

Особенности возбуждения ПАВ в металлах с поверхностным упрочненным слоем *The features of the SAW excitation in metals with surface hardened layer*

Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Сергеева О.С., Коновалов Г.Е.
Baev A.R., Mayorov A.L., Asadchaya M.V., Sergeeva O.S., Konovalov G.E.

Выполнен анализ акустического тракта поверхностных акустических волн (ПАВ) применительно к повышению эффективности излучения ПАВ призматическими преобразователями в объекты с упрочненным поверхностным слоем (УПС) за счет оптимального выбора их геометрических и угловых параметров. В частотном диапазоне 1–5 МГц получены экспериментальные зависимости амплитуды ПАВ (A_R) и сопутствующей подповерхностной поперечной волны (A_T) в окрестности контактной поверхности образца с упрочненным ТВЧ-закалкой слоем от угла призмы и длины акустической базы L . Установлено, что с уменьшением угла призмы β , увеличением глубины УПС и частоты волны амплитудный параметр $A_{TR}=A_T/A_R$ возрастает, а угол наклона зависимостей $A_{TR}(L)$ существенно уменьшается. Полученные данные необходимо учитывать в различных методических разработках контроля УПС объектов с плоской и, в особенности, с криволинейной поверхностью.

Analysis of the surface acoustical waves path (SAW) for the angle probe SAW emitting efficiency into the steel objects with harden surface layer (HSL) and optimal geometrical, frequency f , and angular parameters has been made. Experimental dependencies of the SAW amplitude (A_R) and subsurface transverse accompany waves (A_T), received from the object surface, vs. frequency (1-5 MHz) incidence angle β and acoustical delay line L were obtained. The obtained data are to be taken into account for different ways evaluation of the HSL steel objects with plane and, essentially, curved surface.

1. Введение и анализ проблемы

Среди методов неразрушающего контроля широкого спектра изделий с защитными и упрочняющими (неоднородными) покрытиями весьма перспективны акустические методы, основанные на эффектах распространения ультразвуковых волн, включая их дифракцию [1], рассеяние в окрестности нижней границы упрочняющего поверхностного слоя (УПС) $z=h$, дисперсию и другие [2]. Объектом

проводимых нами исследований (применительно к разработке новых методов и средств неразрушающего контроля) служат металлоизделия с УПС, выполненным закалкой ТВЧ, цементацией, лазерным отжигом, химико-термической обработкой и другими видами обработки [3]. Такой слой представляет собой среду с существенно изменяющимися по высоте $h \geq z \geq 0$ структурой и физико-механическими свойствами $\Xi_i(z) = \{E, \rho, \mu, B, \sigma_{\text{пр}}, l_b, \dots\}$, где $i=1$ относится к модулю Юнга E , $i=2$ – плотности слоя ρ , $i=3$ – коэффициенту Пуассона μ , $i=4$ – твердости B , $i=5$ – прочности $\sigma_{\text{пр}}$, $i=6$ – балльности зерна, измеренным в окрестности z , и т.д. Причем, как показывают исследования, включая [1-3], Ξ_i хорошо коррелируют с таким акустическим параметром как скорость поверхностной волны C_R . Необходимо отметить, что по отношению к таким свойствам как E , ρ и μ (или $i \leq 3$), УПС можно считать слабонеоднородным, т.к. справедливы соотношения: $\varepsilon_i = \Delta \Xi_i / \Xi_i = \{\Delta C / C, \Delta \mu / \mu, \Delta E / E, \Delta \rho / \rho\} \ll 1$, где $\Delta \Xi_i = \Xi_i(0) - \Xi_i(h)$. Что касается других параметров ($i > 3$), то их изменение на порядок больше.

