

Таким образом, анализ данных полученных расчетным и экспериментальным путями свидетельствует об эффективности использования усовершенствованной схемы для выявления слабоотражающих звук дефектов сцепления материалов. В особенности это касается потенциально опасных дефектов, включая дефекты слипания.

УДК 620.179.16-534.1

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Баев А.Р., Майоров А.Л., Левкович Н.В., Асадчая М.В., Жаворонков К.Г.
ГНУ "Институт прикладной физики НАН Беларуси", Минск, Республика Беларусь

Достаточно часто в качестве информативного параметра, хорошо коррелирующего с физико-механическими свойствами металлоизделий $\Xi_i \in \{E, \sigma, \sigma_{пр}, B, \dots\}$, используется скорость той или иной моды $C_{L,T,R}$, где E - модуль Юнга, σ и $\sigma_{пр}$ приложенное механическое напряжение и прочность на разрыв соответственно, B – твердость материала и др., а индексы относятся к подповерхностной продольной (L), поперечной (T) и поверхностной (R) волне. Эти волны возбуждаются при углах падения ультразвуковой волны ($УВ$) на объект $\beta_{L,T,R} = \arcsin(C_k/C_{L,T,R})$.

Ввиду того, что скорость $УВ$ (или ее гармоники) должны измеряться с точностью $\sim 10^{-3}-10^{-4}$, то необходимо устранить ряд факторов, влияющих на погрешность измерений, среди которых шумовой фон, вызванный появлением сопутствующих мод и переломлением в объекте базовой моды (рисунок 1). Этому вопросу и посвящена первая часть работы, в которой представлены расчетные и экспериментальные данные, позволяющие существенно нивелировать влияние шумового фона, вызванного ограниченными размерами объекта (волноводный эффект), а также наложением сопутствующей поверхностной моды на полезный (информативный) сигнал с огибающей в виде колокола и количеством осцилляций в нем m . В общем виде уравнение акустического тракта для представленной на рисунке 1 схемы прозвучивания объекта ограниченной толщины имеет вид

$$A \sim D_{и} D_{п} R_f F(s_1) F(s_2),$$

где $D_{и}$ и $D_{п}$ - коэффициенты звукопрозрачности $УВ$ по амплитуде относительно границы ПЭП-объект и объект-ПЭП соответственно, R_f – коэффициент отражения от донной поверхности ($z=h$). $F(s_1)$ и $F(s_2)$ – функции ослабления акустического луча с траекториями s_1 и s_2 - согласно схеме: излучающий преобразователь (ПЭП) → отражающая (донная) поверхность → приемный ПЭП, В частности, для устранения шумового фона вызванное однократным отражением от донной поверхности части потока информативной или сопутствующей моды

1. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. / Под общ.ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 3. – 864 с.
2. Баев, А.Р. Особенности отражения акустического пучка от поверхности с неоднородными граничными условиями. Ч. 1. Результаты экспериментальных исследований / А.Р. Баев, М.В. Асадчая // Дефектоскопия. – 2010. – № 8. – С. 3–17.

(распространяющейся вдоль поверхности) необходимо выполнение условий:

$$m/f \geq \left[(\sqrt{x_L^2 + h_L^2} + \sqrt{(1-x_L^2)^2 + h_L^2})n - 1 \right] / C, \quad (1)$$

$$m/f \geq L |n-1| / C, \quad (2)$$

где индекс L характеризует обезразмеривание по L , $C_A \in \{C_{L,T,R}\}$, $n=C/C_A$. Как показывает анализ зависимостей $A\{R_f, D_{и}, D_{п}\}$, при различных углах падения той или иной моды на донную поверхность, наиболее высокая интенсивность отраженной моды достигается преимущественно при $x \sim L/2$. Если m задано, то оценочное значение L , определяемое из (1 и 2), примет вид:

$$L_{\lambda} \approx L/\lambda \leq \mathfrak{Z} \pm (\mathfrak{Z}^2 + \mathfrak{R})^{0.5}, \quad \mathfrak{Z} = m(1-n^2)f^2, \quad (3)$$

