

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ВОЛНЫ В ПОПЕРЕЧНУЮ И ПОВЕРХНОСТНУЮ МОДЫ В МЕТАЛЛАХ С УПРОЧНЕННЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ

Баев А. Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Коновалов Г.Е.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь,
baev@iaph.bas-net.by

Неразрушающий контроль (НК) качества поверхностного упрочнения металлов, выполненного термической или химико-термической обработкой, является актуальной задачей в различных отраслях современного промышленного производства машин, станков, инструментов и др. Один из эффективных методов НК, хорошо коррелирующий с глубиной h упрочненного поверхностного слоя (УПС) и его твердостью B – ультразвуковой, реализуемый на основе следующих эффектов: а) рефрактирования объемных волн в приповерхностном слое [1]; б) дисперсии поверхностных акустических волн (ПАВ) [2]; рассеяния поперечной моды на “условной” границе УПС, характеризуемой балльностью зерна металла [3]. В настоящей работе обращено внимание на особенности взаимодействия падающей продольной волны (L) с УПС, включая трансформацию последней в подповерхностную поперечную T -моду, а также отражение L -моды от УПС (ранее этим процессам не уделялось должного внимания при реализации соответствующих методик НК поверхности твердых тел). Поясняющие схемы проводимых исследований представлены на рисунке 1, где в качестве информативной характеристики УПС служат амплитудно-угловые зависимости $P(\beta)$ при трансформации мод (рис. 1а) и отражении L -моды от УПС (рис. 1б). Максимальный частотный диапазон исследований $f = 0,5\text{--}10$ МГц.

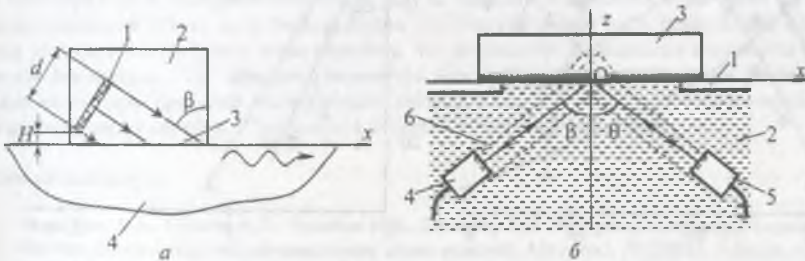


Рис. 1. Схема исследований при трансформации (а) и отражении (б) волн от УПС: а) 1 – пьезопластина; 2 – призма ПЭП; 3 – рабочая поверхность призмы; 4 – образец с УПС; б) 1 – опорная поверхность; 2 – иммерсионная среда; 3 – образец с УПС; 4 – излучающий ПЭП; 5 – приемный ПЭП; 6 – коромысла

Проведен анализ акустического тракта применительно к возбуждению ПАВ в металлах наклонным преобразователем и дана оценка потерям акустической энергии в результате: 1) ослабления продольной волны в материале призмы ПЭП с коэффициентом ослабления α_L ; 2) трансформации на границе сред продольной волны в ПАВ, характеризуемой коэффициентом трансформации K_{LR} ; 3) ослабления ПАВ (или волны Стоунли) при распространении вдоль границы призмы ПЭП–контактная среда–металл, характеризуемого коэффициентом ослабления α_R . При этом амплитуда возбуждаемой ПАВ на выходе преобразователя описывается выражением: $P_R \sim K_{LR} F_L F_R = K_{LR} N$, где F_L и F_R – функции ослабления продольной волны в призме ПЭП и ПАВ, распространяющейся вдоль границы

сред в направлении x , соответственно. Путем минимизации P как функционала определены оптимальные параметры ПЭП для возбуждения ПАВ.

Необходимо отметить, что при отклонении скорости упругих мод $\{C_R, C_L\}$ (при возбуждении ПАВ) от оптимального значения, вызванном наличием упрочненного слоя, изменением температуры и др., требуется дополнительная корректировка угла падения волны:

$$\Delta\beta \sim \frac{n^2}{\sqrt{1-n^2}} \left(\frac{\Delta C_R}{C_R} - \frac{\Delta C_L}{C_L} \right), \quad (1)$$

где $n = C_L/C_R$. При отклонении температуры среды от номинальной на величину ΔT значения $\{\Delta C_R, \Delta C_L\} \sim \Delta T$. То же имеет место и при возбуждении T -волны.

Проведены экспериментальные исследования зависимости амплитуды поверхностной P_R и сопутствующей подповерхностной моды P_T при изменении угла падения волны, глубины УПС и частоты волны (1–5 МГц). Установлено (рис. 2), что зависимости амплитуды ПАВ от β подобны параболе, обращенной ветвями вниз. Угол максимума функции $P_R(\beta)$ возрастает с глубиной упрочненного слоя и частотой волны, что, как предполагается, вызвано уменьшением "эффективной" скорости C_R в упрочненном слое и согласуется с законом Снеллиуса.

