

In the report perspective methods of diagnostics of surface layers state of products after various technological processes (a face hardening by means of induction or after cementation, coating) are viewed. The testing is carried out to geometrical attributes (thickness of a layer) and presence of flaws. The offered methods of measuring allow making the test in a work cycle of products manufacture.

А. Р. БАЕВ, Г. Е. КОНОВАЛОВ, А. Л. МАЙОРОВ, ГНУ «ИПФ НАН Беларуси»

УДК 621.179

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ С МОДИФИЦИРОВАННЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ

Одним из важных аспектов повышения износоустойчивости, прочности и долговечности широко спектра металлоизделий, а также ресурсо- и энергосбережения является использование прогрессивных технологий обработки поверхности в сочетании с эффективными методами неразрушающего контроля. В зависимости от условий эксплуатации, требований к надежности и долговечности металлоизделий проводится модифицирование поверхности различными способами, включая ТВЧ-закалку, цементирование, азотирование, лазерное упрочнение, нанесение защитных слоев. При наладке технологического процесса обработки поверхности и его мониторинге в производственном цикле требуются высокопроизводительные и надежные методы и средства неразрушающего контроля механических свойств поверхностного модифицированного слоя (твердость, износоустойчивость, упругие модули, глубина модифицированного слоя δ). При нанесении же защитных покрытий необходимо обеспечить их заданную толщину h и сцепление с основой. Для решения указанных выше актуальных производственных задач применение традиционных подходов не всегда эффективно. В ИПФ НАН Беларуси разработаны новые методы и средства ультразвукового контроля, основанные на наличии корреляционных связей между параметрами ультразвукового сигнала (скорость ультразвуковой моды C_s , изменение амплитуды P_A и формы импульса) и параметрами модифицированного поверхностного слоя – физико-механическими, структурными, геометрическими, а также степенью дефектности.

Контроль упрочняющих покрытий, выполненных термической или химико-термической обработкой

Контроль стальных или чугунных изделий состоит в том, что в качестве базового измеритель-

ного параметра упругой волны, хорошо коррелирующего с твердостью B и глубиной упрочненного слоя δ металлоизделия, используется скорость поверхностной $C_{ПАВ}$ или объемных-поперечной вертикально поляризованной C_T или продольной C_L моды, измеряемые на разных частотах f . Необходимо отметить, что по отношению к прочностным и эксплуатационным свойствам упрочненный поверхностный неоднородный слой можно считать «сильнеоднородным» (эти величины в слое с глубиной среза изменяются в несколько раз), а по отношению к упругим параметрам (модуль Юнга E и сдвига G), а также плотности ρ и скорости C упругой волны – «слабонеоднородным», поскольку их реальные изменения по глубине слоя h составляют не более 6–8% для E и G и не более 2–3% для C и ρ . В случае, когда зондирование объекта производится поверхностной волной, ее основная энергия сосредоточена в приповерхностном слое металла толщиной, примерно равной длине волны $\lambda_{ПАВ} = C_{ПАВ}/f$ и, согласно предложенной нами модели, скорость поверхностной волны (ПАВ) может быть получена на основе выражения:

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

где μ – коэффициент Пуассона; величина эффективного модуля Юнга E^* и эффективная плотность материала ρ^* определяются из закона аддитивного вклада плотностей ρ и обратных модулей Юнга E^{-1} элементарных слоев упрочненного материала, неравномерно распределенных по глубине слоя, с учетом «коэффициентов парциального вклада» $\varepsilon(h) \sim U(h)$ (U – плотность акустической энергии в волне).

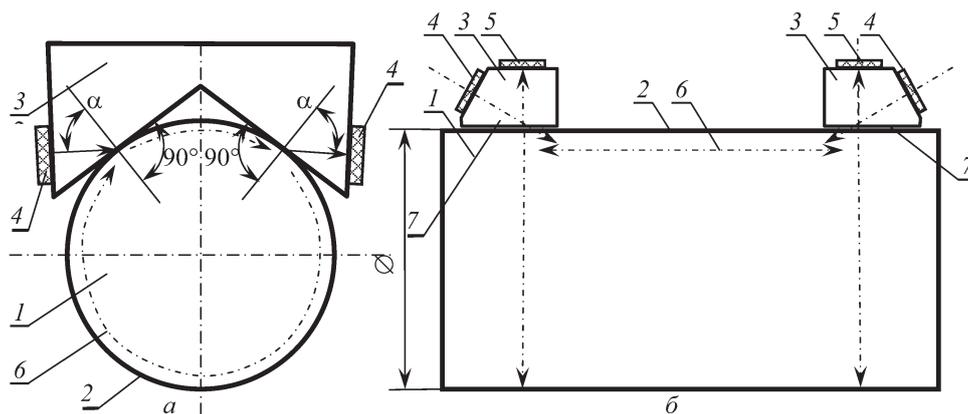


Рис. 1. Пример построения измерительных схем для оценки глубины закаленного слоя: *a* – при прозвучивании по окружности; *б* – при прозвучивании вдоль образующей; 1 – контролируемое изделие; 2 – закаленная поверхность; 3 – первичный преобразователь; 4 – основной пьезоэлемент; 5 – дополнительный пьезоэлемент; 6 – область распространения неоднородной упругой волны (тип волны определяется задачей измерений и глубиной закаленного слоя); 7 – область акустического контакта

Исследования показали, что, зная характер изменения скорости поверхностной волны от частоты и решая обратную задачу, представляется возможным «восстановить» распределение твердости по глубине упроченного слоя. При достаточно больших глубинах упроченных слоев ($h > 5-6$ мм) рекомендуется использовать объемные моды упругих волн – подповерхностные, продольные и поперечные.

