева О.С.

Baev A.R., Mayorov A.L., Asadchaya M.V., Sergeeva O.S.

Рассмотрены новые возможности создания опорного сигнала при проведении ультразвукового контроля объектов поверхностными и пластинчатыми волнами на основе использования двух типов искусственных отражателей звука (ОЗ). Первый из них – контактный ОЗ – представляет собой твердое тело с определенными акустическими свойствами, устанавливаемое на объект через тонкий слой контактной смазки и оппозитно источнику излучения-приема акустических волн. Второй же тип отражателей – магнитожидкостный ОЗ – содержит размещенное над объектом отражающее звук тело и удерживаемую источником магнитного поля у его отражающей поверхности магнитную жидкость, обеспечивающую акустический контакт с объектом. Проведен анализ особенностей акустического тракта рассмотренных ОЗ при ультразвуковом контроле или измерениях поверхностными волнами в режиме эхо. В широком диапазоне изменения концентрации магнитной жидкости (0-27%) получены экспериментальные данные по коэффициенту ослабления ПАВ, проходящей через границу жидкость-металл (сталь, алюминий). Установлены зависимости коэффициентов отражения и прохождения ПАВ через область с акустической нагрузкой, создаваемой контактным ОЗ, в зависимости от удельного акустического сопротивления контактирующих тел, наклона отражающей границы по отношению к направлению распространения ПАВ, геометрии контактного слоя жидкости. Даны рекомендации по использованию указанных типов ОЗ.

New possibilities of the reliable echo-signal realization in ultrasonic evaluation of the solid objects by surface (SW) and plate waves, applying of two types of the artificial sound reflectors (SR), are studying. The first one of them is a contact SR which is a solid of determined acoustical properties put on the object to be tested with thin contact fluid layer oppositely to ultrasonic angle probe to radiate and receive SW. The second one - is magnetically-fluid SR, which consist of solid to reflect sound and magnetic fluid held by magnetic field between SR-solid and the object to be tested. The feature analysis of the echo-acoustical path in ultrasonic evaluation by using SW has been made. We obtained experimental data of an attenuation coefficient of the SW propagation through interface

boundary magnetic fluid–metal (St, Al) vs. magnetic particle concentration (0–27%) in fluid. Coefficients of SW reflection and propagation through the interface surface of the contact solid SR and metal specimens vs. its acoustical impedance, angle of the SW propagation to SR reflection boundaries and vs. geometry of contact fluid layer were determined. Recommendation for the former SR types using in practices have been made.

Введение

Рассматриваемые в работе отражатели звука (ОЗ) по отношению к распространяющимся ПАВ (а также волнам Лэмба) представляют собой акустическую нагрузку (АН), приводящую к трансформации и отражению мод, что является предметом исследований прикладной акустики [1]. Представляет интерес использовать эти эффекты в различных методиках для создания искусственных отражателей опорного сигнала, повышающих надежность акустического контроля объектов различной геометрии на наличие в них несплошностей, а также – для измерения скорости поверхностных и других типов мод. Для получения полного представления об акустическом тракте при проведении ультразвукового контроля или измерений с использованием рассматриваемых ОЗ, необходимо знать ряд указанных выше закономерностей прохождения и отражения ультразвуковых волн. Несмотря на значительное число работ, посвященных этой теме, существует ряд проблем, требующих дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Во многих случаях создание опорного сигнала необходимо для выявления и сравнительной оценки размеров дефекта, и в традиционных УЗ-методиках для этих целей в качестве отражателя сигнала упругой моды (объемной, поверхностной, пластинчатой и др.) служит оппозитная поверхность объекта, двугранный угол, образованный поверхностями объекта, а также характерные технологические выступы или отверстия в объеме объекта [1, 2]. Однако, не всегда можно воспользоваться такими отражателями при ультразвуковых измерениях как в силу их отсутствия, так и из-за наличия нестабильной отражающей способности, вызванной отклонениями в области отражения УЗК. Так, в ряде случаев могут использоваться искусственные отражатели, что реализовано, например, в методе гониометра [2, 3], где ОЗ ориентируют плоской отражающей поверхностью под углом

$\beta = \arcsin \frac{C_{ПАВ}}{C_L}$ к контактной поверхности объекта. При этом обеспечива-

ется максимум преобразования продольной волны (скорость в иммерсионной среде C_L) в поверхностную волну ($C_{ПAB}$) [4]. Повышение стабильности и надежности измерений достигается с использованием в качестве акустической контактной среды магнитной жидкости (МЖ), удерживаемой полем магнитной системы [5]. При зондировании объекта с грубо обработанной поверхностью объемными волнами иногда с оппозитной стороны объекта, погруженного в воду, предполагают хорошо отражающее звук тело.

