



The results of investigation of the way and device for measuring with nondestructive method of hardened case thickness are described. The data of measurements do not depend on the steel grade.

А. Р. БАЕВ, А. Л. МАЙОРОВ, М. А. ТИЩЕНКО, ИПФ НАН Беларуси

УДК 621.179+534.1

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Для повышения эксплуатационных характеристик изделий широко применяются методы поверхностного упрочнения, выполненные ТВЧ-закалкой, цементированием, алитированием, химико-термической обработкой и др. Как правило, для контроля качества упрочненных поверхностных слоев и самих упрочняющих технологий используют разрушающие методы. При этом контроль проводится выборочно, что нередко приводит к пропуску брака. В ряде случаев для этих целей находят неразрушающие методы, использующие корреляционные зависимости, связывающие изменение магнитных или электропроводных свойств с твердостью B и глубиной упрочненного слоя h . Однако их применение ограничено из-за существенного влияния даже незначительных изменений (в пределах технических требований) легирующих добавок в металле на корреляционные зависимости; необходимостью локальности измерений и измерений на криволинейной поверхности и в труднодоступных местах, включая галтельные переходы, донные поверхности шлицы различных деталей и др. [1]. Иногда для определения твердости упрочненного слоя используют метод отскока индентора или импедансный метод [2], оставляющий отпечатки на изделии, что не всегда допустимо. Кроме того, толщина упрочненного слоя при этом не измеряется.

Применение акустических методов является перспективным для неразрушающего измерения характеристик упрочненных слоев. Во-первых, это связано с тем, что при упрочнении и изменении структуры слоя изменяется не только твердость, но и упругие модули, включая модуль Юнга E и плотность ρ . Скорость же любой распространяющейся по металлу моды упругой волны равна $C \sim \sqrt{E/\rho}$. В силу того что $\Delta E/E \ll 1$ и $\Delta \rho/\rho \ll 1$

(ΔE и $\Delta \rho$ изменения модуля Юнга и плотности в результате упрочнения), относительные изменения скорости моды упругой волны и удельного акустического сопротивления $R_H = \rho C$ могут быть представлены в виде

$$\frac{\Delta C}{C} = 0,5 \left(\frac{\Delta E}{E} - \frac{\Delta \rho}{\rho} \right),$$

$$\frac{\Delta R_H}{R_H} = 0,5 \left(\frac{\Delta E}{E} - \frac{\Delta \rho}{\rho} \right). \quad (1)$$

Кроме того, после закалки в упрочненном слое значительно изменяется коэффициент затухания упругих волн δ . Все упомянутые выше акустические параметры $p_A = (C, R_H, \delta)$ могут быть положены в основу методик по определению параметров упрочненного слоя. Однако измерение скорости распространения упругих волн представляется наиболее адекватной процедурой. Измерение, например, затухания может давать значительные ошибки (до сотен процентов) в условиях производства. Для измерения параметров упрочненного слоя по скорости распространения упругих волн может использоваться несколько процедур. Во-первых, это непосредственное измерение скорости мод упругих колебаний, распространяющихся через упрочненный слой. В этом случае измеряется время распространения на какой-то характерной базе L ($C = L/t$). В результате получается интегральная оценка параметров слоя в измеряемой области. Чем меньше измеряемая база, тем точнее требуется измерение временного интервала и меньше общая точность измерений. Во втором случае (метод гониометра) определяют характерный угол падения упругой волны β_m на границу жидкость – упрочненный слой, при котором амплитуда отраженной волны P имеет минимум:

$$\beta_m = \alpha_m = \arcsin(C_f/C_R), \quad (2)$$

где C_f и C_R – скорости соответственно продольной волны в иммерсионной жидкости и поверхностной (квазиэлевской) волны в объекте исследования; α_m – угол падения. Из (2) следует, что искомая скорость поверхностной волны равна $C_R = C_f/\sin\beta_m$. Определяя C_R в зависимости от частоты волны (и других факторов), представляется возможным получить данные о V_f и h . Одно из достоинств метода заключается в простоте используемой аппаратуры – без высокоточных блоков измерения временных интервалов. Кроме того, контролируемая область упрочненной поверхности может быть локализована до характерных размеров главного лепестка диаграммы направленности акустического преобразователя.