$$\mathfrak{R} = (m^2 - 4n^2 h_L^2) (1-n^2)^{-1} f. \quad (4)$$

В случае, если зондирующей (информативной) волной является T -мода, а сопутствующая - продольная, то условие, при котором происходит наложение k -кратно отраженной продольной волны на m -й период осцилляции импульса поперечной ПВ, выполняется, если критическая толщина волновода

$$h^*_{\lambda} = 2 \left[\sum_{k=0}^{k=2} a_k (L_{\lambda})^k \right]^{0.5} (m+1)^{-1},$$

где $a_0=1$, $a_1=1/2n$, $a_2=3/4n^2$.

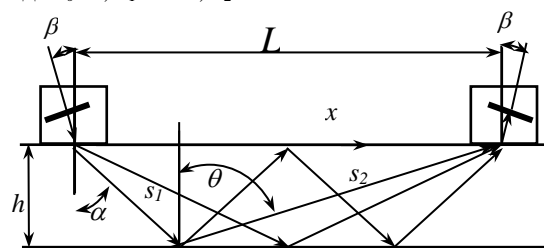


Рисунок 1 – Пояснение к возникновению шумового фона, создаваемого упругими волнами

Расчетные и экспериментальные зависимости амплитуды той или иной моды от величины акустической базы и толщины волновода (металлической подложки) подобны представленным на рисунке 2. Значение L_{λ}^* , при котором происходит «расщепление» этих кривых,

представляет собой характерный параметр h_λ , являющийся максимальной акустической базой, обеспечивающей режим теневого прозвучивания, при котором можно пренебречь влиянием переотраженных сигналов на информативный импульс, используемый для определения скорости волны. Если же информативной волной является ПАВ, то наряду с возможным влиянием шума, создаваемого отраженными от донной поверхности сопутствующей продольной и поперечной модой, следует учесть отражения поверхностных волн от боковых границ объекта. Оценка условий нивелирования влияния этого фактора на измерительный тракт проводится указанным выше образом.

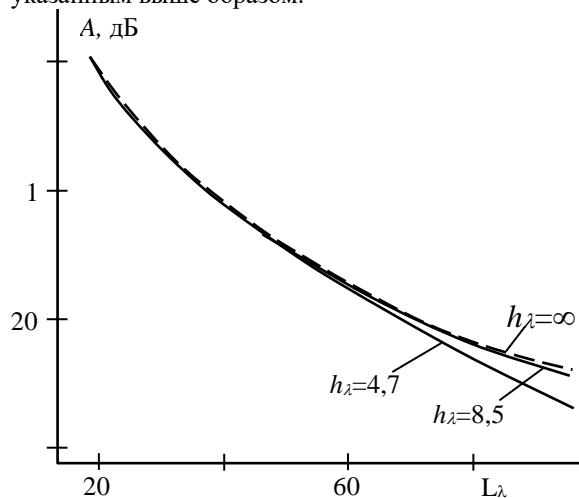


Рисунок 2 – Влияние толщины волновода (стальной пластины) на зависимость амплитуды L-моды от длины акустической базы при $f = 5 \text{ МГц}$

Во второй части работы проводится численное и опытное моделирование процессов распространения ПАВ в металле с неоднородно упрочненным ТВЧ закалкой поверхностным слоем (УПС) (рис.3). Численные расчеты выполнены на основе использования формулы Оулдера

$$\Delta C_s(C_{s0})^{-1} \sim C_{s0} \int_{-h}^0 (-\Delta w^2 \Delta \rho u_i^* u_i + u_{i,j}^* u_{k,l} \Delta P_{ijkl}) F(z) dz,$$