В качестве примера на рис. 1 приведены схемы контроля упроченного слоя объектов с цилиндрической поверхностью, различающиеся по способу прозвучивания с помощью поверхностных волн или объемных мод. Применение этих схем и зондирующих объект мод зависит от глубины слоя и особенностей технологии упрочнения.

Практическая реализация описанного метода измерений стала возможной благодаря совершенствованию конструкции первичных преобразователей, разработке специальной аппаратуры и программного обеспечения. Это позволило добиться в условиях производства измерения толщины упроченных слоев от 0,5 до 6 мм с точностью не хуже 20% в диапазоне толщин 0,5–1,5 мм и порядка 10% в области более толстых слоев. Индикатор может быть использован для различных поверхностей – на плоскости, на цилиндрической поверхности, в канавках, на радиусных переходах – при использовании специальных преобразователей. Прибор является простым в использовании и не требует длительного обучения и высокой квалификации персонала в области неразрушающего контроля. Прибор позволяет при необходимости производить сплошной контроль, поскольку время на одно измерение составляет не более 1 мин. К настоящему времени разработан опытный экзем-

пляр прибора без персонального компьютера, работающий в едином блоке.

Контроль толщины покрытий и расслоений двухслойных материалов волнами Лэмба

В случае, когда на металлоизделие наносится упрочняющий слой другого материала, возникают задачи, связанные с определением толщины защитного слоя и качеством сцепления материалов. В качестве одного из примеров рассмотрим контроль тонкостенных двухслойных материалов. Объектом исследования являются радиаторы большегрузных автомобилей с нанесенным на латунную основу защитным покрытием – припоем типа ПОС, толщина которого h регламентирована и допускает отклонения не более ± 5 мкм. Анализ традиционных методов контроля h , включая индуктивные, ультразвуковые, радиографические, показал их неэффективность из-за особенностей сочетания физических свойств контактирующих материалов и геометрии изделия.

Установлена зависимость (рис. 2) скорости распространения s_0 моды волны Лэмба от толщины покрытия таких двухслойных объектов и его дефектности.

Из исследований зависимости C_{s_0} от h_n установлено, что расхождение между данными эксперимента и расчета находится в пределах погрешности измерений. Необходимо отметить, что наибольшая чувствительность измерений достигается для малых толщин покрытий. В диапазоне от нескольких мкм до 10 мкм погрешность измерений составляет 0,2–0,3 мкм. Полученные данные говорят о хорошем количественном соответствии, необходимом для проведения надежного контроля в технологическом процессе изготовления изделия.

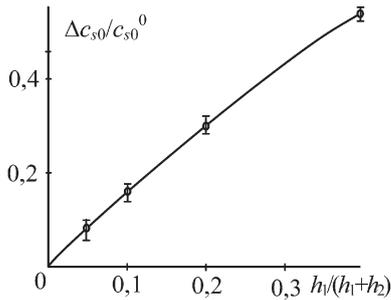


Рис. 2. Влияние толщины покрытия на скорость s_0 моды

Предложенный метод позволяет измерять не только толщину покрытия, но и размеры областей несцепления материалов. Суть измерений заключается в последовательном прозвучивании участков объекта волнами Лэмба и измерении времени распространения сигнала. Если на некотором участке пластины длиной L и шириной d имеется i протяженных зон длиной l_i с отсутствием сцепления, время распространения волны в основе $t_2=L/C_{s0}^0$, а через двухслойную пластину t_{nj} , то выражение для оценки площади несцепления материалов имеет вид

$$\Delta S = \sum_{i=1}^j \Delta S_j = jd \frac{(C_{s0}^0 + C_{s0})}{C_{s0}^0 C_{s0}} t_2 \sum_{i=1}^j \left(\frac{t_{nj}}{t_2} - 1 \right).$$

Ультразвуковой контроль качества сцепления биметаллов в подшипниках скольжения

Использование традиционных методик контроля баббитовых подшипников скольжения имеет ряд недостатков. Во-первых, согласно традиционным методикам, способ ввода (приема) ультразвука в объект – контактный, что предполагает «адаптацию» или сопряжение рабочей поверхности преобразователя с контактной поверхностью. Соответственно при контроле изделий разной кривизны существенно снижаются производительность и надежность контроля. Во-вторых, на качестве контроля сказывается наличие чугуновой или латунной основы подшипника из-за газовых пор в окрестности границы сцепления, создающих

шумовой фон. Если же апертура излучающего элемента преобразователя больше дефекта расслоения, оценка площади дефекта затруднительна, что связано с особенностями интерференции отраженных ультразвуковых сигналов.