Таким образом, исходя из анализа известных способов создания опорного сигнала, следует заключить об ограниченности их использования как в методиках контроля объектов амплитудными методами, так и при ультразвуковых измерениях скорости поверхностных (пластинчатых) волн. Для создания опорного акустического сигнала при ультразвуковых измерениях и контроле нами предлагается использовать два типа отражателей, отличающихся по функциональному назначению и способу создания акустического контакта. Первый из них – контактный ОЗ – представляет собой твердое тело, устанавливаемое на объект через тонкий слой контактной смазки, так что на границе сред обеспечивается скользящая граница, т.е. $\sigma_{\tau 1} = \sigma_{\tau 2} = 0$, $\sigma_{n1} = \sigma_{n2}$, где $\sigma_{\tau i}$ и σ_{ni} – тангенциальная и нормальная составляющие тензора напряжений.

1. Контактные отражатели звука

Принципиальная схема работы устройства с контактным отражателем поясняется на рисунке 1, где вначале предполагается, что контактная поверхность объекта плоская. Причем, как будет показано ниже, ближняя к ПЭП и дальняя от него границы контакта АН с объектом, являющиеся локальными зонами отражения и трансформации ПАВ, могут иметь сложный вид. Если же ОЗ представляет собой параллелепипед, то эти границы являются отрезками прямых.

Как показывают наши предварительные исследования и известные данные других авторов [4, 6], прохождение волны Рэлея через акустическую нагрузку сопровождается следующими процессами. Так, если выполняется условие $C_{ПAB} > C_{ж} < C_t$, где C_t соответствует скорости поперечной волны в материале ОЗ, то вдоль границы сред и с локализацией энергии ПАВ в обеих средах порядка длины волны распространяется волна Стоунли [4, 7]. Последняя трансформируется из

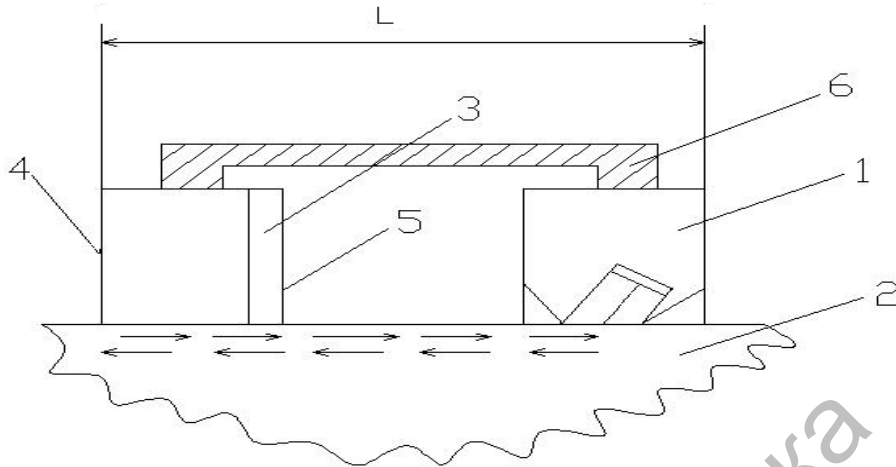


Рис. 1. Схема ультразвукового устройства с контактными отражателями звука (ПАВ): 1 - ПЭП; 2 - объект контроля; 3 - ОЗ; 4 - задняя отражающая звук граница; 5 - передняя отражающая звук граница; 6 - соединительная планка

волны Рэлея на передней границе ОЗ с соответствующим коэффициентом прохождения (или трансформации) по амплитуде $D_{R,St}$ и отражения волны Рэлея R_1 . При пересечении же задней границы ОЗ произойдет обратный процесс, характеризуемый коэффициентом прохождения $D_{St,R}$ и отражения волны Стоунли R_2 . Если пренебречь диссипативными процессами и возможным пространственным расхождением волны, то амплитуда ПАВ A_p , прошедшая через ОЗ вдоль поверхности образца, и амплитуда A_{r2} , принятая ПЭП после отражения от задней границы, а также отношение амплитуды волны, отраженной от передней границы A_{r1} , имеют вид:

$$A_p \sim D_{R,St} D_{St,R}, \quad A_{r2} \sim A_p R_2, \quad A_{21} = A_{r2} / A_{r1} = D_{R,St} D_{St,R} R_2 / R_1. \quad (1)$$

При этом уравнение баланса потока энергии волны может быть представлено:

$$W_R / W_{R0} = \tilde{D}_{R,St} + \tilde{R}_1 + \tilde{D}_{R,R^*} + \Delta_1 = \tilde{D}_{R,R^*} + \tilde{R}_1 + \tilde{D}_{R,St} (\tilde{D}_{St,R} + \tilde{D}_{St,R^*} + \tilde{R}_2) + \Delta_2 + \Delta_1, \quad (2)$$

