

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ В МЕТАЛЛАХ СО СЛАБОНЕОДНОРОДНЫМ СЛОЕМ

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

ГНУ «ИПФ НАН Беларуси», Минск, Беларусь,
baev@iaph.bas-net.by

Поверхностная закалка токами ТВЧ, закалка после цементации, химико-термическая обработка, наплавка, напыление и др. процессы являются прогрессивными методами обработки деталей и повышения их прочности, износостойкости и др.

Характер протекания фазовых превращений и, как следствие, получаемая структура и глубина упрочнения определяются температурно-временным воздействием нагрева на поверхностный слой материала. Одними из наиболее часто встречающихся дефектов поверхностной закалки являются недостаточная глубина упрочненного слоя, неравномерность глубины и наличие участков, в которых поверхностная закалка не произошла, что может привести к разрушению эксплуатируемой детали или механизма в целом. Использование неразрушающих методов контроля, основанных на магнитных и электромагнитных измерениях, ограничено вследствие значительных погрешностей, вызванных многофакторным влиянием свойств объекта на сигнал-отклик. Ультразвуковые методы контроля, основанные на измерении скорости распространения различных типов упругих волн, более перспективны благодаря слабой зависимости результата измерений от вариаций химсостава материала, отсутствию существенных ограничений по форме, размерам и состоянию поверхности изделий.

По отношению к прочностным и эксплуатационным свойствам упрочненный поверхностный неоднородный слой (ПНС) можно считать “сильнонеоднородным” (эти величины в слое изменяются в несколько раз), а по отношению к упругим свойствам – модулям Юнга E и сдвига G , а также плотности ρ и скорости C упругой волны – “слабонеоднородным”, поскольку реальные изменения по глубине слоя h составляют не более 6-8% для E и G и не более 2-3 % – для C и ρ . Как показывает анализ известных исследований [1], для большинства средне- и высокоуглеродистых сталей наблюдаются устойчивые корреляционные зависимости между скоростью упругих волн и прочностными параметрами (твердостью B).

В настоящей работе рассматривается возможность измерения акустическим методом глубины ПНС. В качестве базового параметра взята скорость распространения поверхностной (квазиРэлеевской) акустической волны (ПАВ).

Очевидно, что, поскольку основная энергия волны Рэлея сосредоточена в приповерхностном слое твердого тела толщиной порядка длины волны λ_R [2], структура материала в этом слое должна влиять на распространение волны. Изменение структуры при закалке сопровождается уменьшением упругих констант, определяющих величину скорости рэлеевской волны:

$$C_R = \frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \mu)}}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Наличие неоднородности по E и ρ в упрочненном слое приводит к изменению скорости волны (1) в силу того, что относительное изменение модуля Юнга при упрочнении значительно больше, чем изменение плотности металла. При этом скорость распространения поверхностной волны будет определяться некоторыми эффективными значениями E^* и ρ^* , для нахождения которых может быть предложен аддитивный подход.

Слой толщиной λ_R , в котором сосредоточена энергия рэлеевской волны, можно представить состоящим из бесконечного числа однородных слоев толщиной dz , модуль Юнга и плотность которых являются функциями координаты z . Необходимо дополнительно учесть тот факт, что энергия волны $W(z)$ или давление $P(z)$ распределены по глубине объекта неравномерно – достигая максимальных значений вблизи свободной границы и резко уменьшаясь при $z \rightarrow \lambda_R$. Т.о., на формирование акустического сигнала, поступающего на приемник, окажут значительно большее влияние те элементарные слои, по которым проходит больший поток акустической энергии.

Таким образом, эффективный модуль Юнга E^* и эффективную плотность ρ^* ПНС можно определить из закона аддитивного вклада плотностей и обратных модулей Юнга элементарных слоев упрочненного материала с учетом “коэффициентов парциального вклада”.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований зависимости скорости ПАВ от глубины слоя. Использовались две группы стальных образцов, упрочненных цементацией и закалкой ТВЧ. В первой группе различные значения глубины ПНС были получены путем варьирования параметров процесса упрочнения. Во второй группе все образцы исходно были упрочнены на одинаковую глубину, после чего путем механической обработки поверхности были получены различные значения глубины ПНС. Толщина цементированного слоя составляла 0-3,5 мм, слоя, закаленного ТВЧ, – 0-1,8 мм.

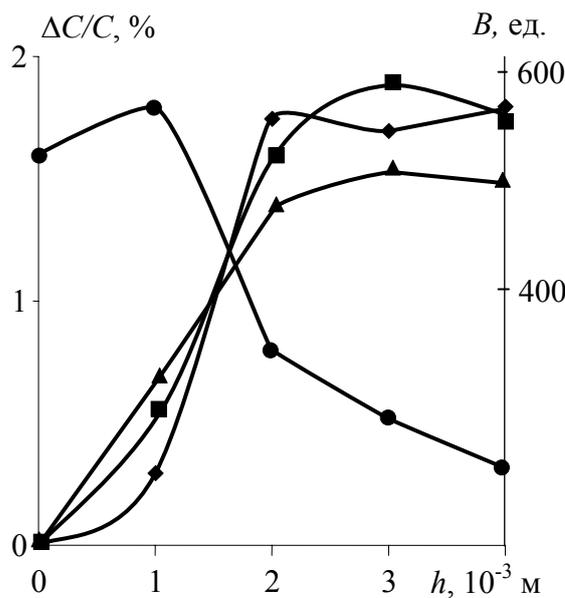


Рис. 1. Скорость ПАВ (\blacktriangle , \blacklozenge , \blacksquare) и твердость закаленного слоя (\bullet) в зависимости от глубины его среза: частота волны f , МГц = 1 (\blacktriangle); 1,8 (\blacklozenge); 4 (\blacksquare).

