

А. Р. БАЕВ, д-р техн. наук, проф.

А. Л. МАЙОРОВ, канд. техн. наук

М. В. АСАДЧАЯ, канд. техн. наук

А. Ю. БУРНОС,

И. Е. ЗАГОРСКИЙ,

Институт прикладной физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДВУХПАРАМЕТРОВОГО СПОСОБА КОНТРОЛЯ ГЛУБИНЫ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Аннотация. Исследованы особенности совместного использования акустического и магнитного методов для неразрушающего контроля глубины упрочнения поверхностного слоя (УПС) стальных изделий. Показано, что в ряде случаев представляется возможным оценивать глубину УПС не только как «усредненную» характеристику скорости поверхностной ультразвуковой волны, определяемую акустической базой прозвучивания, но и локально – по данным остаточного магнитного поля, что позволяет выявить области материала с неоднородной структурой. Предложен способ и макет устройства для двухпараметрового контроля глубины упрочненного поверхностного слоя стальных объектов.

Ключевые слова: глубина УПС, скорость поверхностной волны, остаточное магнитное поле.

Повышение надежности неразрушающего контроля глубины упрочнения поверхностного слоя (УПС) стальных изделий путем ТВЧ закалки, цементирования, азотирования, лазерной обработки и др. термохимическими методами является актуальной задачей современного производства. В результате изменения структуры поверхностного слоя изменяются физико-механические, эксплуатационные свойства объекта. В большинстве случаев до настоящего времени контроль качества упрочнения производится разрушающими методами – по бальности зерна, твердости в сечении УПС и др. [1]. Анализ известных исследований показывает значительные перспективы использования именно акустических методов, например по данным скорости распространения поверхностной волны $C_{\text{ПАВ}}$ т.к. модуль Юнга E , скорость (ПАВ), плотность ρ и твердость T связаны соотношениями [2,3]:

$$C_{\text{ПАВ}} \sim (E/\rho), \Delta C_{\text{ПАВ}} = C_{\text{ПАВ}} - C_{\text{ПАВ},0} \sim \Delta T = T - T_0,$$

где индекс 0 характеризует твердость материала в отсутствие воздействия упрочняющих технологий.

С другой стороны, актуальной прикладной задачей является определение областей с поверхностно неоднородным упрочнением, характеризуемым изменением глубины УПС вдоль поверхности. Для этого может быть использован также акустический метод, подобный тому, что предложен нами в

работе [4] для структуроскопии чугунов по данным локального рассеяния продольных волн поверхностной структурой акустических импульсов. Однако для этого требуются специальные условия, затрудняющие измерения. Как показывает системный анализ традиционных способов измерений структуры поверхностных слоев сталей, для этого перспективно использование магнитных методов, например [5].

Методические особенности измерений

Ниже рассмотрены возможности и особенности использования преимущественно двухпараметрового контроля поверхностно упрочняемых ТВЧ закалкой и лазерным отжигом сталей, совмещая акустический и магнитный методы. Так, определение глубины УПС по данным скорости поверхностной волны $C_{ПВ}$ производится по данным времени прохождения ПАВ между двумя малоапертурными ПЭП с магнитным прижимом на рабочих частотах 1,8 – 4 МГц: $\Delta t = L(t_2 - t_1)$. Измерение же скорости УЗК производится с точностью 0,3-0,5% согласно изложенной в работе [2] методики. Определение индукции остаточного магнитного поля B_{oc} на стальных образцах выполняется по методу «отрыва» [3,4] с использованием разработанного в ИПФ НАН Беларуси измерителя магнитных полей ИМП-1.2 с погрешностью измерений не более 3%, а также локально намагничивающего образца устройства, где в качестве первичного источника использован цилиндрический стальной стержень с расположенными на его торцах самарий-кобальтовыми магнитами, поляризованными в одном направлении. Нормальная составляющая поля намагничивающего устройства, измеренная на расстоянии 0,5 мм от него, составляет $B_n = 275$ мТл. В качестве объекта исследований использованы образцы с ТВЧ закалкой и полученные лазерной обработкой при наличии поверхностного среза металла и без него. Причем в первом случае использованы плоские образцы с однородно упрочненной поверхностью, превышающие размер акустической базы измерительного ПЭП, составляющей 43,2 мм. А во втором случае упрочняемые лазерной обработкой «дорожки» выполнены длиной 70 мм, шириной 9-10 мм и разной глубиной на стальной плите в виде ленты.

