

А.Р. БАЕВ, А.Л. МАЙОРОВ, М.А. ТИЩЕНКО
ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

Разработка упрочняющих технологий и эксплуатация объектов с упрочненными поверхностно слоями (УПС) требует применения высокоэффективных методов и средств неразрушающего контроля, среди которых весьма перспективны акустические методы определения глубины h и твердости B_r упрочненного слоя [1]. Они, преимущественно, основаны на особенностях дифрагирования подповерхностной ультразвуковой волны (УВ) и изменения скорости поверхностной волны C_R на фиксированном расстоянии L . Зона контроля может быть существенно уменьшена, а используемая аппаратура упрощена, когда применен так называемый гониометрический метод, используемый для исследований влияния толщины УПС разной природы на амплитудно-угловые характеристики отраженного акустического пучка. Суть метода заключается в определении угла β_m локального минимума амплитуды волны P , отраженной от поверхности объекта, где $\beta_m = \arcsin(C_{жс}/C_R)$. Определяя C_R в зависимости от частоты волны (и др. факторов), представляется возможным получить данные об B_r и h .

Цель настоящей работы заключается в выявлении возможностей использования гониометрического метода для контроля металлов: а) с “сильно неоднородным” УПС, упругие модули и скорость УВ которых на десятки процентов отличаются от основы металла (чугун с отбелом); б) со “слабо неоднородным” УПС, упругие модули которых и скорости УВ отличаются от основы на несколько процентов (стальные образцы с поверхностно-цементированным слоем, срезанным на заданную глубину h). На основе анализа акустического тракта измерительной системы показана принципиальная возможность повышения достоверности и точности измерений искомого значения β_m за счет увеличения количества переотражений n в системе излучающий ПЭП-УПС-рефлектор при соблюдении условия слабого расхождения акустического пучка в процессе переотражения на акустической базе $L_\phi = 2(R_1 + R_2)n < (a^2/\lambda_{жс})$, где R_i – расстояния (радиусы) ПЭП ($i=1$) и отражателя ($i=2$) от их общей оси вращения; a – радиус излучающей поверхности ПЭП, $\lambda_{жс}$ – длина УВ в жидкости. Показана принципиальная возможность использования магнитных жидкостей в качестве иммерсионной среды, что позволяет упростить измерения и повысить их надежность за счет стабилизации условий отражения УВ от границы жидкость-рефлектор и нивелирования влияния температурных колебаний на определение искомого значения β_m . Кроме того, предложено использовать дополнительную схему прозвучивания для высокочувствительного кон-

троля свойств жидкости по скорости звука в ней $C_{ж}$ и амплитуде волны в окрестности отражающей поверхности.

При проведении экспериментальных исследований определялся искомый угол β_m с погрешностью не хуже 1-2' и его сдвиг $\Delta\beta_m = \beta_m - \beta_0$ для различных толщин УПС и частоты волны, где $\beta_0 = \beta_m$ при $h=0$. Отметим, что с увеличением f требования к шероховатости поверхности R_a отражателя повышаются, и при $R_a^* = R_a / \lambda_{ж} \geq 0,003$ и $f > 5$ МГц погрешность измерения C_R для цементированных УПС может возрасти на 0,2 % и более. Для случая контроля УПС с отбелом эти требования значительно ниже, т.к. параметр, характеризующий чувствительность измерительной схемы $\beta_{mh} = d\beta_m/dh$ к изменению h ($h/\lambda < 1$) на порядок выше, чем для УПС, выполненных цементацией. Некоторые результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 1 и 2, где приведены зависимости $\Delta\beta_m$ от частоты волны и толщины УПС для образцов указанного типа. Экспериментально установлено, что в частотном диапазоне 1,25 – 10 МГц с увеличением глубины УПС $\Delta\beta_m > 0$, если поверхностный слой металла (стали) упрочнен цементацией, и $\Delta\beta_m < 0$ – если на чугуне имеется слой отбела. Причем максимальное изменение $\Delta\beta_m$ для образцов с цементированными УПС не превышает 30', а для образцов из чугуна с отбелом – 5° 15'.