Основное направление проводимых нами исследований заключается в определении глубины УПС h и твердости B_0 на поверхности объекта, исходя из дисперсионной зависимости скорости ПАВ в характерном частотном диапазоне $f = f_1 - f_2$, что, в свою очередь, требует высокой точности определения C_R по данным измерения времени распространения τ сигнала на заданной акустической базе L . Для этого используются традиционные наклонные ПЭП или разработанные нами малоапертурные приемные преобразователи (МАП) с малой площадью рабочей поверхности волновода $S \sim (0,2-0,4) \times 10^{-4} \text{ см}^2$ [3]. С увеличением рабочей частоты ПЭП амплитуда ПАВ уменьшается, что приводит к ухудшению соотношения сигнал-шум и росту погрешности измерений C_R .

Необходимо также отметить, что увеличение толщины упрочненного слоя h должно привести к дополнительному “рассогласованию” акустического тракта измерительной схемы вследствие изменения акустических свойств поверхностного слоя и условий возбуждения-приема ПАВ. Кроме того, в процессе их возбуждения могут также генерироваться подповерхностные вертикально поляризованные поперечные волны (ППВ) [4], которые, с одной стороны, являются источником шума, затрудняющего измерения, а с другой – несут информацию о состоянии УПС. О возможности применения ППВ для оценки глубины упрочнения стальных валков на основании использования

явления рефракции и характерной зависимости амплитуда-расстояние сообщалось в работе [2]. Данный метод применим при достаточно больших толщинах упрочненного слоя: $h^*=h/\lambda_R \geq 5-10$. Предметом проводимых ниже исследований являются вопросы определения оптимальных условий излучения-приема ПАВ, а также особенностей формирования сопутствующих подповерхностных поперечных волн для толщин УПС $h < (2-3)\lambda_R$.

2. Краткий анализ акустического тракта

Для разрабатываемых ультразвуковых устройств контроля поверхностного упрочнения объектов по данным скорости поверхностных волн в качестве базового источника волн используются преимущественно ПЭП, угол призмы которых β соответствует максимуму коэффициента преобразования энергии продольной волны в ПАВ:

$$\beta_R = \arcsin(C_L/C_R), \quad (1)$$

где C_L – скорость продольных волн в призме ПЭП.

Очевидно, что изменение скорости ПАВ в объекте или продольной волны в призме ПЭП приведет к необходимости корректировки угла падения волны на величину $\Delta\beta \sim \frac{n^2}{\sqrt{1-n^2}} \left(\frac{\Delta C_R}{C_R} - \frac{\Delta C_L}{C_L} \right)$, определяемую

для условия $\xi_i = \left\{ \frac{\Delta C_R}{C_R}, \frac{\Delta C_L}{C_L} \right\} \ll 1$, где $n = C_T/C_L$, C_T – скорость поперечных

волн в объекте. Основными причинами изменения ξ_i являются температурный фактор, наиболее выраженный для ΔC_L , и структурный, коррелирующий с модулем Юнга и плотностью материала и оказывающий влияние на ΔC_T . Как показывает анализ акустического тракта измерительной системы и предварительные исследования, учет указанных выше факторов необходим при реализации высокоточных измерений скорости ПАВ в объектах с УПС. В особенности это важно, когда требуется пространственное восстановление физико-механических свойств УПС по данным дисперсионной зависимости C_R в некотором характерном частотном диапазоне [3, 5].

На первом этапе проанализируем влияние некоторых параметров конструкции ПЭП (рисунок 1) на эффективность излучения им поверхностных волн. Рассмотрение проблемы проведем качественно,

в приближении геометрической акустики, предполагая, что излучаемый пьезопластиной 1 в звукопроводящую призму 2 пучок продольных волн является слаборасходящимся, а толщина контактного жидкого слоя мала по сравнению с длиной продольной волны в жидкости. При падении продольной волны под оптимальным углом β на границу рабочей поверхности призмы 3 с объектом контроля 4 возбуждается ПАВ, распространяющаяся в направлении оси x .