где $\tilde{D}_{R,St}$ и $\tilde{D}_{St,R}$ - коэффициенты прохождения по энергии ПАВ, распространяющейся вдоль контактной поверхности объекта, через переднюю и заднюю границу ОЗ соответственно; \tilde{D}_{R,R^*} и \tilde{D}_{St,R^*} - коэффициенты, характеризующие прохождение энергии ПАВ в виде волны Рэлея по ближайшей и дальней вертикальной стенке ОЗ соответственно;

\tilde{R}_1 и \tilde{R}_2 – коэффициенты отражения ПАВ от передней (волна Рэлея) и задней (волна Стоунли) границы отражателя; Δ_1 и Δ_2 – неучтенные потери энергии, обусловленные генерацией сопутствующих упругих мод при изменении граничных условий распространения моды.

Таким образом, прохождение ПАВ через акустическую нагрузку сопровождается рядом процессов, связанных с трансформацией мод, отражением и распространением не только вдоль контактной поверхности, но и перпендикулярно ей. Зная приведенные выше коэффициенты, входящие в уравнение акустического тракта (1) и баланса потоков энергии упругих мод (2), представляется возможным оценить и выбрать наиболее оптимальные условия согласования контактирующих материалов (объект-ОЗ) и форму ОЗ, обеспечивающую использование его для создания опорного сигнала при акустических измерениях. Необходимо отметить, что вопросы аналитического описания прохождения ПАВ через контактные ОЗ и отражения представляют значительные трудности из-за сингулярности решений в окрестности разрыва граничных условий. Поэтому и были проведены экспериментальные исследования особенностей отражения и прохождения ПАВ через контактные ОЗ при различном соотношении импедансов контактирующих сред. Ниже представлены результаты исследований особенностей отражения ПАВ от передней и задней отражающей границы ОЗ при варьировании угла падения ПАВ, толщины контактного зазора и акустической нагрузки. На данном этапе в качестве базового объекта настоящих исследований взят образец из алюминия. Необходимо отметить, что часть подобных исследований в высокочастотной области УЗК были выполнены в работе [6], где между нагрузкой и объектом создавался “сухой” акустический контакт.

Результаты экспериментальных исследований. Исследования проведены согласно схеме, приведенной на рисунке 1. Источником и приемником электрических сигналов служили блоки серийного дефектоскопа, а измерение амплитуды отраженных импульсов производилось методом сравнения на двухлучевом осциллографе, где опорный электрический сигнал создавался генератором Г4-107. В качестве ОЗ или акустической нагрузки использованы образцы из алюминия, стали и плексигласа в виде параллелепипеда, устанавливаемого на плоскую поверхность образца через тонкий слой трансформаторного масла. При этом передняя и задняя границы контакта нижней грани ОЗ с объектом (являющиеся локальными зонами отражения и трансформации ПАВ) перпендикулярны плоскости падения ПЭП. Толщина

контактной прослойки между контактной плоскостью ОЗ и объектом выставлялась с помощью эталонных пластин с погрешностью не более 2–3 мкм. Исследование влияние угла падения ПАВ на отражающие звук границы φ производилось путем последовательной установки идентичных ПЭП (по кругу) относительно отражающей звук границы и симметрично нормали к ней.

На рисунках 2 и 3 представлены данные исследования влияния угла падения ПАВ φ на переднюю и заднюю границы ОЗ и толщины контактного слоя на амплитуду отраженного от передней и задней границы ОЗ сигнала.

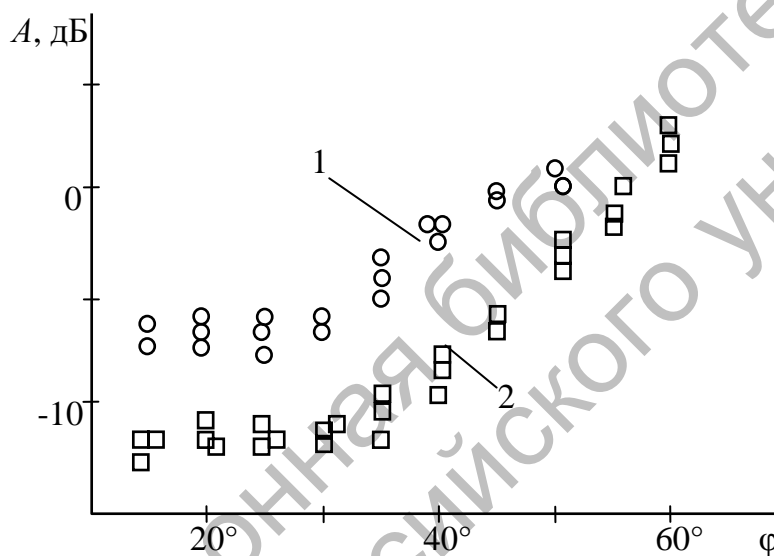


Рис. 2. Отражение ПАВ от передней (1) и задней (2) границ ОЗ, контактирующего с образцом через жидкий слой, в зависимости от угла падения ПАВ φ : образец алюминиевый, ОЗ – стальной

Как видно, увеличение φ в диапазоне $35^\circ = \varphi^* > \varphi \geq 0$ несущественно (1–2 дБ) сказывается на амплитуде отраженных сигналов $A_{ri} = \{A_{r2}, A_{r1}\}$, и при $\varphi > \varphi^* \leq 60^\circ$ A_{ri} возрастают практически в 2–3 раза.