Необходимо отметить, что изделия с упрочненным поверхностным слоем являются слабонеоднородными средами, т. е. изменения указанных акустических параметров при упрочнении составляют несколько процентов. Поэтому требуется проведение высокоточных измерений, что далеко не всегда возможно в условиях производства. Ниже приведены результаты усовершенствования методик акустических измерений глубины слабонеоднородных упрочненных слоев методом гониометра и прохождения акустического сигнала.

Анализ акустического тракта и усовершенствование метода гониометра. При разработке настоящей методики было установлено, что реализация гониометрического метода традиционным путем дает недостаточно высокую точность в определении β_m . В частности, традиционный метод измерений имеет недостаточно высокую точность установки угла, которая обусловлена не механическим фактором (например, мертвым ходом механизма наклона и перемещения преобразователей), а прежде всего ходом зависимости функции амплитуды $P_A(\beta)$ отраженной волны в окрестности угла экстремума $\beta_m \pm \Delta\beta$, т. е. должным образом не обеспечивается «острота» экстремума функции, характеризуемого производной $dP_A/d\beta$ или функцией девиации $\varepsilon = \Delta P_A(\Delta\beta)/P_0$. При этом ε может быть представлена в виде:

$$\varepsilon = 1 - \cos\Delta\beta F_2 \left(\frac{\alpha_i}{\lambda}, \frac{\alpha_i^2}{\lambda R_i}, \dots \right), \quad (3)$$

$$= 1 - F_1 F_2 = 1 - F_{12},$$

где $F_1 = \cos\Delta\beta < 1$; $F_2 > 1$ – функция, характеризующая отклонение фронта акустического пучка от «идеального» и обусловленная не только длиной акустической задержки, но и неоднородностью

распределения смещений по поверхности излучающей пластины, длительностью импульса и другими факторами.

Из (3) следует, что для достоверного определения β_m необходимо уменьшить произведение F_{12} . При этом возможности уменьшения функции F_2 ограничены. Снижение F_{12} возможно за счет F_1 . Это достигается путем увеличения количества переотражений в системе «излучающий преобразователь – объект исследований – приемный преобразователь». При этом нужно обеспечить невозрастающий характер изменения функции F_2 . Понятно, что с увеличением количества отражений возрастает акустическая база L_A . Соответственно возрастают расходимость акустического пучка и функция F_2 . Желательно создать условия, при которых акустическая база лежит в пределах ближней зоны (зоны Френеля) $L_A < L_F = a/\lambda^2$, так, чтобы обеспечить слабую расходимость акустического пучка (a – радиус излучателя; λ – длина волны в иммерсионной среде) [3]. В случае многократных отражений функция F_1 имеет вид:

$$F_1 = F_1^n \approx (\cos\Delta\beta)^n.$$

Можно показать, что в случае, если акустический пучок имеет достаточно высокую направленность и однородность фронта ($F_2=1$), то

$$\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{n=1}} \approx \frac{1 - (\cos\Delta\beta)^n}{1 - (\cos\Delta\beta)^2} \approx n - 2.$$

Однако при некотором $n > n^*$ увеличение количества отражений приводит к снижению величины ε вследствие возрастания шумового фона и расхождения акустического пучка.

Предложенный способ измерения распределения амплитуды отраженной волны $P_A(\beta)$ при многократном переотражении акустического импульса от исследуемой поверхности объекта позволяет значительно повысить точность измерений. При этом акустический сигнал может приниматься излучающим преобразователем после отражения от рабочей поверхности симметрично установленно-го преобразователя либо от металлического отражателя. Выбор диаметра преобразователей $2a$ и расстояния L от поверхности преобразователя до области отражения производится из условия «малого расхождения» акустического пучка, т. е. диаграммы направленности. При реализации метода контроля были предприняты меры, направленные не только на поддержание слабой расходимости акустического пучка, но и на устранение шумового фона, что потребовало изменения пространственного положения преобразователей.

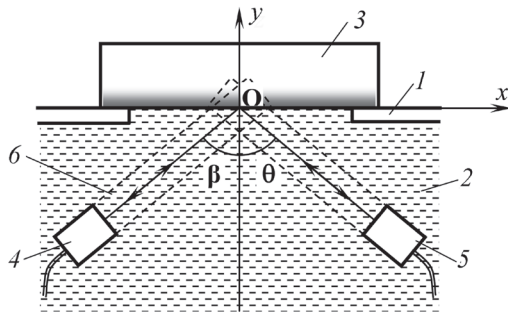


Рис. 1. Принципиальная схема устройства: 1 – опорная поверхность; 2 – иммерсионная среда; 3 – образец; 4 – излучающий преобразователь; 5 – приемный преобразователь; 6 – коромысла

Принципиальная схема устройства, реализующая предлагаемый способ измерений скорости поверхностной волны в твердых телах, показана на рис. 1.