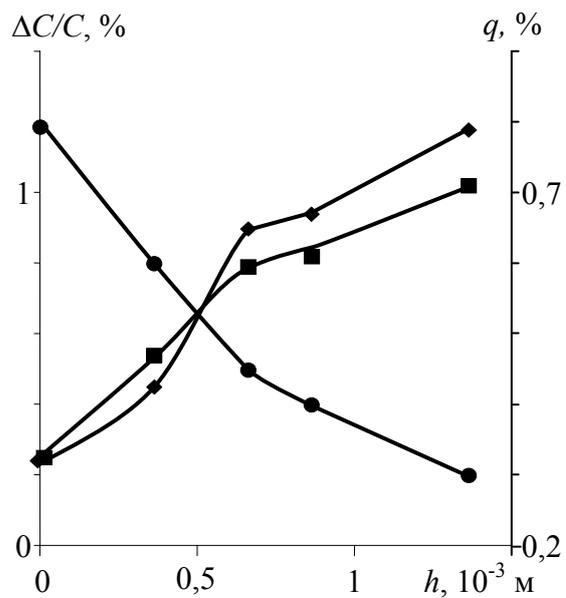


Рис. 2. Скорость ПАВ (\blacksquare , \blacklozenge) и концентрация углерода (\bullet) в зависимости от глубины среза цементированного слоя: частота волны f , МГц = 1,8 (\blacksquare); 3 (\blacklozenge).

Установлено, что в широком диапазоне частот (0,5–5 МГц) зависимости скорости ПАВ от глубины ПНС (рис.1, 2) являются монотонно убывающими, медленно выходящими на насыщение при $h > \lambda_R$, причем в диапазоне $h^* = h/\lambda_R < 0,6-0,8$ они могут быть аппроксимированы линейными зависимостями. Такой характер изменения C_R обусловлен тем, что при $h < 0,5\lambda_R$ наиболее существенно сказывается влияние изменения “эффективных” значений модуля Юнга E^* и плотности материала ρ^* , определяющих величину C_R , в поверхностной зоне материала. Важно отметить, что с увеличением глубины ПНС абсолютная величина $C_h = dC_R/dh$ при $h^* < 0,2-0,4$ тем больше, чем

больше f . Объясняется это тем, что с увеличением частоты волны глубина проникновения ее порядка длины волны и обратно пропорциональна ее частоте f . Так что для одного и того же значения h изменение относительного значения эффективного модуля Юнга (по сравнению со случаем $h=0$) будет тем больше, чем больше f .

Зависимости на рис.1 получены на образцах после поверхностной закалки. В процессе измерений закаленный слой постепенно снимался (шлифованием) на глубину h_C . Соответственно, твердость поверхности B также монотонно падает с увеличением глубины среза. Из зависимостей видно, что скорость рэлеевской волны возрастает с увеличением глубины среза упрочненного слоя плавно и монотонно, при этом изменение скорости C_R тем больше, чем выше частота волны.

Важно отметить, что функция изменение твердости от глубины среза имеет максимум (рис.1) на некоторой характерной глубине h_B . И именно в окрестности этого значения аргумента наблюдается существенный излом функции dC_R/dh для частоты волны 1,8 МГц. Таким образом, изменяя частоту звуковой волны, представляется возможным локализовать область взаимодействия упругих возмущений в слое и получить данные о некоторых интегральных параметрах структуры и механических свойств металла.

Снижение концентрации углерода в поверхностном слое металла сопровождается монотонным увеличением скорости ПАВ (рис.2). Соответственно, существует возможность ультразвуковым методом определять качество цементации изделий.

Что касается исследования характеристик ослабления амплитуды волны при различных значениях h , то следует отметить, что эти изменения малы и в исследованном частотном диапазоне изменение α не превышает несколько десятков дБ/м. По-видимому, при более высоких частотах волны и больших акустических базах изменение функции $\alpha(h)$ более существенное. Однако при этом возникает проблема обеспечения стабильного акустического контакта (наличие шероховатости, геометрия объекта и др.) и размещения ПЭП на больших расстояниях друг от друга, что делает использование акустического параметра α нежелательным для проведения измерений.

Установленные зависимости между скоростью звука и структурой упрочненных слоев, полученных цементацией и закалкой ТВЧ, позволяют разработать методы неразрушающего контроля качества упрочнения: глубины упрочненного слоя, твердости. Для того, чтобы оценить глубину закалки, необходимо выбрать схему прозвучивания объекта таким образом, чтобы максимум акустической энергии концентрировался в исследуемой области, и оценить изменение скорости звука при различной глубине закаленного слоя.

Более сложной задачей, актуальной для ответственных объектов, является выявление распределения различных параметров, прежде всего твердости B , по глубине ПНС. Как показывает теоретический анализ, для достоверного восстановления искомой функции $B(z)$ требуется априорная информация, включающая возможный диапазон изменения глубины ПНС, изменение твердости на поверхности объекта и др. Это позволяет обеспечить нужный частотный спектр и глубину проникновения зондирующих волн.

Список литературы

1. Кондратьев, А.И. Влияние термообработки на акустические характеристики материалов. / А.И. Кондратьев, А.Н. Иванов, С.Н. Химухин // Дефектоскопия. – 2006. - №3. – С.28-36.
2. Викторov, И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И.А. Викторov. - М.: Наука, 1981. - 288 с.