Исследование влияния глубины упрочнения сталей на их акустические и магнитные параметры

На основе разработанной методики и средств измерений получены новые данные, касающиеся повышения надежности и расширения возможности контроля упрочнения сталей (преимущественно ТВЧ закалкой и лазерной обработкой) как акустическим, так и двухпараметровым методом, используя дополнительно данные об индукции остаточного магнитного поля B_{oc} . Основные результаты исследований отображаются на рис.1–2, где сопоставляются данные о глубине УПС h , полученные металлографическим (разрушающим) методом, и данные, полученные в результате акустических и магнитных измерений. Причем на рис.1 представлены характерные

зависимости влияния глубины упрочняемых слоев ($h_y = 0 - 1,5$ мм) и глубины среза ($h_c = 0 - 4$ мм) на изменение скорости УЗК ΔC и величину индукции остаточного магнитного поля B_{oc} в образцах из стали Ст45, подвергнутых ТВЧ закалке разной интенсивности и времени воздействия. Подобные зависимости имеют место и в случае, когда упрочнение поверхности изделия происходит под воздействием потока высокоинтенсивного лазерного излучения. Результаты исследования образцов сталей разных марок, подвергнутых лазерному воздействию, поверхности которых имеют вид дорожек, приведены на рис.2. Там представлены данные сравнения глубины УПС, определенной металлографическим и акустическим методами - причем образец (рис.2а) был подвергнут намагничиванию с последующим измерением B_{oc} .

При анализе результатов исследования взаимосвязи акустических и магнитных свойств с глубиной упрочнения ТВЧ закалкой слоев (вариант I, рис.1а), а также высотой среза УПС (вариант II, рис.1б), в обоих случаях наблюдается изменение не только скорости ПАВ, но и остаточного магнитного поля B_{oc} . При этом для измеряемых физических параметров характерны следующие изменения – согласно двум вариантам исследований: вариант I - $\Delta C(h_y) = C_0 - C_y > 0$; $\Delta B_{oc}(h_y) = (B_{oc})_0 - B_{oc,y} < 0$; вариант II - $\Delta C(h_c) = C_0 - C_c < 0$; $\Delta B_{oc}(h_c) > 0$, где C_y и C_c - скорости ПАВ в зависимости от глубины УПС и среза поверхностного слоя, соответственно.

