

УДК 620.179.1+531.4
 РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ В ОБЪЕКТАХ С
 ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛАБОНЕОДНОРОДНЫМ
 УПРУГИМ СЛОЕМ

А. Р. БАЕВ, А. Л. МАЙОРОВ, Н. В. ЛЕВКОВИЧ, Н. Н. ГИЛЬ
 Государственное научное учреждение
 «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
 «БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
 Минск, Беларусь

Среди методов контроля широкого спектра изделий с защитными и упрочняющими (неоднородными) покрытиями весьма перспективны акустические методы, основанные на эффектах распространения упругих волн (УВ), включая их дифрагирование, рассеяние в окрестности нижней границы упрочняющего неоднородного слоя (УНС) $z=h$, дисперсию и другие. УНС представляет собой среду с изменяющимися по высоте z физико-механическими свойствами $\{E, \rho, B, \sigma_{пр} \dots\} = \Xi_i(z)$, где $i=1$ относится к модулю Юнга E , $i=2$ – плотности слоя ρ , $i=3$ - твердости B , $i=4$ - прочности $\sigma_{пр}$, измеренных в окрестности координаты z и т.д. Причем, как показывают исследования [1], Ξ_i хорошо коррелируют с таким акустическим параметром, как скорость поверхностной волны (ПАВ) - C . Отметим, что по отношению к таким свойствам как $\Xi_{A,i} = \{E, \rho, \mu\}$, УНС большого числа объектов (включая металлоизделия) можно считать слабонеоднородными, поскольку, как показывают опытные испытания $\varepsilon_{i} = \Delta \Xi_{A,i} / \Xi_{A,i} = \{\Delta C/C, \Delta \mu/\mu, \Delta E/E, \Delta \rho/\rho\} \ll 1$, где μ - коэффициент Пуассона, а $\Delta \Xi_{A,i}$ - представляют собой максимальные изменения указанных параметров в ПМС слое по глубине. Основная задача настоящих исследований заключается в получении связи между характерной высотой ПМС (или глубиной упрочненного слоя) h и скоростью ПАВ с учетом априорной информации об общем виде распределения определяющих параметров $\Xi_i(z)$. Авторами рассмотрено несколько моделей, описывающих характер распространения ПАВ в поверхностном слабонеоднородном слое, как с учетом импульсного вида зондирующего сигнала, так и без него. При этом в качестве базового использовано уравнение Оулда.

$$0,25 \Delta C (C_0)^{-2} w_0 = \int_{-\infty}^0 (-\Delta \omega^2 \Delta \rho u_i^* \tilde{u}_i u_i + u_{i,j}^* u_{k,l} \Delta G_{ijkl}) F(z) dz, \quad (1)$$

где C_0 и u_i – скорость ПАВ и амплитуда смещений невозмущенной волны соответственно, w_0 - абсолютное значение средней за период энергии невозмущенной волны, переносимой через упругое полупространство единичной ширины; ΔG_{ijkl} – максимальные изменения упругих модулей, причем $\{\Delta \rho, \Delta G_{ijkl}\} \sim F(z)$. В силу того, что рассматриваемые УНС представляют собой слабонеоднородные среды по отношению к упругим свойствам слоя то, предполагается, что функция распределения смещений

или скорости движения частиц в волне по высоте слоя сохраняет подобие. С учетом (1) предложена упрощенная модель, рассматривающая распространение волны в слое ПМС как в волноводе высотой 2λ с эквивалентными параметрами E^* и ρ^* , на основе которых определяется скорость ПАВ:

$$C = \Psi(\mu) \sqrt{\frac{E^*}{\rho^*}}; \quad (2)$$

$$E^* = \left(\frac{1}{2\lambda} \int_0^{2\lambda} \frac{w dz}{w_{\max} E(z)} \right)^{-1}; \quad (3)$$

$$\rho^* = \frac{1}{2\lambda} \int_0^{2\lambda} \rho(z) \frac{w dz}{w_{\max}}, \quad (4)$$

где $\Psi(\mu)$ – параметр, зависящий от коэффициента Пуассона.

Таким образом, глубина ПМС h определяется путем решения обратной задачи (2-4) по данным измерения C и при наличии зависимостей $\Delta E = E - E_0$ и $\Delta \rho = \rho - \rho_0$ от координаты. Необходимо отметить, что поскольку скорость ПАВ обладает дисперсией, то представляется возможным восстановить “профиль закалки” по экспериментально измеренной дисперсионной зависимости $C(\omega)$. Для определения последней предложено использовать метод ударного возбуждения УВ (короткий импульс – широкий спектр) и метод частотного сканирования.

Разработана методика и проведены экспериментальные исследования глубины упрочненного закалкой слоя по данным скорости ПАВ в частотном диапазоне 0,5–5,0 МГц. Определение скорости ПАВ производится с помощью малоапертурных преобразователей, обеспечивающих стабильность акустического контакта и требуемую точность измерений времени прохождения ПАВ акустической базы, составляющей $L=40-50$ мм. В электронном блоке установки, выполненном на базе РС, предусмотрена возможность измерения временного интервала τ с погрешностью не ниже 5 нс и спектрального анализа зондирующего сигнала. В качестве объекта исследования использованы образцы из стали 45 с глубиной упрочненного слоя $h=0-1,6$ мм.

По данным результатов экспериментальных исследований и (2-4), выполнено «восстановление» функции $\Delta B(z)$, точное знание которой позволяет определить искомое значение h . Проведено сравнение, упомянутых выше, методов определения глубины ПМС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баев, А. Р.** Ультразвуковой метод анализа поверхностного упрочнения металлических изделий / А. Р. Баев, А. Л. Майоров, М. А. Тищенко // Литье и металлургия. – 2010. – № 4 – С. 167–271.