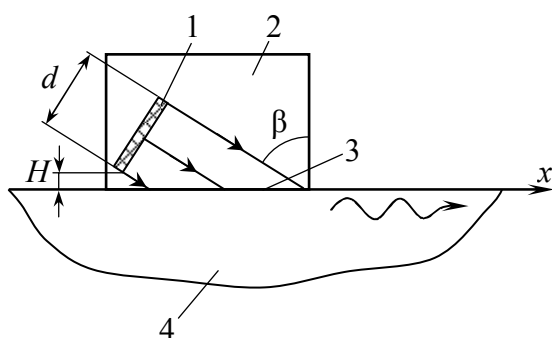


Рис. 1. Схема возбуждения волны: 1 – пьезопластина; 2 – призма; 3 – рабочая поверхность призмы; 4 – объект контроля

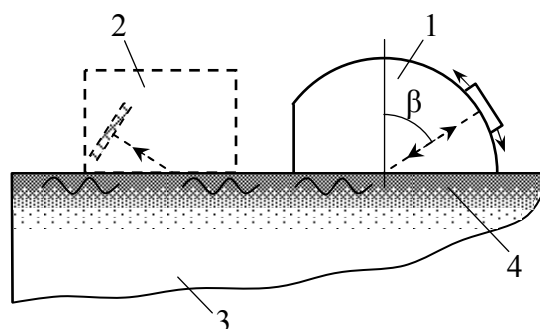


Рис. 2. Схема измерений: 1 – излучающий ПЭП с переменным углом ввода; 2 – приемный ПЭП; 3 – объект контроля; 4 – упрочненный слой

Для данной схемы возбуждения ПАВ наклонным преобразователем основные потери акустической энергии УЗК обусловлены: а) ослаблением продольной волны в призме ПЭП (коэффициент ослабления α_L); б) ослаблением ПАВ при ее распространении вдоль границы призма ПЭП-объект контроля в результате вытекания продольной волны обратно в призму (α_R); в) неполной трансформацией продольной моды (индекс L) в ПАВ (индекс R) на указанной границе с коэффициентом преобразования K_{LR} . Таким образом, выражение для амплитуды ПАВ, излучаемой ПЭП, может быть представлено в виде:

$$A_R \sim K_{LR} F_L F_R = K_{LR} N, \quad (2)$$

где F_L и F_R – соответственно функции ослабления продольной волны в призме ПЭП и поверхностной волны, распространяющейся вдоль границы сред в направлении x .

Если ширина пьезопластины является переменной величиной $b=b(x)$, то в двумерной постановке задачи функция N может быть представлена следующим образом:

$$N = \int_0^{d/\cos\beta} \exp\left[-\alpha_L x / \sin\beta - \alpha_R (b/\cos\beta + \delta - x) + \alpha_L \frac{H}{\cos\beta}\right] b(x) dx, \quad (3)$$

где H – расстояние от плоскости объекта до нижней части наклонно установленного пьезоэлемента (вдоль z); δ – максимальное расстояние от передней грани призмы до ближайшей крайней точки падающего акустического пучка на поверхность объекта. Поскольку $\{K_{LR}, \alpha_L, \alpha_R\}$ – постоянные, то условие достижения максимума амплитуды излучения (приема) ПЭП реализуется при условии $\frac{\partial N}{\partial b} = 0$. Если пьезо-

пластина прямоугольная, то, решая это уравнение, получим оптимальное значение для длины пластины, которая равна $b = \frac{1}{\alpha_L \sin\beta - \alpha_R} \ln \frac{\alpha_L}{\alpha_R}$. Необходимо отметить, что это выражение справедливо для условия слабой расходимости акустического пучка, реализуемого при $\frac{a_i^2}{\lambda_i l} > 1$, где $a_1 = b$, $a_2 = a$ – поперечный размер пьезопла-

стины, λ_l – длина волны в призме ПЭП. Невыполнение этого условия должно привести не только к ослаблению амплитуды ПАВ и расширению амплитудно-угловой характеристики $A_R(\beta)$ (точно так же, как и при отражении акустического пучка [5]), но и к усилению сопутствующих мод, создающих шумовой фон.