Что касается влияния толщины контактной прослойки на величину A_{ri} (рис. 3), то в случае, когда материал образца алюминий, то $A_{r1}(h_\lambda)$ – преимущественно убывающая функция, а $A_{r2}(h_\lambda)$ – возрастающая, если ОЗ изготовлен из металла. При этом для фиксированной толщины контактной прослойки A_{21} тем больше, чем больше импеданс материала ОЗ. Когда же ОЗ выполнен из плексигласа, то $A_{ri}(h_\lambda)$ – преимущественно монотонно убывающие функции, а их отношение (A_{21}) возрастает до 10 дБ.

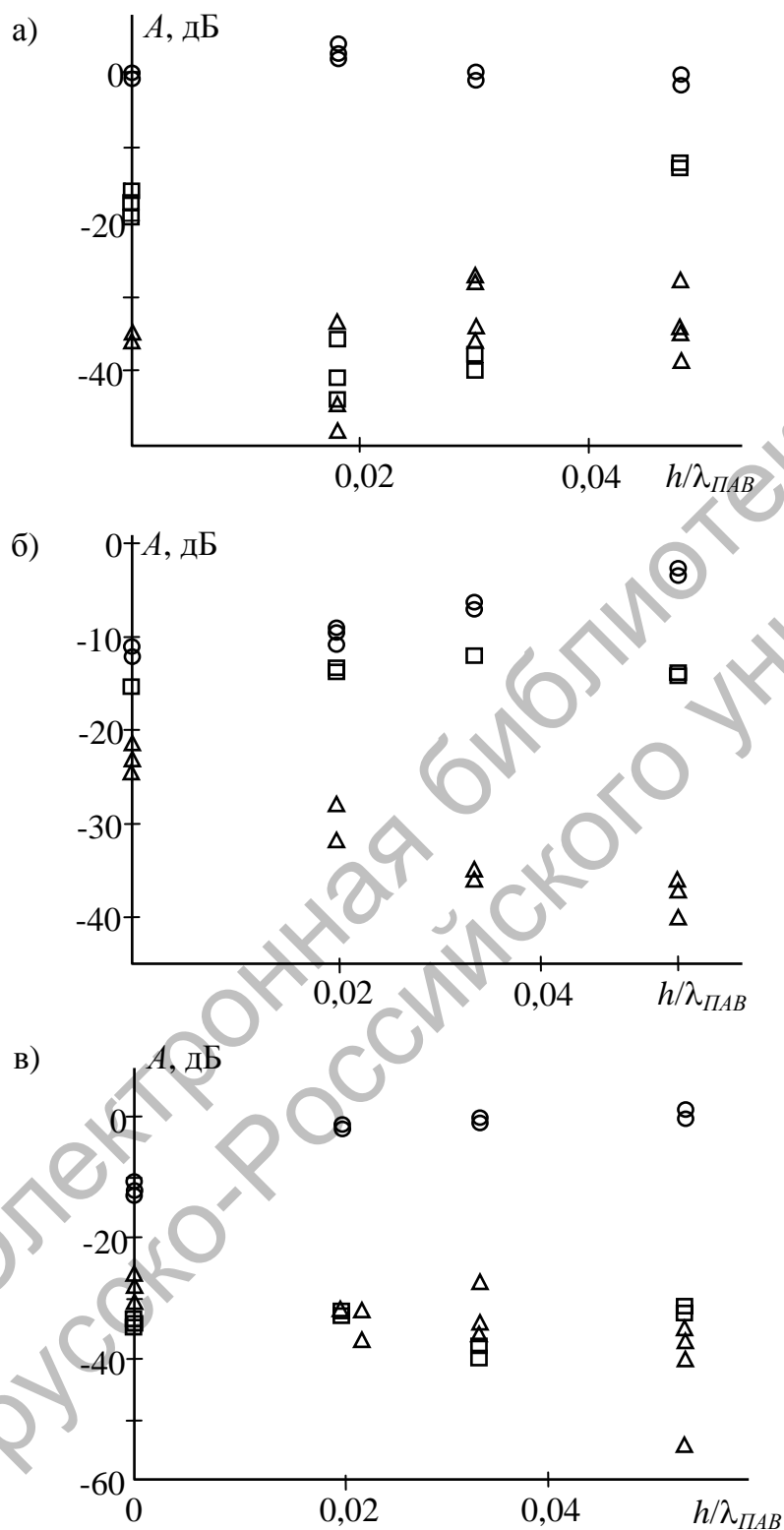


Рис. 3. Влияние толщины контактного слоя на отражение ПАВ от разных границ контакта акустической нагрузки из стали (а, в) и алюминия (б) с образцом из стали (а) и алюминия (б, в) на частоте 1,8 МГц; \square – свободная граница; Δ – передняя граница нагрузки; \circ – задняя граница нагрузки

Необходимо отметить, что увеличение h_λ даже в указанном выше сравнительно небольшом диапазоне может вызвать существенное изменение не только амплитудных параметров волны, но и спектральных, сопровождающееся увеличением длительности импульса и его формы, что, естественно, может привести к значительным погрешностям при проведении измерений скорости звука ПАВ. Однако этот фактор может быть не столь существенным при использовании отражающей границы АН для создания опорного сигнала при выявлении поверхностных дефектов.

Исследования также показали, что наличие акустической нагрузки вызывает уменьшение скорости ПАВ (трансформированной в волну Стоунли) на величину $\sim 0,5-0,7\%$, что согласуется с данными работы [6].

Следует также обратить внимание на тот факт, что в случае выполнения образца из стали и $h_\lambda = h_{\text{ПАВ}}/\lambda_{\text{ПАВ}} \rightarrow 0$ (скользящая граница), отношение A_{21} , являющееся важной характеристикой ОЗ при создании опорного сигнала для измерения скорости ПАВ, принимает максимальное значение и достигает 30–35 дБ.