где w - абсолютное значение средней за период энергии невозмущенной волны, переносимой через упругое полупространство единичной ширины; ΔP_{ijkl} - изменения упругих модулей; $u_{k,l}$ - поле смещений в волне или тензор смещений; $F(z) \sim \Delta B$. Учитывается также тот факт, что

$$\{\Delta E/E, \Delta \rho/\rho\} \ll 1 \text{ и } \Delta C = C_R - C_{R0} \sim \Delta B = B(z) - B_0,$$

где C_R - скорость ПАВ на поверхности срезанного слоя УПС толщиной $h = z$, а индекс 0 соответствует $z=0$. Некоторые результаты численного моделирования и опытных данных представлены на рисунке 3, где приведены зависимости изменения C_R от толщины срезанного слоя УПС при разных частотах. Как видно, на данном этапе исследований наблюдается неплохое качественное соответствие между

данными эксперимента и расчетной модели. Интересно, что экспериментальные зависимости $C_R(h)$, приведенные на рисунке 3а, при $\lambda_R > \delta$, где δ - глубина УПС, представляют линейную зависимость при $h < (0,6-0,7)\delta$. Причем характерный тангенс их наклона $c_h = C/\Delta h$ с уменьшением частоты падает, а кривая 2 в окрестности максимума функции $B(h)$ претерпевает четко выраженный излом, обусловленный особенностями изменения модуля Юнга, зависящего от твердости УПС. Т.о., использование дисперсионных характеристик $C_R(f)$ является весьма важным для зондирования распределения по высоте свойств УПС. Необходимо отметить, что имеющееся численное различие между расчетными и опытными данными может быть преодолено: а) путем уточнения особенностей изменения твердости по глубине УПС; б) увеличением частотного диапазона зондирования волн; в) повышением качества акустического контакта.

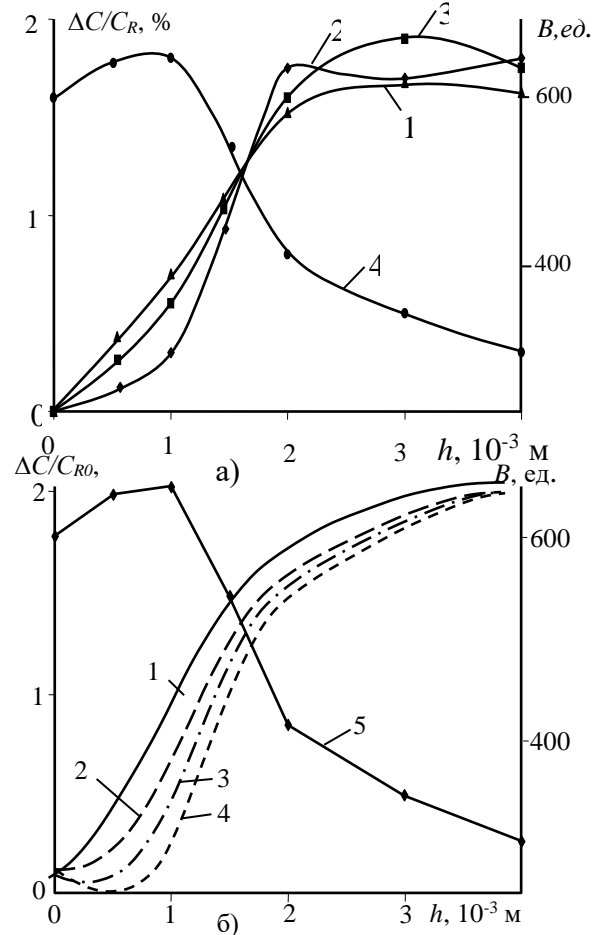


Рисунок 3 – Влияние глубины среза УПС h на скорость C_R : эксперимент (а) и расчет (б): а) 1, 2, 3 – $\Delta C/C_R$; 4 - твердость B ; f , МГц=1(1); 1,8 (2); 3,8 (3); б) 1-4 – $\Delta C/C_R$; 5 - твердость B ; f , МГц=1(1); 1,8 (2); 2,5 (3); 4 (4)

1. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. / под общ.ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 3. – 864 с.