На опорные поверхности окна ванны 1 с иммерсионной средой 2 (в качестве которой использован дистиллят) помещают исследуемый образец 3, обращенный к преобразователям 4 и 5 плоской (отражающей звук) поверхностью. В этой плоскости находится ось вращения излучающего звук преобразователя 4 и рефлектора 5 (совмещающего функцию приемника колебаний) и проходящая через точку O по оси y . С помощью специального привода (не показан) синхронно изменяется угол наклона опор преобразователей (или коромысел) 6. При этом угол падения акустического пучка на поверхность объекта β и угол отражения θ одинаковы.

Измерительные преобразователи соединены с источником и приемником электрических колебаний, с помощью которых осуществляется возбуждение и прием амплитуды n -кратно отраженного сигнала. В зависимости от условий при проведении измерений может быть использована термостатирующая система, позволяющая нивелировать влияние колебаний температуры внешней среды на скорость ультразвука в иммерсионной среде.

Для проведения измерений в камеру с иммерсионной средой устанавливают исследуемый объект на ограничивающие опоры, так что точка пересечения акустических осей преобразователей и рефлектора находится на исследуемой поверхности объекта. На излучающий преобразователь 4 подается импульсный сигнал от источника электрических колебаний, который преобразуется в акустический импульс и переотражается (рис. 1) в системе преобразователь 4 → объект 3 → преобразователь 5 и обратно. Сигнал, при котором зависимость амплитуды $P_A(\beta)$ в окрестности минимума становится более выраженной, принимает либо тот же

преобразователь 4 ($n = 4$), излучающий импульс, либо приемный преобразователь 5 ($n = 3$), совмещающий функцию рефлектора.

Путем изменения углового положения преобразователей с помощью прецизионного червячного механизма определяют угол β_m , обеспечивающий минимум амплитуды n -кратного отражения акустического сигнала, фиксируемого визуально или электронным образом на приборе, по данным которого определяется скорость поверхностной волны из формулы (2) (при этом обеспечивается угловое позиционирование преобразователя с погрешностью не хуже $\pm 1'$). Необходимо отметить, что предпринятые для измерительной процедуры меры позволяют более чем в 1,5 раза повысить точность определения β_m по сравнению с традиционным методом. Разработанное устройство дает возможность проводить статистическую обработку результатов измерений с целью повышения точности. Кроме того, проводится коррекция результатов по данным измерения скорости звука в иммерсионной жидкости. Преобразователи изготовлены на диапазон частот $f = (1,1 - 10)$ МГц.

Результаты экспериментального исследования метода. В качестве образцов отражателей (с неоднородным слоем) использованы стальные

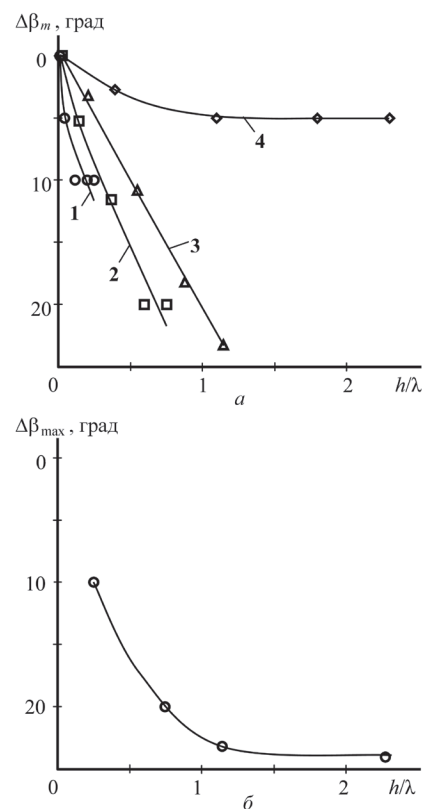


Рис. 2. Зависимость отклонения угла минимума отражения $\Delta\beta_m$ от безразмерной глубины h/λ образца с центрированным слоем (a) и максимальное отклонение критического угла (b); $a - f = 1,1$ МГц (1); 3,3 (2); 5 (3); 10 МГц (4); $b - h = 1,35$ мм = const

