

А. Р. БАЕВ, д - р техн. наук, проф.

А. Л. МАЙОРОВ, канд. тех. наук

М. В. АСАДЧАЯ, канд. тех. наук, доц.

А. В. ВОРОБЕЙ

Н. Н. ГИЛЬ

Институт прикладной физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ УПРОЧНЯЮЩИХ СЛОЕВ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

Аннотация

Рассмотрены возможности повышения эффективности и информативности акустического контроля поверхностных слоев металлоизделий при изменении их структуры в результате направленной термической, химико-термической обработки, а также при наличии деградиационных процессов – развития микроповрежденности. На конкретных примерах показана эффективность применения разработанных средств для определения глубины упрочняемых слоев, а также решения обратной задачи - оценки степени микроповрежденности металла. На основе теоретического моделирования и экспериментальных данных изучена возможность восстановления пространственного распределения в упрочненном слое некоторых физико - механических свойств.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, поверхностный неоднородный слой, скорость поверхностных волн, микроповрежденность, упрочнение поверхности.

Установление на ранней стадии производства дефектности изделия методами неразрушающего контроля (НК) является важным направлением ресурсосбережения. В особенности, это касается способов контроля качества упрочнения поверхностного слоя (УПС) металлоизделий. При этом для изменения структуры металла используются технологии, в основу которых лежат термические и химико-термические методы, включая ТВЧ-закалку, цементацию, азотирование, лазерный отжиг, борирование и др. [1, 2]. С другой стороны, в процессе эксплуатации различных объектов, находящихся под воздействием переменных механических и термических воздействий, окислительно-восстановительных процессов, происходят деградиационные процессы, вызывая например, развитие микроповрежденности металла. Очевидно, что повышение эффективности НК указанных процессов весьма важно для обеспечения безопасной работы при эксплуатации различных объектов.

В настоящей работе рассмотрены некоторые пути решения ряда указанных задач на основе использования усовершенствованных акустических методик и средств измерений, в основе которых положены устойчивые корреляционные связи между физико-механическими свойствами (ФМС) металлоизделий, включая прочность, упругие модули, твердость и др., и акустическими свойствами. Необходимо отметить, что разработанные в Институте прикладной физики НАН Беларуси средства контроля свойств УПС металлоизделий, находят применение в машиностроении. Они основаны, преимущественно, на наличии в качестве базового информативного параметра скорости упругих волн, где наиболее предпочтительными для диагностирования свойств объекта являются поверхностные акустические волны (ПАВ), скорость которых C_R хорошо коррелирует с модулем Юнга E и твердостью B для значительного числа марок контролируемых металлов \, причем

$$C_R = (E/\rho)^{0,5} F(v),$$

где ρ и v - плотность и коэффициент Пуассона, а энергия этой моды локализована в поверхностном слое толщиной $h \sim \lambda_R = C f^{-1}$, где λ_R - длина ПАВ, а f - частота волны.

Особенность функционирования разработанных средств измерений заключается, прежде всего, в том, что повышение точности измерения скорости ПАВ для их приема служат малоапертурные преобразователи (МАП) с рабочей частотой $f=0,5 - 5$ МГц. При этом с объектом НК обеспечивается акустический контакт, подобный точечному контакту [3] и (или) длинной полосы, шириной $d < \lambda_R$ и длиной $l \gg d$, При этом площадь акустического контакта (пятна контакта) составляет несколько десятых мм². Внесенные существенные изменения в традиционную измерительную схему и программное обеспечение позволяют устранить влияние ряда случайных факторов, обусловленных особенностями распространения и приема ПАВ, включая применение компенсационного способа—измерений.

Последний реализуется путем двустороннего (оппозитного) прозвучивания контролируемой области слоя ПАВ с последующим их приемом двумя преобразователями и определением ее скорости согласно формуле

$$C_R = 0,5 L (\Delta\tau_{12} + \Delta\tau_{21})^{-1},$$

где $\Delta\tau_{12}$ и $\Delta\tau_{21}$ время распространения волны между двумя МАП в оппозитных направлениях.