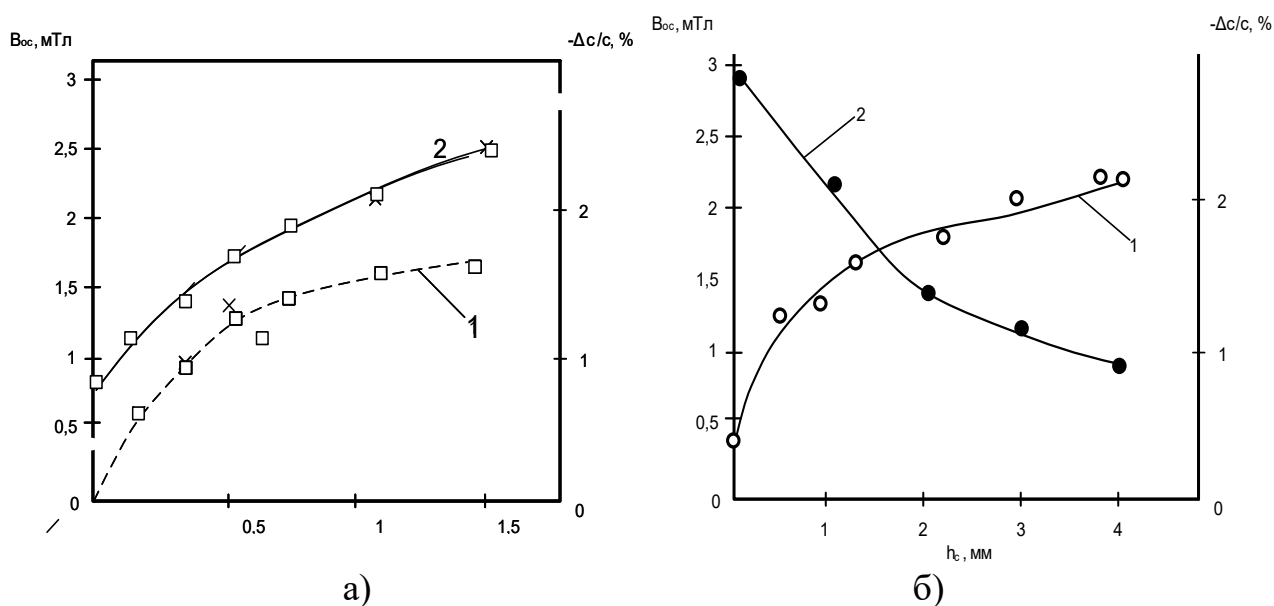


Рис. 1. Характерные зависимости влияния глубины упрочненного поверхностного слоя (а) и глубины среза УПС поверхностного слоя (б) на скорость поверхностной волны (1) и величину остаточного магнитного поля (2)

Как известно, увеличение твердости поверхностного слоя и его глубины при упрочнении сталей в процессе ТВЧ закалки, цементирования, лазерной обработки сопровождается уменьшением в слое модуля Юнга E и плотности ρ , что, в конечном счете, приводит к уменьшению скорости УЗК. При этом предполагается, что увеличение толщины слоя УПС и объема мартенситной

фазы приводит к росту поля зеркально отображаемых магнитных зарядов или росту остаточной индукции B_{oc} . Одновременно возрастает и твердость слоя, что сопровождается уменьшением скорости ПАВ. Очевидно, что при срезе слоя УПС будет наблюдаться обратная тенденция, что и имеет место на практике. Т.о., увеличение глубины упрочненного ТВЧ закалкой слоя или глубины его среза сопровождается изменением скорости ПАВ и индукции нормальной составляющей остаточного магнитного поля B_{oc} в оппозитных направлениях.