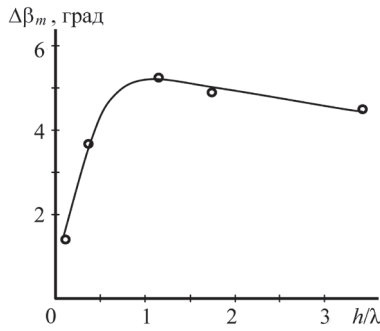


Рис. 3. Отклонение угла минимума отражения $\Delta\beta_m$ для чугуна со слоем отбела

образцы, имеющие толщину цементированного слоя h , изменяющегося от нуля до 1,5 мм, а также со слоем, закаленным ТВЧ толщиной от нуля до 1,8 мм. Дополнительно были изготовлены чугунные образцы с отбелом – толщиной слоя до 2,5 мм. Необходимо отметить, что при упрочнении слоя после цементации происходит уменьшение как модуля Юнга, так и плотности металла. Кроме того, в отличие от образцов, закаленных после цементации и ТВЧ, для которых $\{\Delta E; \Delta \rho\} < 0$, для образцов с отбелом $\{\Delta E; \Delta \rho\} > 0$.

На рис. 2 показаны полученные экспериментально функции изменения сдвига угла экстремума амплитуды отраженного сигнала $\Delta\beta_m(h/\lambda)$ в частотном диапазоне $f = (1,1 - 10)$ МГц. Полученные функции представляют собой монотонно убывающие зависимости, причем их «крутизна», характеризуемая абсолютной величиной $d\beta_m/d(h/\lambda)$, и являются убывающими функциями от h .

Если же глубина упрочненного слоя – фиксированная величина, то зависимость $\Delta\beta_m$ от частоты (или от обратного значения относительной длины волны) представляет собой также монотонно убывающую функцию, выходящую на насыщение в окрестности $(h/\lambda) \approx 1,0 - 1,1$. Если же в качестве объекта исследования используются образцы со слоем отбела (рис. 3), то подобная зависимость имеет максимум. Полученные результаты показывают возможность проведения контроля указанным методом не только глубины слоев отбела, но и закаленных после цементации или ТВЧ.

Возможности измерения глубины упрочненного слоя методом прохождения. Установлено, что с увеличением глубины отбеленного слоя (вплоть до некоторых граничных значений h^*) измеряемая скорость ультразвука является возрастающей функцией h . В случае же упрочненных слоев на стальных изделиях (закалка после цементации или ТВЧ) тенденция изменения функции $C_R(h)$ обратная, о чем свидетельствуют данные, приведенные на рис. 4, 5.

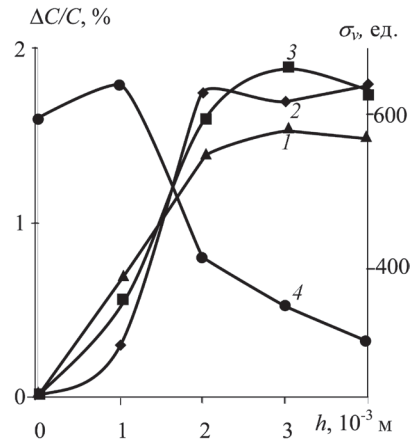


Рис. 4. Зависимость скорости поверхностной волны (1, 2, 3) и твердости закаленного слоя (4) от глубины его среза: 1 – $f = 1$ МГц; 2 – 1,8; 3 – 4 МГц

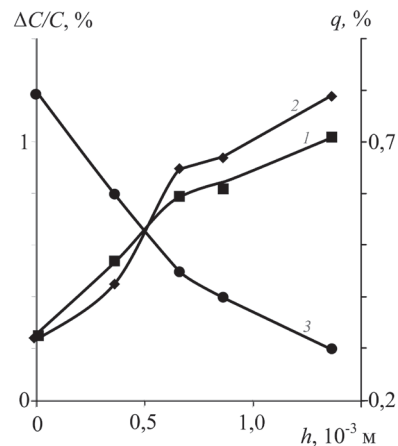


Рис. 5. Зависимость скорости поверхностной волны (1, 2) и концентрации углерода (3) от глубины среза цементированного слоя: 1 – $f = 1,8$ МГц; 2 – 3,0 МГц