Таким образом, исследования показали, что независимо от варьирования угла падения ПАВ на ОЗ, толщины контактной прослойки ($h_\lambda = 0-0,05$), материалов образца (сталь, алюминий) и акустической нагрузки (сталь, алюминий, плексиглас) амплитуда отраженного сигнала от передней границы ОЗ существенно меньше, чем от задней границы. Причем отношение этих амплитуд A_{21} может достигать 30–40 дБ.

Исходя из полученных данных, можно заключить, что наилучшая эффективность использования ОЗ для создания опорного сигнала при ультразвуковых измерениях достигается в том случае, когда исследуемый объект стальной. Именно в этом случае наблюдается высокая стабильность опорного сигнала, а влиянием отраженного от передней границы ОЗ сигнала A_{r1} можно в большинстве случаев пренебречь. Однако при прецизионных измерениях скорости ПАВ необходимо минимизировать шумовой фон, создаваемый отраженным от передней границы ОЗ сигналом. Как следует из результатов исследований, для этого рекомендуется изменить геометрию передней границы ОЗ таким образом, чтобы направить отраженный от нее сигнал вне зоны приема ПАВ.

Как показали опытные опробования ОЗ, последний может играть функцию весьма эффективного концентратора и рассеивателя энергии ПАВ.

2. Магнитожидкостные отражатели звука. Анализ особенностей акустического тракта при работе устройств с магнитожидкостным отражателем звука

Магнитожидкостные отражатели звука (МОЗ), как и преобразователи с магнитожидкостным акустическим контактом [5], могут быть использованы для создания опорного сигнала при выявлении несплошностей на поверхности объекта или в пластинчатых материалах. МОЗ (рисунок 4) представляет собой заключенное в корпус тело, на отражающей поверхности которого с помощью магнитной системы удерживается МЖ-звукпровод. Последний представляет собой объем звукопроводной магнитной жидкости, удерживаемый полем между поверхностью объекта и отражателем.