В ряде случаев для создания постоянного прижима МАП к объекту контроля и удержания устройства используется специальная управляемая магнитная система, обеспечивающая надежную фиксацию положения устройства на объектах сложного рельефа. При этом поверхность контролируемого объекта может быть плоской, цилиндрической, зубчатой, в виде галтели, —винтовой—и другой формы. Проведенные в заводских условиях сравнительные испытания устройства, конструкция которого подобна представленной на рис. 1, показали, что при глубине h упрочнения $\sim 0,3$ мм и

более, выполненного ТВЧ закалкой, цементированием лазерным отжигом, погрешность измерений не превышает 20 %. В ряде случаев (например, прокатные валки), когда глубина упрочненного слоя превышает 4 - 5 мм зондирование объекта может быть осуществлена объемными волнами, используя, например, эффекты дифракции [4].



Рис.1 – Средства ультразвукового контроля глубины упрочняемых поверхностных слоев металлов термической и химико-термической обработкой

В случае, когда процесс упрочнения поверхности осуществляется в различных режимах, то может изменяться не только глубина упрочненного слоя, но и распределение твердости по высоте - $B(z)$. В частности, это касается наличия у объекта обезуглероженного слоя. (Отметим, что в соответствии с заводскими Техническими условиями глубина УПС определяется параметрами твердости B^* или бальности зерна b_a , фиксируемыми на характерной глубине $z=\delta$).

Весьма важно, что согласно экспериментальным данным работ сотрудников НПО-ЦНИИТМАШ", г. Москва, и полученным нами, для упрочняемых металлов характерна практически линейная зависимость, связывающая изменение скорости УЗК и твердости материала:

$$\Delta C = C_0 - C(z) \sim \Delta B = B_0 - B(z),$$

где индекс 0 соответствует координате поверхности $z = 0$.

Благодаря этой связи, было проведено моделирование процесса распространения ПАВ не только для оценки глубины УПС, но и выявления пространственного распределения твердости по глубине слоя, используя формулу Оулдера [5]:

$$\Delta C(C_0)^{-2} \sim \int_{-\infty}^0 (-\Delta w^2 \Delta \rho u_i^* u_i + u_{i,j}^* u_{k,l} \Delta P_{ijkl}) F(z) dz, \quad (1)$$

где u_i и u_i^* – скорости смещений невозмущенной и возмущенной волны соответственно; w - абсолютное значение средней за период энергии

невозмущенной волны, переносимой через упругое полупространство единичной ширины; ΔP_{ijkl} - изменения упругих модулей, где $\{\Delta \rho, \Delta P_{ijkl}\} \sim F(z)$.

Хотя упрочнение объекта сопровождается изменением упругих свойств металла и его плотности, но т.к. $\{\Delta E/E, \Delta \rho/\rho\} \ll 1$, то вторым порядком малости пренебрегаем при расчете кривой $\Delta C(z)$. Отметим, что при моделировании переходных процессов используется программный пакет «COMSOL MULTY PHYSICS». Причем в этом случае профиль твердости УПС подобен ступеньке с различным углом наклона боковой стенки. При расчетах бралось опытное значение $\Delta C = 3 \%$

На рис. 2 и 3 представлены сравнительные данные эксперимента и теоретического моделирования особенностей влияния глубины среза слоя УПС стального образца на изменение скорости ПАВ. Там же представлена и кривая, характеризующая изменение величины твердости по глубине среза при ТВЧ закалки поверхности металлических образцов.