Важным фактором, оказывающим воздействие на эффективность излучения ПАВ, является угол призмы β , варьирование которого в диапазоне $\pm(2-3)^\circ$ не оказывает значимого влияния на выбор параметра b . Однако от этого углового параметра может существенно зависеть коэффициент преобразования мод K_{LR} , что обусловлено особенностями механизма взаимодействия поля упругой волны с неоднородным слоем [5]. Расчет K_{LR} для реальных условий прозвучивания объектов с УПС весьма затруднителен. Кроме того, при определенных условиях на результаты измерений может оказать влияние и сопутствующая ППВ (индекс T), возбуждаемая одновременно с поверхностной волной, но имеющая скорость на 8-10% больше. Ниже дается методика эксперимента и представлены результаты исследований влияния глубины УПС на характер изменения амплитудно-угловых зависимостей – $A_R(\beta)$ и $A_T(\beta)$.

3. Методика экспериментальных исследований

Схема проведения экспериментальных исследований поясняется на рисунке 2, используемая аппаратура и методика измерений приведены в работе [4]. Для измерения рабочей частоты, выявления особенностей изменения формы зондирующего импульса и выбора условий, обеспечивающих снижение шумового фона, производится визуальный анализ недетектированного радиоимпульса на экране осциллографа. В качестве источника излучения акустических волн служат наклонные ПЭП, конструктивно выполненные с возможностью плавного изменения угла падения β . Применяется два способа изменения β : в первом случае используется ПЭП с постоянным β_R , а между его рабочей поверхностью и поверхностью образца создается жидкий клин с углом ϕ , во втором – прямой ПЭП перемещается по цилиндрической поверхности призмы, при этом положение точки выхода акустического луча сохраняется постоянным. Частотный диапазон исследований $f=1-5$ МГц. В качестве объекта исследований используются стальные образцы в форме параллелепипедов с размерами $40 \times 40 \times 100$ мм, упрочненные закалкой после цементации на глубину $h=0-1,5$ мм. Влияние глубины УПС на ход зависимостей $A_R(\beta)$ и $A_T(\beta)$ исследовано в режиме прохождения и отражения зондирующего сигнала, где в качестве отражателя ПАВ и ППВ используется одна из граней образца, перпендикулярная контактной поверхности.

4. Основные результаты исследований и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунках 3–7, где представлены зависимости амплитуды поверхностной и сопутствующей подповерхностной волн, возбуждаемых наклонным ПЭП. Прежде всего, следует отметить, что экспериментальные кривые $A_R(\beta)$ и $A_T(\beta)$ имеют вид параболы, обращенной ветвями вниз, и достигают максимума при характерных значениях β_R и β_T , определяемых глубиной УПС и частотой волны (рисунки 3 и 4). Этот результат непосредственно следует из (1) и обусловлен изменением локальных значений модуля упругости E и плотности материала ρ в зависимости от координаты z , так что эффективные значения E_e и ρ_e определяются как

$$E_e \sim \int_{\delta}^0 q_1 E^{-1} dz, \rho_e \sim \int_{\delta}^0 q_2 \rho dz, \quad (4)$$

где $\delta \approx \kappa \lambda_R$ - глубина локализации ПАВ, коэффициент $\kappa \approx 1$ [6]; $q_i = q_i(z)$ - удельные коэффициенты, учитывающие "вклад" упругих свойств и плотности элементарного слоя толщиной dz в эффективные параметры УПС - E_e и ρ_e . (Изменением коэффициента Пуассона можно пренебречь).

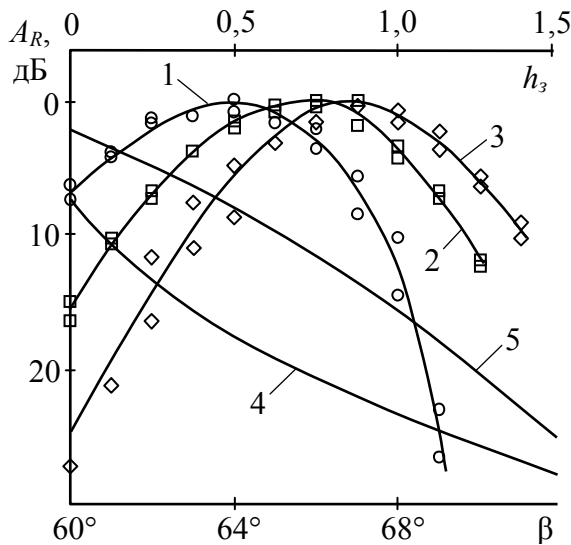


Рис. 3. Зависимость нормализованной амплитуды ПАВ от угла призмы β (1-3) и от безразмерной глубины УПС h^* (4, 5) в режиме отражения: $h^* = 0$ (1); 0,25 (2); 0,9 (3); $\beta = 60^\circ$ (4); 69° (5); $f = 1,8$ МГц