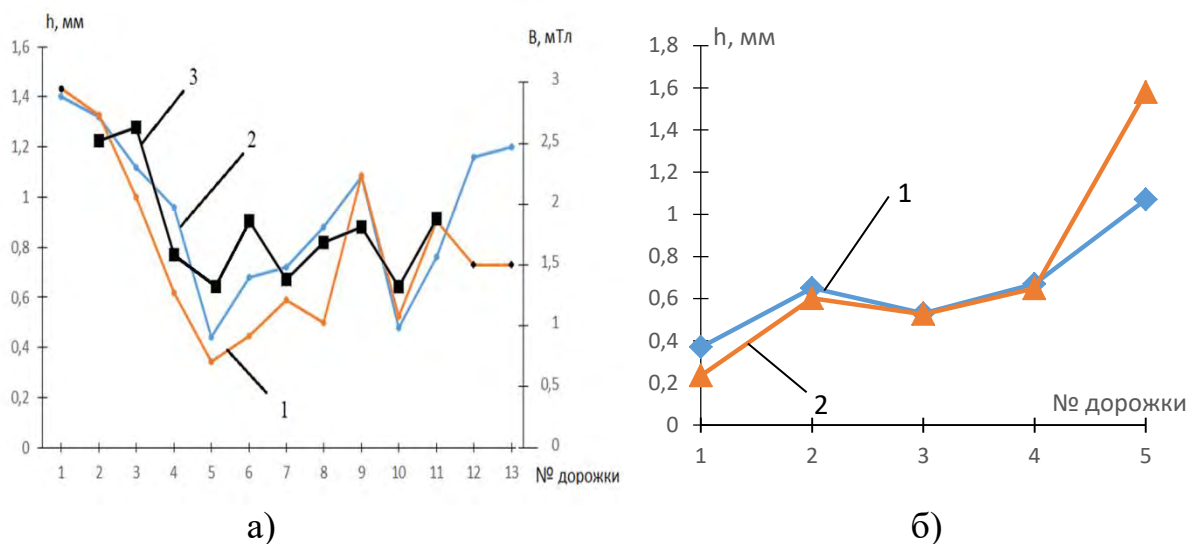


Рис. 2. Глубина упрочненного лазерной обработкой слоя, измеренная акустическим, металлографическим и магнитным методом, на разных «дорожках» (зонах поверхности образца, полученных при варьировании интенсивности и времени упрочнения): а) сталь 65Г: 1 – акустический метод, 2 – металлографический метод, 3 – величина нормальной составляющей магнитного поля остаточной индукции; б) сталь 7ХЗ: 1 - металлографический метод, 2 - акустический метод

Важно отметить, что приведенные на рис. 1а данные указывают и на то, что при ТВЧ обработке именно в диапазоне небольших глубин УПС $h^*=0,5-0,6$ мм наблюдается наиболее высокая чувствительность к их изменению при использовании именно магнитного метода, если учесть, что погрешность измерения B_{oc} не превышает 3%. Оцененная же погрешность измерений акустическим методом глубины УПС по данным изменения скорости ПАВ в указанном диапазоне h не менее 20%, что обусловлено такими факторами, как стабильность акустического контакта, влиянием дифракции и др. В то же время при характерных значениях высоты УПС $h>h^*$ наблюдается резкое уменьшение магнитного параметра $\varepsilon_{Bh}=dB_{oc}/dh$, обусловленное особенностями хода кривой намагничивания УПС от h .

Подобный результат может иметь место и для других марок сталей, упрочняемых лазерной обработкой, что подтверждается данными на рис. 2а, где упрочнению подвергнута сталь 65Г. Интересно, что именно в этом случае наблюдается неплохая корреляция между величиной магнитного параметра и глубиной УПС, изменяющейся в диапазоне $h=0,6-1,2$ мм.

Устройство для двухпараметрового контроля поверхностного упрочнения сталей ТВЧ закалкой

Учитывая необходимость одновременного использования как магнитного, так и акустического способа для повышения надежности контроля качества УПС, был предложен способ и базовый макет устройства для двухпараметрового контроля глубины упрочненного поверхностного слоя стальных объектов. Использование разработки направлено на расширение технических возможностей и повышение надежности контроля параметров УПС не только при ТВЧ закалке, но и при лазерной обработке стальных изделий, а также, как предполагается, и других способов упрочнения металлоизделий. Как видно из рис.3, устройство содержит наклонный ПЭП для излучения поверхностных волн и два малоапертурных преобразователя (МАП) для их приема, расположенные в корпусе, где посередине между ними размещено намагничивающее устройство и датчик Холла (рис.3б). Особенность намагничивающего устройства заключается в том, что магниты расположены по обеим сторонам от датчика Холла и поляризованы навстречу друг другу.