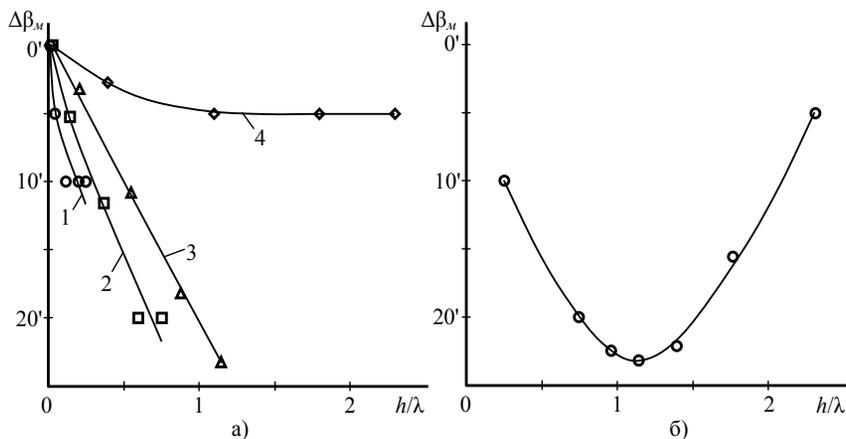


Рис. 1. Зависимости $\Delta\beta = \beta_m - \beta_0$ от толщины УПС и длины волны (частоты): а – зависимости от толщины УПС (для для f , МГц=1,1 (1); 3,3 (2); 5 (3); 10 (4)); б – зависимости от длины волны (частоты)

Как видно, представленные функции изменения сдвига угла экстремума амплитуды отраженного сигнала $\Delta\beta_m(h^* = h/\lambda)$ в зависимости от частоты волны и толщины УПС представляют собой монотонно изменяющиеся функции. Причем при $f_i = \text{const}$ с увеличением глубины среза $\Delta\beta_m(h^*)$ моно-

тонно убывает, если образец с цементированным УПС, и возрастает, если УПС - отбел. “Крутизна” же этих кривых, характеризуемая производной $|d\Delta\beta_m/dh^*|$, уменьшается с увеличением частоты волны. Что касается угловых зависимостей $\Delta\beta_m$ (построенных для $h=\text{const}$, то они имеют экстремумы в зависимости от частоты. Причем, как видно, исследуемая угловая характеристика $|\Delta\beta_m|$ достигает максимума при h^* , близком к 1. Т.е., наибольшая “угловая” чувствительность метода достигается в том случае, когда глубина слоя сравнима с длиной рефрагирующей в объекте (при отражении) именно продольной моды.

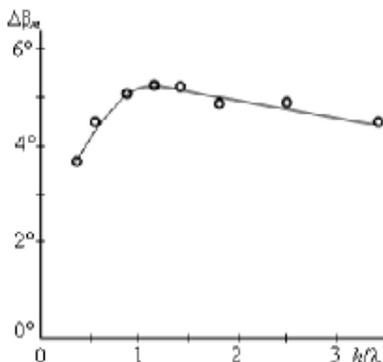


Рис. 2. Зависимость $\Delta\beta_m$ от длины УВ на чугунном образце с отбелом

Сравнительный анализ показывает, что использование усовершенствованного гониометрического метода позволяет практически в 2 раза увеличить контролируемую поверхностную зону металла по сравнению с методом прозвучивания изделия поверхностными волнами [2]. Однако точность измерения S_R уменьшается, если при этом акустическая база для распространения поверхностной волны L превосходит 30-40 мм. Таким образом, полученные результаты исследований убедительно свидетельствуют о возможности проведения контроля усовершенствованным гониометрическим методом не только глубины отбела на чугуне, но и глубины слабо неоднородных УПС, выполненных различными способами: закалкой ТВЧ; термохимическим, лазерным упрочнением и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: справ. в 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2006. – Т. 3. – 864 с.
2. **Баев, А. Р.** Измерение глубины слоя, закаленного ТВЧ, ультразвуковым методом / А. Р. Баев, А. Л. Майоров, М. А. Тищенко // Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь: материалы междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 6-7 сентября 2007 г. / РУП БМЗ. – Жлобин, 2007. – С. 110–112.

E-mail: baev@iaph.bas-net.by