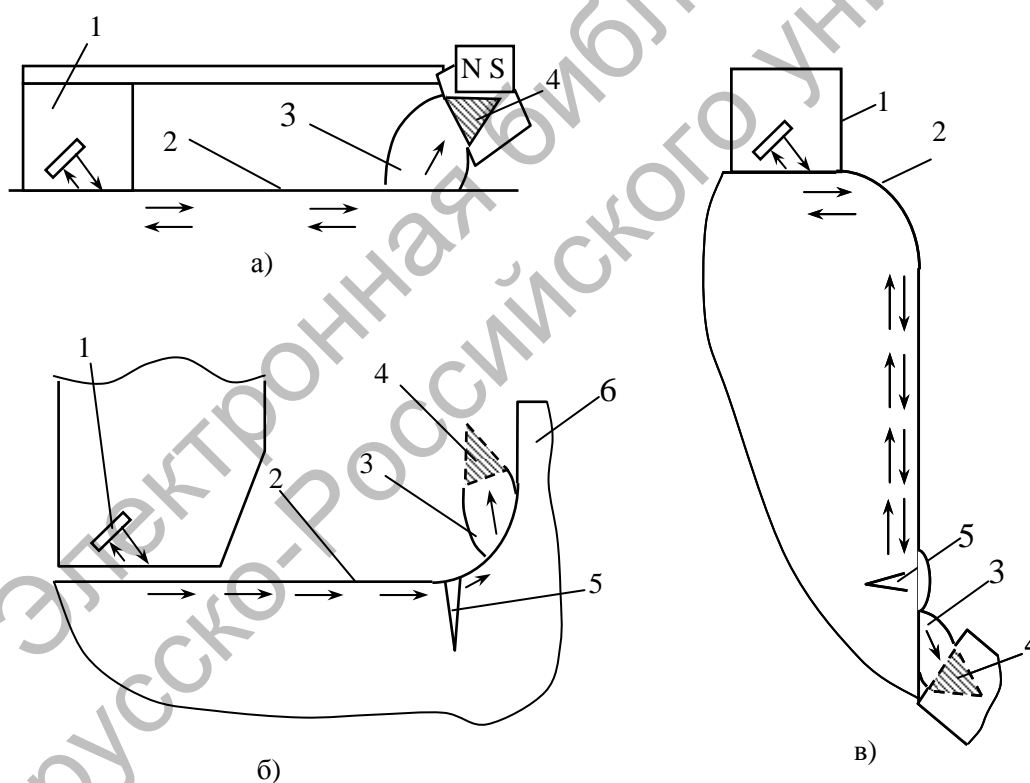


Рис. 4. Схемы построения акустических систем с магнитожидкостным отражателем звука при ультразвуковом контроле: 1 – ПЭП; 2 – поверхность объекта; 3 – МЖ; 4 – ОЗ; 5 – дефект; 6 – замковая зона авиационной лопадки

Суть его работы поясняется на примере контроля объектов поверхностными волнами, где в качестве источника-приемника волн используется наклонный преобразователь.

При поиске поверхностных дефектов возбуждаемые ПАВ проходят контролируемый участок поверхности, затем на границе объект-МЖ они трансформируются в продольные волны, распространяющиеся под углом $\beta = \arcsin \frac{C_{ПАВ}}{C_{МЖ}}$ в жидкости, отражаются от отражателя и после трансформации в ПАВ возвращаются обратно на ПЭП. Как и в традиционных методиках УЗ-контроля, о наличии дефекта судят по появлению на временной развертке дефектоскопа импульса, расположенного во временном промежутке $0 < t_D < t_0$, что соответствует расстоянию $0 < L_d < L_0$, где индекс D соответствует дефекту, а 0 – координате ввода трансформированной волны в МЖ. В процессе контроля возможны вариации амплитуды опорного сигнала из-за нестабильности акустического контакта ПЭП, изменения структуры материала, а также возможны изменения амплитуды из-за пространственного изменения положения отражателя. В особенности это существенно в том случае, когда отражающая звук поверхность плоская. Как показано в работе [8], отклонение угла падения волны β от оптимального β_R всего на $1-2^\circ$ приводит к уменьшению амплитуды опорного сигнала на 7–14 дБ. В процессе сканирования объекта и одновременного перемещения ПЭП с МЖ-отражателем возможно также проявление нестабильности акустического сигнала ПЭП из-за непостоянства структуры материала, наличия на нем загрязнений, рисок и др. Поддержание постоянства амплитуды опорного сигнала достигается путем введения обратной связи, хотя возможно проведение измерений и без этого.

На рисунке 4 (б, в) представлены некоторые принципиальные схемы применения устройств, обеспечивающих локальный ввод УЗК в объекты, и уменьшения влияния структуры материала, макро- и микрогеометрии контактной поверхности на акустические показания путем создания высокостабильного опорного сигнала. При этом используются комбинированные варианты, сочетающие традиционные подходы с предложенным. В частности, на рисунке 4а) изображена наиболее простая конструкция ультразвукового устройства, содержащего наклонный ПЭП волн Рэлея (1), отражатель упругих волн (4), соединенных жесткой опорной планкой, которые установлены на исследуемом объекте.

При наличии поверхностного дефекта в поисковой зоне с отра-

жающей способностью или коэффициентом отражения по амплитуде R_d амплитуда отраженных волн от дефекта P_d и опорного сигнала P_{Ld} примут вид:

$$P_d = F(L_d) K P_0 R_d \exp(-2 \int_0^{L_d} \alpha dx); P_{Ld} = F(L_{Ld}) K P_0 R_0 (D_d)^2 \exp(-2 \int_{L_d}^L \alpha dx), \quad (3)$$

где K – коэффициент, характеризующий нестабильность акустического контакта и электронной схемы возбуждения–приема УЗК; R_0 – коэффициент отражения от отражателя с эффективной шириной $2a$, зависящий от акустических свойств МЖ, отражающего тела и его формы; α – коэффициент ослабления волны, вызванного механизмами рассеяния и поглощения волнового поля; $F(L_d)$ и $F(L_{Ld})$ – функции ослабления и расхождения акустического сигнала с расстоянием.