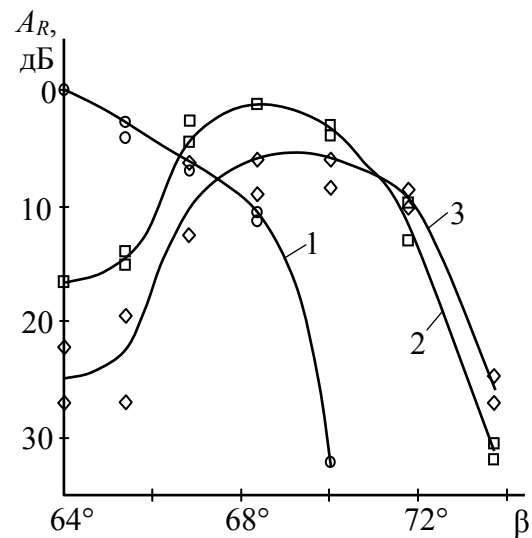


Рис. 4. Угловые зависимости амплитуды ПАВ на частоте 5 МГц при разных толщинах УПС: $h^* = 0$ (1); 0,7 (2); 2,6 (3) в режиме отражения при изменении β методом жидкого клина

Как можно легко показать, в соответствии с известными представлениями [1] справедливы неравенства - $\Delta E = E_0 - E^* < 0$ и $\Delta \rho = \rho_0 - \rho^* < 0$, где индекс 0 соответствует "сырому" состоянию, а * - состоянию после упрочнения. А т.к. $(\Delta E / \Delta \rho)(\rho_0 / E_0) > 1$, то $\Delta C_R = C_R - C_R^* < 0$ и $\Delta \beta = \beta_M - \beta > 0$, что согласуется с данными эксперимента. Подобные амплитудно-угловые изменения (но с обратным знаком) в окрестности оптимального угла возбуждения ПАВ имеют место при отражении продольных волн от границы жидкость - УПС [7], где углу экстремума β_M соответствует минимум зависимости $A(\beta_M)$.

Как следует из полученных данных (кривые 4 и 5 на рисунке 1), наибольшее расхождение нормализованных кривых $A_R(\beta)$, характеризуемых коэффициентом $\xi_R = 20 \log(A_{RY}/A_{R0})$, достигается при $\beta_{M0} > \beta > \beta_{MY}$, где второй индекс соответствует сырому (0) или упрочненному (У) образцу соответственно. Это численное расхождение по амплитуде может составлять ~ 10 - 20 дБ, а угловой сдвиг максимума $\Delta\beta \sim 2$ - 3° и более, если диапазон изменения безразмерной глубины УПС достигает $h^* \sim 2$. Отклонение угла призмы от β_M может привести к изменению не только амплитуды, но и формы импульса (или спектра), что вызвано наличием разницы скорости возбуждаемой ПАВ и скорости следа фронта продольной волны падающего акустического пучка:

$$\Delta C = C_R - C_L \sin[\arcsin(C_L/C_R) + \Delta\beta]. \quad (5)$$

При этом нарушается “синфазность подпитки” ПАВ и повышается интенсивность возбуждаемых сопутствующих мод, создающих дополнительный шумовой фон. Также по этой причине рекомендуется выбирать размеры излучающего пьезоэлемента a_i таким образом, чтобы расстояние от него до поверхности объекта не превышало длины ближней зоны – $L_B > (a_i)^2/\lambda_L$. Это было подтверждено результатами исследований ПЭП на частоте 1 МГц при изменении поперечного сечения пьезоэлемента в диапазоне от 7 до 14 мм; при этом ширина кривых $A(\beta)$ на уровне 6 дБ изменялась в 1,7–1,8 раза.