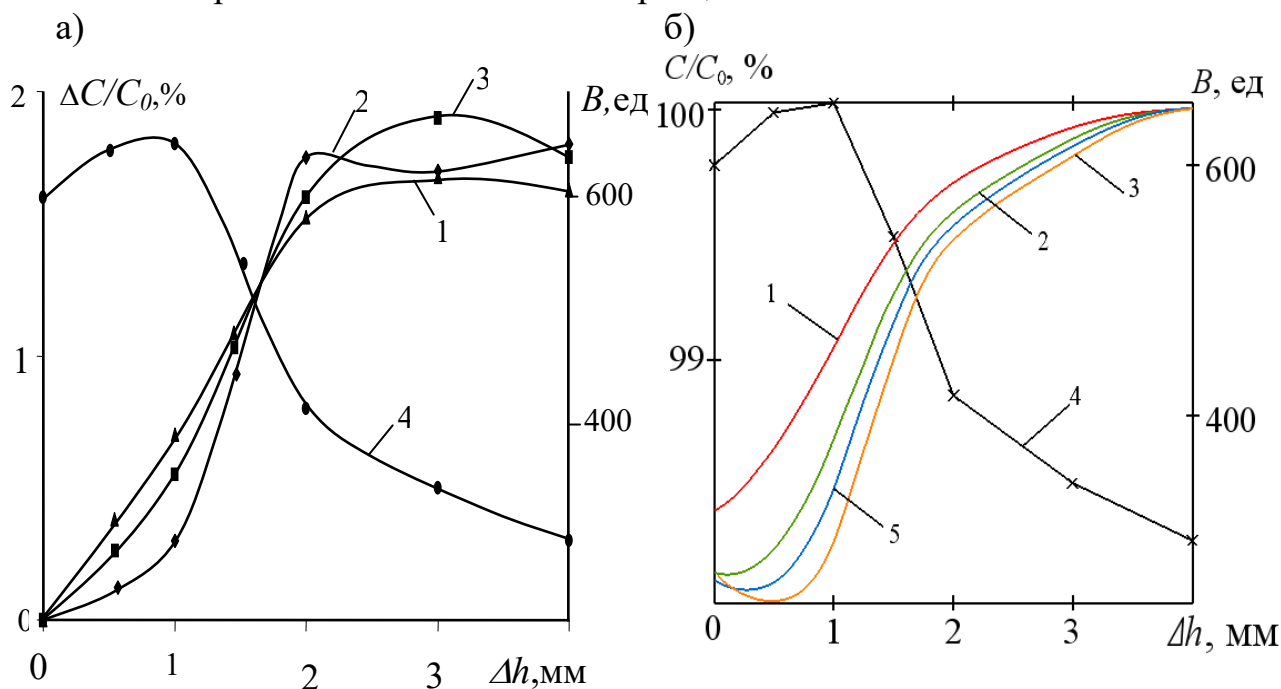


Рис. 2. Сравнительные данные экспериментальных исследований (а) и теоретического моделирования (б) влияния глубины среза Δh упрочненного ТВЧ закалкой слоя стального образца и частоты зондирующей волны на изменение скорости поверхностной волны: а) зависимости 1-3 - $\Delta C/C_0$, а 4 - твердость B на поверхности среза металла; f , МГц = 1 (1); 1,8 (2); 4 (3); 2,5 (5)

Опытные данные получены путем использования для приема пары МАП с шириной контактной поверхности $d = 0,3$ мм и расстоянием между ними $L = 43$ мм. Источником и приемником электрических колебаний служили блоки ультразвукового дефектоскопа, с выхода которого сигналы с обоих МАП проходили спектральную обработку на отдельном блоке с последовательным определением сдвига фаз φ_m между одинаковыми (по частоте f_m) гармониками в отсутствие и при наличии УПС. Синхронизация работы измерительных блоков и измерение временного интервала между приемными МАП для определения

скорости ПАВ производились с использованием измерителя временных интервалов И1 - 8.

Подробный анализ представленных опытных данных и теоретического моделирования свидетельствует о возможности восстановления твердости по глубине УПС с последующим уточнением его глубины и возможности эксплуатации конкретного объекта. Необходимо отметить, что в случае, когда эти измерения проводятся на одной оптимальной рабочей частоте, то для повышения точности измерений необходимо знание данных о твердости материала на поверхности объекта. Последняя может быть определена (по возможности) как обычными твердомерами, так и с помощью подобного используемому ультразвукового устройства, работающего на частоте f^* , превышающей рабочую частоту в 3 - 4 раза.

Разработанные средства и методика измерений успешно применена и для решения «обратной задачи». Так, в процессе эксплуатации объектов энергетики, машиностроения и др. в той или иной мере происходит деградация структуры металла в результате протекания окислительно-восстановительных процессов, а также воздействия переменных механических напряжений и температур. В частности, это касается микроповрежденности металла [6]. На рис. 3 представлена характерная зависимость изменения скорости ПАВ, измеренной в металлегиба паропровода с поврежденной микроструктурой по толщине стенки трубы с помощью специально разработанного устройства, где $\Delta C_R = C_{R,\infty} - C_{R,\Delta R}$.