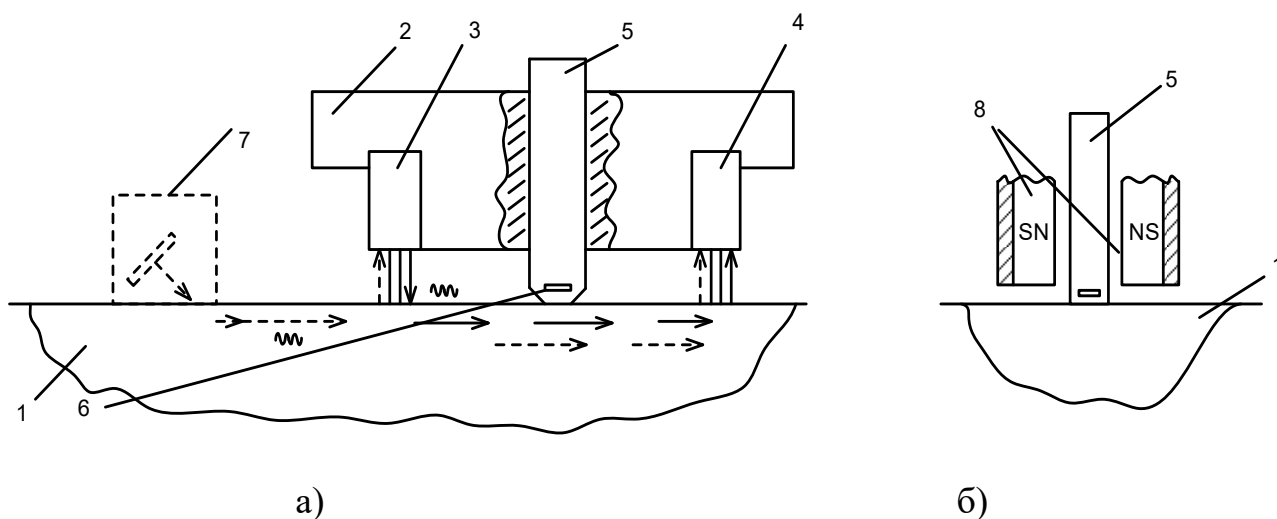


Рис. 3. Пример базовой схемы разработанного макета для двухпараметрового контроля глубины упрочненного поверхностного слоя стальных объектов: 1 – объект с УПС; 2 – корпус преобразователя; 3 и 4 – приемники ПАВ; 5 – корпус датчика Холла; 6 – датчик Холла; 7 – источник ПАВ; 8 – магниты с накладками

Величина индукции остаточного магнитного поля B_{oc} измеряется путем удаления источника намагничивающего поля из рабочего положения. Базовая схема разработанного макета для двухпараметрового контроля глубины УПС может быть использована как для объектов с плоской, так и криволинейной поверхностью, включая, прежде всего, цилиндрическую, путем прозвучивания вдоль образующей.

Таким образом в результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что одновременное использование магнитного и

акустического способов позволяет повысить надежность контроля качества УПС на стальных изделиях, полученных ТВЧ закалкой и лазерным упрочнением. Предложен способ и базовый макет устройства для двухпараметрового контроля глубины упрочненного поверхностного слоя стальных объектов.

Список литературы

- [1] Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. Т.3: Ультразвуковой контроль. / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге; под ред. чл.-корр. РАН В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
- [2] Баев, А.Р. Особенности распространения поверхностных и подповерхностных волн в объектах со слоистой структурой. Ч. 2. Упрочненный неоднородный поверхностный слой / А.Р. Баев, А.Л. Майоров, Н.В. Левкович, М.В. Асадчая // Приборы и методы измерений. - 2019. – Т. 10, № 1. - С.69-72.
- [3] Баев, А.Р. Способ ультразвукового контроля глубины закаленного слоя детали, выполненной из стали: патент РБ на изобретение № 23417/ А.Р. Баев, А.Л. Майоров, В.В. Парадинец, Н.Н. Гиль, Г.Е. Коновалов. опубл. 30.06.2021, офиц. бюлл. № 3, 2021.
- [4] Baev, A.R. Backscattering of Ultrasonic Waves as the Basis of the Method of Control of Structure and Physico-Mechanical Properties of Cast Irons / A.R. Baev, N.V. Levkovich, E.P. Babuk, M.V.Asadchaya // Devices and Methods of Measurements. – 2023. – Vol.14, no.3. – Pp.191-198.
- [5] Сандомирский, С.Г. Статистический анализ и использование взаимосвязей между физико-механическими свойствами сталей и чугунов / С. Г. Сандомирский ; Национальная академия наук Беларуси, Объединенный институт машиностроения. – Минск : Беларуская навука, 2021. – 147 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);
burnos@iaph.bas-net.by (Бурнос Артем Юрьевич);
lab1@iaph.bas-net.by (Загорский Иван Евгеньевич)