Нами разработан высокочувствительный способ контроля качества сцепления материалов, основанный на использовании особенностей отражения ультразвука от неоднородной границы, заключающийся в учете влияния фазового сдвига на формирование поля отраженных мод поверхностных и объемных волн. Одно из ультразвуковых устройств, реализующих предложенный способ, представлено на рис. 3. Особенность разработанной методики состоит в использовании специального раздельно-совмещенного преобразователя с иммерсионным вводом ультразвука. В качестве опорного используется сигнал, отраженный от поверхности баббита, величина которого регулируется с помощью установочных винтов, что позволяет существенно стабилизировать акустический тракт и обеспечить разрешение сигналов, отраженных от дефектов основы (латунной, чугуновой). Фиксация дефекта и оценка его площади производится не по увеличению амплитуды сигнала (традиционная методика), а по его уменьшению по отношению к опорному сигналу.

Отметим, что применение предложенной методики и технических средств позволяет производить контроль качества сцепления с основой на острых кромках «ласточки хвоста».

Поиск дефектов проводят возвратно-поступательным перемещением (сканированием) преобразователя со скоростью 5–30 мм/с с шагом, не превышающим $0,5D$, где D – линейная ширина области пересечения диаграмм направленностей пьезопластин раздельно-совмещенного преобразователя в направлении шага сканирования. Фиксация дефекта некачественного сцепления материалов производится по максимальному изменению отношения $\varepsilon = P_{\delta c} / P$, где $P_{\delta c}$ – амплитуда отра-

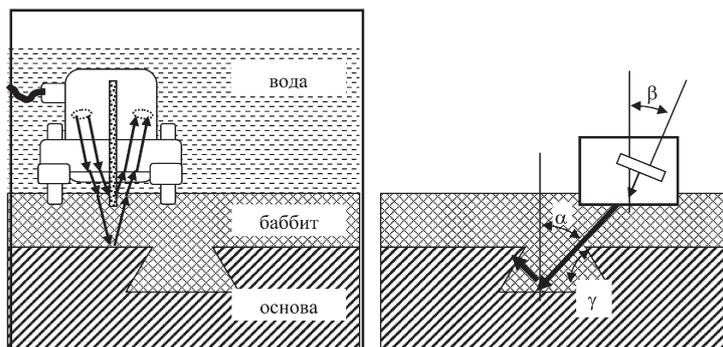


Рис. 3. Схема ультразвукового контроля качества сцепления границы раздела «баббит-сталь» вершины и впадины «ласточки хвоста» подшипников скольжения

женного от границы сред сигнала. Настройка работы аппаратуры осуществляется на специально выполненных стандартных образцах предприятия с плоскодонными отверстиями. Установлено, что чувствительность предложенного метода в 2–3 раза выше стандартного и составляет $1,5 \text{ мм}^2$, что, как упоминалось, обусловлено эффектом интерференции двух пучков ультразвука, отраженных от дефектной и недефектной границ и имеющих фазовый сдвиг между ними, близкий к π .

Благодаря реализации предложенного способа ввода-приема ультразвука в 3–4 раза повышается производительность и надежность контроля и представляется возможным производить измерения на объектах с радиусом кривизны 2,5–1000 см одним преобразователем. Впервые предложена также методика контроля сцепления наклонной поверхности «ласточкиного хвоста». В этом случае в кон-

струкцию отдельно-совмещенного преобразователя внесены изменения, он работает как наклонный преобразователь с жидкой призмой. При этом угол падения ультразвука в плоскости разделительной перегородки β выбран из условия, при котором акустические лучи падают на боковую грань «ласточкиного хвоста» под прямым углом, т. е. продольная ультразвуковая волна трижды отражается от зоны ожидаемого брака, когда $\beta = \arcsin(C_{\text{ж}} \cos \gamma / C_1)$, где γ – угол между гранями «ласточкиного хвоста». При определенном положении преобразователя относительно границы с разным качеством сцепления материалов наблюдается существенное падение сигнала (16–20 дБ), т. е. также реализуются оптимальные условия сложения (интерференции) акустических пучков мнимых источников ультразвука, отраженных от неоднородной границы.

Литература

1. Неразрушающий контроль. Россия 1900–2000 гг.: Справ. / Под ред. В. В. Ключева. М.: Машиностроение, 2001.
2. Крауткремер Й., Крауткрамер Г. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. М.: Металлургия, 1991.
3. Акустика слоистых сред / Л. М. Бреховских, О. А. Годин. М.: Наука, 1989.
4. Баев А. Р., Асадчая М. В. Особенности отражения акустического пучка от поверхности с неоднородными граничными условиями // Дефектоскопия. 2010. № 8. С. 3–17.