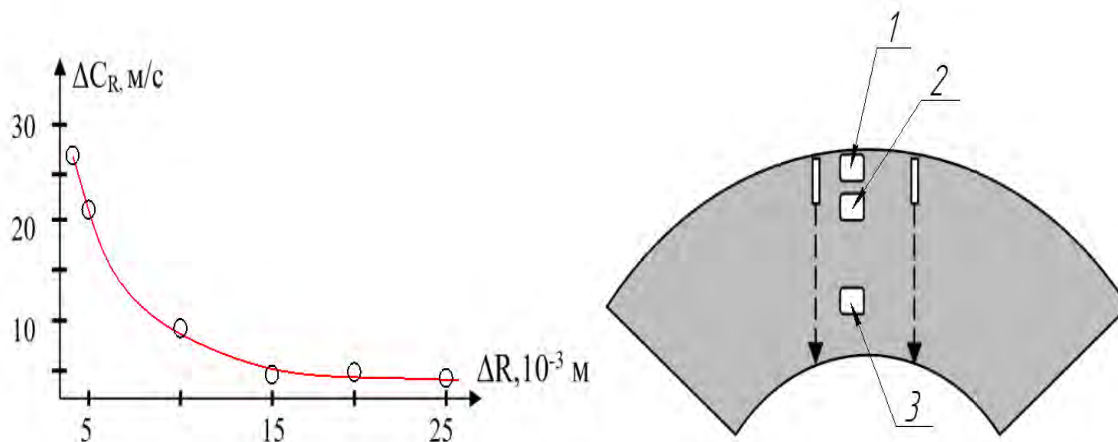


Рис. 3 - Схема измерений изменения скорости ПАВ: расстояние по радиусу от внешней поверхности трубы Δr , 3 - БАЛЛ 5 – цепочка пор; 8 - БАЛЛ 2 – отдельные цепочка пор; 25 - БАЛЛ 1 - поры отсутствуют

Прозвучиваниегиба паропровода производится поверхностными волнами и теневым способом, что используется в известной методике УралВТИ [6]. Однако, излучающий и принимающий ПАВ преобразователи являются наклонными, соединенными друг с другом гибкой связующей металлической лентой, обеспечивающей постоянную акустическую базу между ними. Отличие предложенной разработки от известной заключается в использовании как для излучения, так и приема ПАВ двух малоапертурных

преобразователей, что позволило обеспечить высокое качество акустического контакта и надежность измерений. Они позволяют оценить состояние структуры металла (дефекты поврежденности) в баллах – от БАЛЛА 1 (когда поры отсутствуют) до БАЛЛА 5, характеризуемого наличием в металле цепочек пор. Это устройство было апробировано с участием к.т.н. Филиппова К.А. и сотрудников Белглавэнерго (г. Минск) при определении технического состояния основного металла гибов паропроводов перегретого пара Гродненской ТЭЦ-2 и перепускных трубопроводов котлоагрегата ТГМП-344А ст. № 5 Минской ТЭЦ-4. Данные проведенных сравнительных испытаний с известной методикой УралВТИ показали неоспоримое преимущество предложенного варианта измерений степени микроповрежденности металла.

Как установлено, при проведении измерений с использованием предложенной разработки на гibaх паропроводов диаметром 133-325 мм и радиусом гiba от 0,5 до 1,3 м (длиной дуги гнутой части трубы до 2,2 м) в 2 - 3 раза повышалась производительность контроля, и существенно снижалась утомляемость при измерительных процедурах, а погрешность измерений времени прохождения пути ультразвуком, связанных с "человеческим фактором", включая качество акустического контакта, не превышала ± 15 ns, что составляло 0,05% при акустической базе 100 мм. В то время испытания аналога показали, что эта погрешность достигает $0,3 \div 0,5\%$.

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.28-31.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. - М.: Машиностроение, 2003. - Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов [и др.] –2003. – 864 с.
3. Дзенис, В.В. Применение ультразвуковых преобразователей с точечным контактом для неразрушающего контроля / В.В. Дзенис. – Рига, Знание, 1987. – 262 с.
4. Басацкая, Л.В. , Вopilкин, А.Ч. Измерение глубины закаленного слоя // Дефектоскопия. – 2005. – № 9. –С. 19–43.
5. Поверхностные акустические волны в неоднородных средах / Гуляев Ю.В [и др.]. Москва: Наука, 1991. - 10с.
6. Инструкция по дефектоскопии гибов трубопроводов из перлитной стали (И № 23 СД-80). М.: Союзтехэнерго, 1981. 40 с.

Контакты:

baev@iaph.bas-net.by (Баев Алексей Романович);
mayorov@iaph.bas-net.by (Майоров Александр Леонидович);
asadchaya@iaph.bas-net.by (Асадчая Мария Вадимовна);
vorobey@iaph.bas-net.by (Воробей Алексей Васильевич);
qill@iaph.bas-net.by (Гиль Николай Николаевич).