Т.о., чрезмерное уменьшение апертуры ПЭП и его стрелы (расстояние от точки выхода да передней грани призмы) с целью уменьшения ослабления, вызванного отходящей волной в призме ПЭП, может привести к расширению углового диапазона β акустических лучей, падающих на объект, и уменьшению коэффициента преобразования K_{LR} продольной волны в ПАВ на границе сред.

Исходя из полученных зависимостей (рисунки 3, 4), можно также сделать вывод о важности учета влияния на результаты измерений и температурного фактора, т.к. температурный коэффициент скорости материала призмы $\varepsilon_T = \partial C_R / \partial T$ может составлять ~ 2 - 3 м/с $^\circ$ С. При этом дополнительное отклонение угла падения луча на объект от оптимального равно $\Delta\beta^T = \arcsin[(1 + \varepsilon_T \frac{\Delta T}{C_L}) \frac{C_L}{C_R}]$, а суммарная величина углового отклонения $\Delta\beta_R = \Delta\beta^T + \Delta\beta_0$, где $\Delta\beta_0 = \beta_R(h^*) - \beta_R(0) > 0$. Т.о., отклонение угла падения продольной волны от оптимального, вызванное изме-

нением температурных условий (ΔT) и настройкой угла призмы β_R на максимум амплитуды излучения-приема ПАВ для условий $h^*=0$, приведет к снижению чувствительности измерительного тракта при проведении контроля. Очевидно, что для устранения влияния указанных факторов на измерительный процесс следует проводить подстройку угла призмы излучающего ПЭП на максимум излучаемого (принимаемого) сигнала либо устанавливать угол призмы в некоторое "среднее" положение $\beta_R(0) < \beta_R < \beta_R(h_{\max}^*)$.

С другой стороны, на основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что угловые характеристики $A_j(\beta)$ несут информацию о состоянии УПС и могут быть использованы для решения обратной задачи – оценки глубины упрочненного слоя. В частности, для этой цели могут быть использованы зависимости $A_j(h^*)$, полученные на разных частотах и для фиксированных β_j , взятых на правой и левой ветви зависимостей $A_j(\beta)$. Для реализации этой методики необходима априорная информация о шероховатости поверхности и твердости на ней, а при проведении измерительной процедуры – более точная ($\sim 0,1^\circ$) установка угла призмы излучающего и (или) приемного ПЭП. Измерения могут проводиться как в режиме прохождения, так и в режиме отражения, причем последний вариант является наиболее простым и удобным, т.к. используется всего лишь один ПЭП с перестраиваемым углом падения волны и уменьшается ряд погрешностей, связанных с созданием акустического контакта и точностью установки β_R .

Сопутствующая поперечная вертикально поляризованная мода. В условиях падения продольной волны под углом $\beta < \beta_R = \arcsin(C_L/C_R)$ наряду с ПАВ возбуждается поперечная подповерхностная волна, причем с увеличением $\Delta\beta = \beta_R - \beta$ отношение амплитуд $A_{TR} = A_T/A_R$ достигает максимума при некотором значении $\beta < \beta_R$. Необходимо отметить, что в отсутствие УПС ($h^*=0$) при варьировании $\Delta\beta$ от нуля до $\Delta\beta = \beta_R - \beta_2$, где $\beta_2 = \arcsin(C_L/C_T)$, хоть и наблюдается возрастание A_{TR} , но, тем не менее, во всем диапазоне углов значительно превалирует (практически на порядок) поверхностная мода. Однако при толщине УПС $h^* \approx 1$ максимальное значение A_{TR} составляет порядка 1, а при значениях $h^* \approx 2,5$ в значительном диапазоне углов β превалирует поперечная волна (рисунок 5).