В некоторых случаях можно положить $D_d \approx 1 - R_d$. Тогда из (3) получим

$$P_{Ld}^* = P_d / P_{Ld} \approx \frac{F(L_{Ld}) R_d}{F(L_d) (1 - R_d)^2} \exp(-2 \int_{L_d}^L \alpha dx). \quad (4)$$

Как можно легко показать из (4), при достаточной близости искусственного и реального отражателей друг к другу достигаются наилучшие условия “отстройки” от нестабильных внешних факторов и наоборот.

При конструировании отражателя учитываются возможные изменения положения его отражающей поверхности относительно контактной поверхности объекта, вызванные следующими факторами: несовершенством геометрии объекта; особенностями ручного контроля и трудностями идеальной пространственной фиксации источника УЗК при сканировании; необходимостью не только перемещать ПЭП по заданной траектории, но и осуществлять его качание в горизонтальной плоскости. Исследование акустического тракта при работе предложенного устройства показало, что для создания опорного сигнала могут быть использованы отражающие звук тела, имеющие не только плоскую, но и криволинейную поверхность, как с положительным, так и отрицательным радиусом кривизны.

Очевидно, что в случае, когда контролируется объект с невысоким затуханием, а мощность ПЭП достаточно высока, то в качестве оптимальной формы отражающего тела может быть использована сфера. Если эта сфера достаточно мала, то смещение ее по вертикали на величину Δz приведет к относительному изменению амплитуды отраженного сигнала

$$A_r \sim \exp[2 \Delta z (\alpha_{RМЖ} \operatorname{ctg} \beta_R - \alpha_{МЖ})], \quad (5)$$

где $\alpha_{МЖ}$ и $\alpha_{RМЖ}$ – коэффициенты ослабления волны, обусловленные прохождением ПАВ в МЖ и вдоль границы объект–МЖ соответственно. Данные для $\alpha_{МЖ}$ получены нами ранее в работе [5], а для оценки $\alpha_{RМЖ}$ были проведены экспериментальные исследования, поясняемые рисунком 5, где представлена схема экспериментальной установки и зависимость затухания ПАВ от удельного акустического сопротивления МЖ.