Зависимости, приведенные на рис. 4, получены на образцах после поверхностной закалки. В процессе измерений закаленный слой постепенно снимался (шлифованием) на глубину h_C . Соответственно твердость поверхности σ_v также монотонно падала с увеличением глубины среза. Из рисунка видно, что скорость рэлеевской волны плавно и монотонно возрастает с увеличением глубины среза упрочненного слоя. При этом изменение скорости C_R тем больше, чем выше частота волны. Как известно, такой характер изменения функции $C_R(h_C)$ обусловлен тем, что с увеличением твердости упрочненного слоя происходит уменьшение его упругих констант. При этом упругая волна распространяется в слое с «размазанными» упругими константами. Но поскольку изменения упругих свойств в результате упрочнения небольшие, то в первом приближении можно считать, что структура волны (ее форма и распределенное смещение по глубине) не претерпевает существенных изменений.

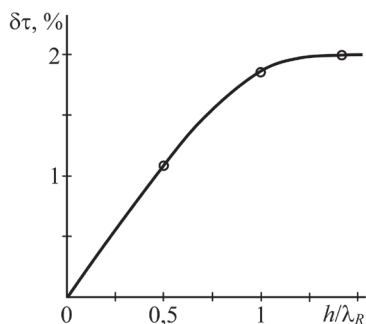


Рис. 6. Зависимость относительного изменения времени распространения волны Рэлея от относительной толщины закаленного слоя

Интересно отметить, что в исследованных образцах, со слоем, закаленным ТВЧ, твердость σ_v имеет максимум на некоторой характерной глубине $h_C = h_C^*$. Как видно, с ростом частоты зондирующей волны параметр $|\Delta C/\Delta h_C|$ уменьшается в окрестности максимума σ_v , а при приближении к области, граничащей с «сырой» основой металла, наблюдается обратная тенденция. Таким образом, изменяя частоту звуковой волны, возможно локализовать область взаимодействия упругих возмущений в слое и получить данные о некоторых интегральных параметрах структуры и механических свойствах металла. По-видимому, при воздействии зондирующего сигнала в достаточно широком диапазоне частот представится возможным оценить не только глубину упрочненного слоя, но и его структурные изменения по глубине.

Приведенная на рис. 5 зависимость показывает возможности ультразвукового метода применительно к определению качества цементации поверхностных слоев металла. Как видно из рисунка, для двух частот $f = 1,8$ и $3,0$ МГц функция скоро-

сти ультразвука от глубины среза h_C представляет собой возрастающие зависимости, подобные исследованным при ТВЧ-закалке. Как в предыдущем, так и в данном случае причиной такого хода кривой $C(h_C)$ является изменение упругих свойств слоя по глубине, обусловленное структурными превращениями. Изменение структуры при закалке сопровождается уменьшением упругих констант, определяющих величину скорости рэлеевской волны:

$$C_R = \frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \mu)}}, \quad (4)$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; ρ – плотность материала.

На рис. 6 приведена зависимость, позволяющая по изменению временного интервала распространения упругой волны по постоянной измеряемой базе оценить качество закалки.

Полученные экспериментальные данные показывают высокую эффективность применения ультразвуковых методов для оценки структуры чугуновых и стальных изделий. На основании данных измерений скорости различных мод упругих колебаний может быть произведена оценка структуры и прочностных свойств серого чугуна. Установленные зависимости между скоростью звука и структурой упрочненных слоев, полученных цементацией и ТВЧ-закалкой, позволяют в ряде случаев упростить процесс оценки качества закаленных изделий и перейти от методов металлографии к неразрушающему контролю. При этом может проверяться 100% изделий и не осуществляться оценка качества всей партии по образцам-свидетелям.

Литература

1. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. М.: Металлургия, 1991.
2. Приборы для неразрушающего контроля качества материалов и изделий: Справ. / Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1976.
3. Гурвич А. К., Кузьмина Л. И. Справочные диаграммы направленности ультразвуковых дефектоскопов. Киев: Техника, 1980.
4. Коновалов G., Мауров A., Прохоренко P. The Systems for Automated Ultrasonic Testing // 7th European Conference on NDT. Copenhagen, 1998.