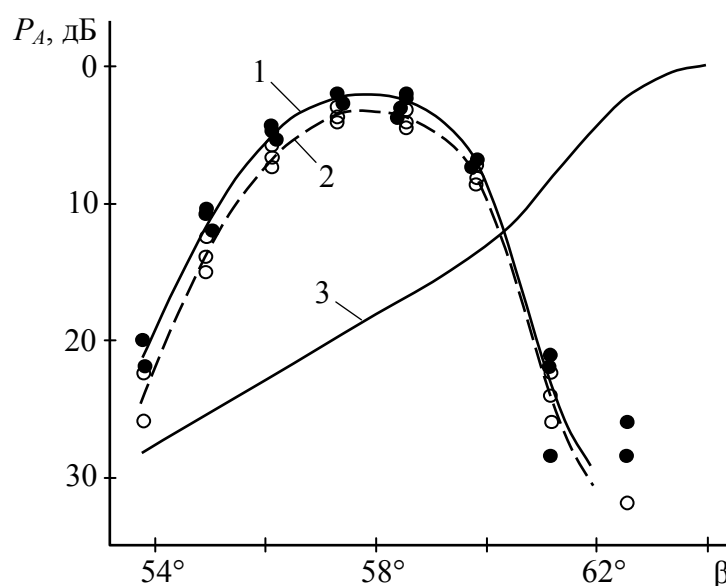


Рис. 5. Угловые зависимости поперечной подповерхностной (1, 2) и поверхностной (3) волн на частоте 5 МГц в режиме отражения в образце с упрочненным слоем $h^*=2,5$; расстояние до отражателя l , мм=20 (1, ●); 40 (2, ○)

Характерные зависимости $A_T(l)$ и A_{TR} для угла падения-приема $\beta \approx \beta_2$ приведены на рисунках 6 и 7. Из полученных данных следует, что с увеличением глубины УПС наблюдается существенное возрастание амплитудного коэффициента A_{TR} (в десятки раз) при $h^* > 1$. В этом случае происходит перераспределение вклада энергии падающей продольной волны в поверхностную и поперечную моды, причем ослабление последней с расстоянием по мере увеличения глубины УПС уменьшается вследствие эффекта рефракции. Угол наклона φ зависимостей $A_{TR}(l)$ и $A_T(l)$ по мере роста h^* уменьшается, так что он может использоваться в качестве информативного параметра, характеризующего глубину УПС.

Знание хода функций на разных рабочих частотах позволяет существенно повысить соотношение сигнал-шум и обеспечить высокую точность измерения скорости ПАВ. С другой стороны, поскольку ход $A_{TR}(\beta)$ существенно зависит от глубины УПС, то, как и в случае исследования ПАВ, представляет интерес использовать такие зависимости для решения обратной задачи – определения глубины УПС. Но для этого необходимо учесть влияние шероховатости поверхности объекта на ослабление ПАВ и обеспечить высокую стабильность акустического контакта в измерительной системе. Что касается функции $A_T(l)$, то в силу особенностей формирования поля излучения, влиянием на нее шероховатости можно пренебречь [1].

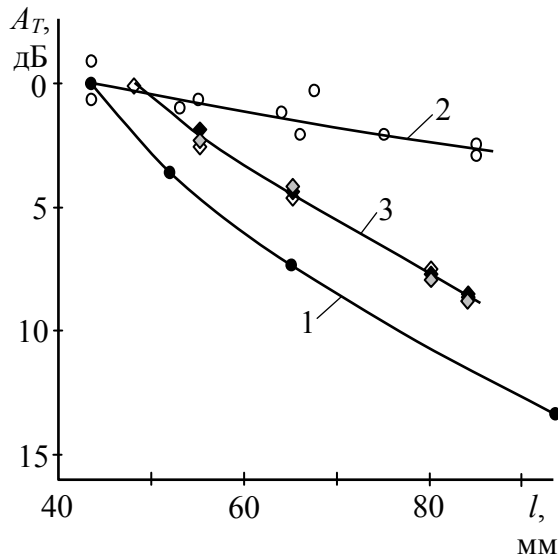


Рис. 6. Зависимость амплитуды подповерхностной поперечной волны от расстояния на частоте 5 МГц (1, 2) и 1,8 МГц (3) в режиме прохождения: безразмерная глубина УПС $h^* = 0$ (1); 2,5 (2); 0,9 (3)