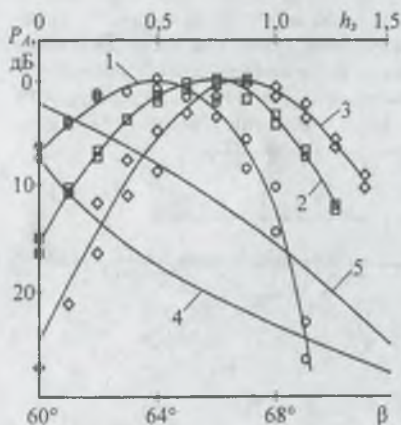


Рис. 2. Амплитуда ПАВ в зависимости от угла призмы β (1–3) и от безразмерной глубины УПС h^* (4, 5) в режиме отражения волны от торца образца: $h^* = h/\lambda = 0$ (1); 0,4 (2); 1,5 (3); $\beta = 60^\circ$ (4); 69° (5) на частоте 1,8 МГц

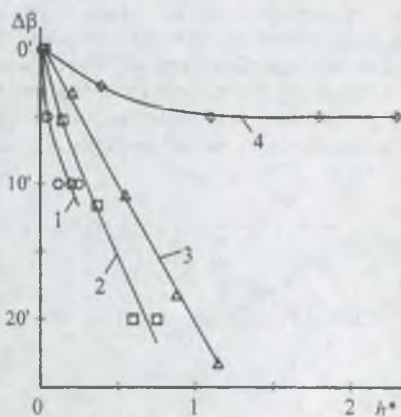


Рис. 3. Отклонение угла минимума амплитуды отраженной волны $\Delta\beta$ в зависимости от безразмерной глубины среза УПС h^* образца с цементированным слоем: f , МГц = 1,1 (1); 3,3 (2); 5 (3); 10 (4)

Подобные закономерности имеют место и для амплитудно-угловой зависимости сопутствующей подповерхностной поперечной волны, максимум которой локализован в окрестности второго критического угла. Также впервые получены данные по соотношению коэффициентов преобразования продольной моды в ПАВ и T -волну, характеризующему параметром $\epsilon_{RT} = P_R/P_T$, который является весьма чувствительным как к углу β , так и к $h^* = h/\lambda$. Такой характер поведения исследуемых функций обусловлен не только особенностями преобразования падающей на объект со слабонеоднородным (в отношении акустических свойств) слоем продольной волны в ПАВ и T -волну, но и эффектом рефракции последней. При этом величина ϵ_{RT} может изменяться на 15–20 дБ и более, что, как установ-

лено, может приводит к изменению спектра зондирующего сигнала. Несомненно, что эти факторы необходимо учитывать в различных методических разработках контроля УПС на объектах с плоской и с криволинейной поверхностью. Также экспериментально установлено, что при $3 > h^* > 1,5$ закон ослабления подповерхностной T -волны с расстоянием практически такой же, как и для ПАВ, а это имеет весьма важное значение не только для реализации методики контроля УПС, но и для традиционной дефектоскопии металлоизделий, подвергнутых химико-термической обработке.

На основании проведенных исследований показана возможность использования полученных зависимостей на разных частотах в качестве дополнительного информационного материала для определения параметров упрочненного слоя.

Необходимо отметить, что измерения параметров УПС по данным скорости ПАВ [2] или с использованием эффектов рефракции [1] могут проводиться лишь при достаточных габаритах объектов, что не всегда возможно. Локальность области контроля УПС может быть существенно уменьшена (до ~ 1 см) путем использования метода гониометра [2] (рисунок 1б), где информативным параметром, характеризующим упрочненный слой, является угол минимума амплитуды отраженной продольной $\beta^* = \arcsin(C_L/C_R)$. При этом функция $P(\beta)$ имеет вид, подобный параболе, обращенной ветвями вверх. В случае, когда образцы выполнены из стали с цементированным упрочненным слоем или из высокопрочного чугуна (с отбелом), изменение безразмерной глубины слоя сопровождается сдвигом углового параметра β^* (рис. 3). Угловое отклонение $\Delta\beta$ формально может быть описано формулой (1), где параметры $c_0 = \Delta C_R / C_R$ и n являются функциями, зависящими от глубины слоя, частоты волны, а также модуля Юнга $E(z)$ и плотности упрочненного слоя $\rho(z)$. В силу того, что для УПС в виде отбела (на чугуне) и цементированного слоя (на стали) знаки ΔC_R разные, то разные знаки имеет и угловой сдвиг $\Delta\beta$. Кроме того, поскольку значения c_0 для указанных типов образцов существенно отличаются, то, как следует из (1) и подтверждается экспериментом, более чем на порядок отличаются и значения $\Delta\beta$. Т.е., толщинометрия отбела на чугунах методом гониометра может быть реализована в цеховых условиях. Необходимо также отметить, что повышение надежности и точности измерения параметров УПС методом гониометра может быть достигнуто путем увеличения количества переотражений зондирующего сигнала в системе излучатель-объект-приемник и использования магнитной жидкости в качестве иммерсионной среды.

Список литературы

1. Вopilкин А.Х., Шишов А.П., Ермолов И.Н., Басацкая Л.В. Ультразвуковой способ определения твердости поверхностно-закаленных слоев изделий. Авт. свид. №729503. – Бюлл. изобр., 1980, №15.
2. Бавев, А.Р. Измерение глубины слоя, закаленного ТВЧ, ультразвуковым методом / А.Р.Бавев, А.Л.Майоров, М.А.Тищенко // Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь: материалы междунар. науч.-тех. конф., Жлобин, 6-7 сентября 2007 г. / РУП БМЗ. – Жлобин. 2007. С.110-112.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. – М.: Машиностроение, 2006. – 864 с.