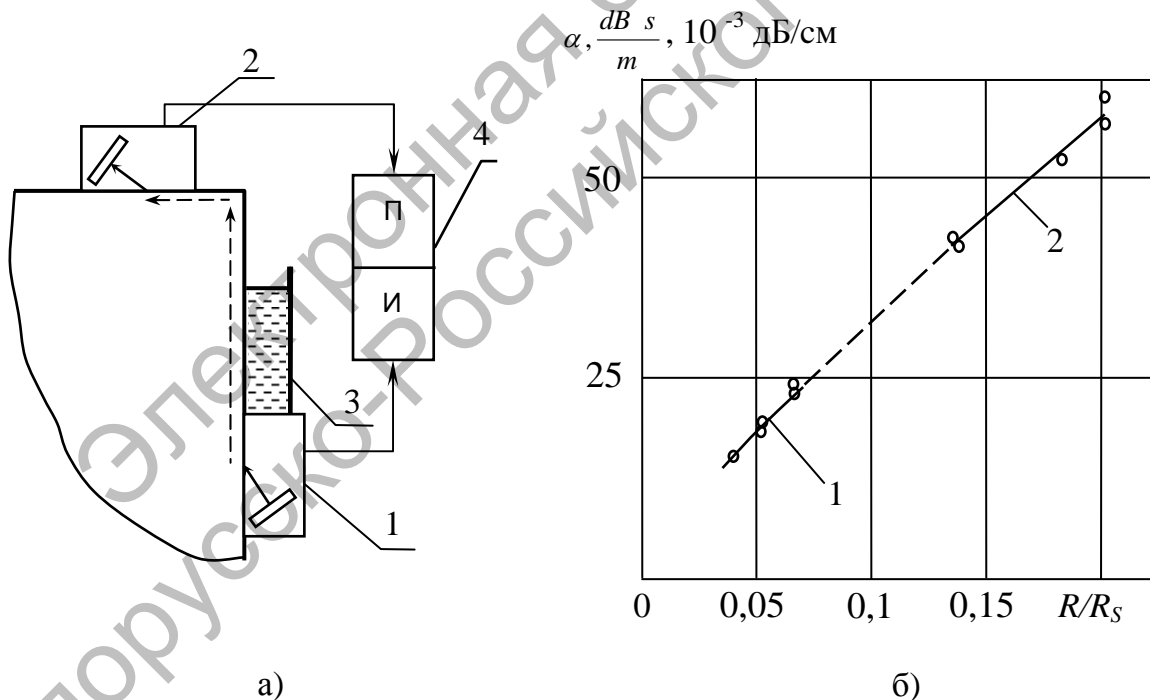


Рис. 5. Схема экспериментальной установки (а) и зависимость затухания ПАВ от удельного акустического сопротивления МЖ (б), полученных в частотном диапазоне $f=1-4$ МГц; а) 1, 2 – излучатель и приемник ПАВ; 3 – МЖ; 4 – электронный блок; б) металл: сталь (зависимость 1); алюминий (2); $\delta_\lambda = 20 \lg(P/P_0) (l\lambda)^{-1}$

Экспериментальные исследования показали, что функция прохождения зондирующего сигнала по указанной схеме для отражающего тела типа сфера или плоскость является квазилинейной функцией концентрации магнетика в растворе коллоида. При этом максимальная стабильность опорного сигнала обеспечивается для условий, когда в качестве МОЗ служит сфера. Применение таких систем наиболее рационально в тех случаях, когда исследуемый объект имеет достаточно сложный рельеф и изменчивую структуру на пути ожидаемого прохождения звуковой волны.

На рисунке 4 приведены некоторые схемы устройств с МОЗ для контроля трещин на поверхности двух объектов, включая авиационные лопатки и сварные швы. Применение МОЗ позволяет на 6 – 8 дБ и более снизить нестабильность опорного сигнала, что, как правило, вызвано некоторым различием геометрии места отражения ПАВ от лопатки к лопатке.

Разработанная нами миниатюрная конструкция ПЭП содержит три ПЭП, выполненных в одном корпусе и расположенных друг за другом. При этом два ПЭП работают в раздельно-совмещенном режиме, а третий служит для контроля излучаемого сигнала ПАВ. При этом обеспечиваются оптимальные условия разбраковки лопаток в результате следующего: а) локальный ввод (прием) УЗК производится в области, примыкающей к переходной зоне лопатки, где образуются дефекты, причем с противоположной стороны этой зоны располагается МОЗ; поскольку путь пробега волны мал, то существенно уменьшается шумовой фон, вызванный крупнозернистой структурой металла. В схеме в) реализуется вариант контроля сварного шва, расположенного в труднодоступном месте. В этой ситуации контроль шва производится поверхностными волнами. А сам преобразователь с отражающим устройством перемещается по круговой траектории. Согласно указанным выше рекомендациям, МОЗ расположен вблизи сварного шва. При этом признаком появления дефекта служит пропадание или ослабление опорного сигнала с одновременным появлением дополнительного сигнала, лежащего на временной шкале ближе к началу развертки дефектоскопа.

Литература

1. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль. / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге; под ред. чл.-корр. РАН В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2004. – 832 с.
2. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.
3. Баев А.Р., Майоров А. Л., Тищенко М.М., Асадчая М.В. Ультразвуковой контроль качества поверхностного упрочнения на основе метода гониометра / Материалы 3-й международной научно-технической конференции «Приборостроение-2010», г. Минск, БНТУ, 10-12 ноября 2010 г. – С. 28–30.
4. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И.А. Викторов. – М.: Наука, 1981. – 288 с.
5. Баев А.Р. Магнитные жидкости в технической акустике и неразрушающем контроле / А.Р. Баев, Г.Е. Коновалов, А.Л. Майоров; под ред. П.П. Прохоренко. – Минск, Беларуская навука, 2000. – 118 с.
6. Гуляев Ю.В., Крылов В.В., Бирюков С.В., Плесский В.П. Поверхностные акустические волны в неоднородных средах / Москва: Наука, 1991. – 415 с.
7. Аббакумов К.Е., Коновалов Р.С. Влияние нарушения акустического контакта на распределение волн Стоунли вблизи границы твердых полупространств – Дефектоскопия, 2008, №3, с. 52–58.
8. Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Сергеева О.С., Коновалов Г.Е. Особенности возбуждения ПАВ в металлах с поверхностным упрочненным слоем // Неразрушающий контроль и диагностика, 2012, №3.
9. Бреховских Л.М. Акустика слоистых сред / Л.М. Бреховских, О.А. Годин. – М.: Наука, 1989. – 412 с.
10. Баев А.Р., Майоров А.Л., Тищенко М.А., Асадчая М.В., Коновалов Г.Е. Способ ультразвукового контроля поверхности твердого тела Ультразвуковое устройство. Патент РБ на изобретение №1475, Б.И. №4, 2011. – С. 130–131.

Статья поступила в редакцию 25.03.13