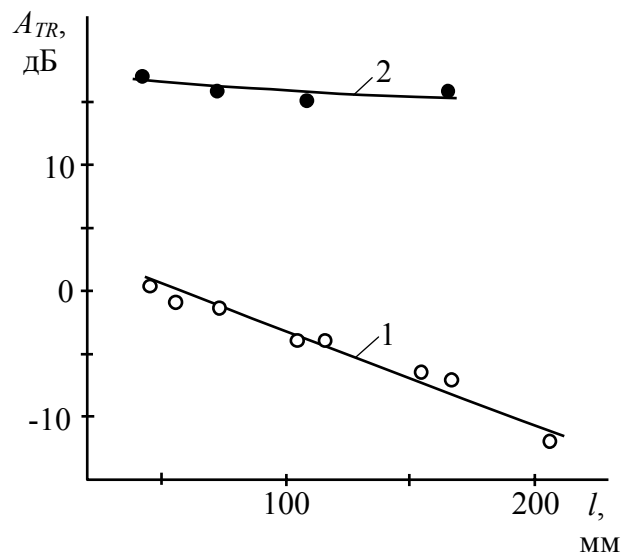


Рис. 7. Зависимость отношения амплитуд A_T/A_R от расстояния в режиме отражения от грани образца: безразмерная глубина УПС $h^* = 0$ (1); 2,5 (2); $f = 5$ МГц, $\beta = 58^\circ$

Выводы

Таким образом, в настоящей работе дан краткий анализ работы акустического тракта применительно к повышению эффективности излучения ПАВ призматическими преобразователями в объекты с упрочненным слоем за счет оптимального выбора их геометрических и угловых параметров.

В частотном диапазоне 1–5 МГц получены экспериментальные зависимости амплитуды ПАВ A_R и сопутствующей подповерхностной поперечной волны A_T в образцах с упрочненным ТВЧ-закалкой слоем от угла падения волны β , варьируемого в диапазоне, включающем второй критический угол β_2 и оптимальный угол возбуждения ПАВ β_R . Установлено, что угловые зависимости амплитуды ПАВ имеют вид, подобный параболе, угол максимума которых возрастает с увеличением безразмерной глубины УПС $h^* = h/\lambda_R$. Подобные закономерности имеют место и для амплитудно-угловой зависимости сопутствующей подповерхностной поперечной волны.

Впервые получены данные по коэффициенту преобразования продольной моды в ПАВ и ППВ в диапазоне $h^*=0-1,65$, причем функция $A_{TR}=A_T/A_R$ является преимущественно возрастающей функцией рабочей частоты зондирующего сигнала f и безразмерной глубины УПС h^* , что обусловлено особенностями преобразования падающей продольной волны в ПАВ и ППВ, а также рефрагированием последней. При этом величина A_{TR} может изменяться на 15–20 дБ и более, что необходимо учитывать в различных методических разработках контроля УПС на объектах с плоской и, в особенности, с криволинейной поверхностью. Зависимости $A_R(\beta)$ и $A_T(\beta)$ могут быть использованы для определения параметров упрочненного слоя.

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. Басацкая Л.В., Вopilкин А.Ч., Шишов А.П. Дифракция ультразвуковых волн в поверхностно-закаленном слое металлов и метод измерения глубины закаленного слоя / Дефектоскопия, 1988, №7. – С. 54–65.
3. Баев А.Р., Майоров А.Л., Тищенко М.А. Ультразвуковой метод анализа поверхностного упрочнения металлических изделий // Литье и металлургия, 2010, №4. – С. 167–271.
4. Baev A., Prokhorenko P. and Asadchaya M. Excitation and Propagation of Subsurface Vertically Polarized Transverse Waves Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, USA, v. 24, ed. by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, American Institute of Physics, New York, 2005. – P. 91 – 96.
5. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. – М.: Наука, 1989. – 412 с.
6. Викторov И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. – М.: Наука, 1981.
7. 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.
8. 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 13.08.12