

УДК 620.179.16+54.1

## Особенности распространения поверхностных и подповерхностных волн в объектах со слоистой структурой. Ч. 2. Упрочненный неоднородный поверхностный слой

А.Р. Баев<sup>1</sup>, А.Л. Майоров<sup>1</sup>, Н.В. Левкович<sup>2</sup>, М.В. Асадчая<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

Поступила 04.01.2019

Принята к печати 28.02.2019

Распространение импульсного сигнала поверхностной волны по объекту с неоднородным поверхностным слоем, полученным, например, в результате поверхностного упрочнения, структурной поврежденностью, сопровождается дисперсией скорости волны, несущей важную информацию о параметрах такого слоя. Цель работы заключалась в изучении взаимосвязи между акустическими параметрами импульсного акустического сигнала поверхностной и подповерхностной волн и поверхностного слоя стальных образцов, упрочненных закалкой токами высокой частоты (ТВЧ), и серого чугуна, упрочненного отбелом.

Проведен краткий анализ известных работ по определению глубины упрочненных поверхностных слоев различными методами, включая ТВЧ закалку, цементацию и др. На основе интегрального выражения Оулдера. выполнен расчет зависимости, связывающей скорость волны, ее частоту, глубину упрочненного слоя и пространственное распределения твердости, представляемой в виде ступеньки с изменяющимся наклоном ее боковой поверхности, моделирующей переходную зону упрочненного слоя.

Импульсным методом с использованием малоапертурных преобразователей частотой 1–3,8 МГц получены зависимости скорости поверхностной волны от высоты среза упрочненного ТВЧ закалкой слоя. Проведенное сравнение данных эксперимента и расчетов теоретической модели показало хорошее качественное соответствие между ними, высокую «чувствительность» метода по отношению к характеру изменения твердости по глубине упрочненного слоя. Показана перспективность предложенного подхода для решения обратной задачи восстановления пространственного распределения твердости на основе данных эксперимента.

На стальных образцах и образцах серого чугуна апробирован метод гониометра для определения глубины упрочненного слоя по данным угла, соответствующего минимуму амплитуды отраженной волны или максимуму амплитуды возбуждаемой в образце поверхностной моды. Показано, что с увеличением толщины упрочненного ТВЧ закалкой слоя этот угол уменьшается на 24–26°, а глубина отбеленного чугуна на  $\approx 6^\circ$ . Даны рекомендации по использованию результатов исследований на практике.

**Ключевые слова:** поверхностные волны, упрочненный слой металла.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-1-69-79

**Адрес для переписки:**

А.Р. Баев  
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

**Address for correspondence:**

A.R. Baev  
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science  
of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

**Для цитирования:**

А.Р. Баев, А.Л. Майоров, Н.В. Левкович, М.В. Асадчая.  
Особенности распространения поверхностных  
и подповерхностных волн в объектах со слоистой структурой.  
Ч. 2. Упрочненный неоднородный поверхностный слой.  
Приборы и методы измерений.  
2019. – Т. 10, № 1. – С. 69–79.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-1-69-79

**For citation:**

A.R. Baev, A.L. Mayorov, N.V. Levkovich, M.V. Asadchaya.  
[Features of the Surface and Subsurface Waves Application  
for Ultrasonic Evaluation of Physicomechanical Properties of Solids.  
Part 2. Strenghtned Inhomogeneous Surface Layer].  
Devices and Methods of Measurements.  
2019, vol. 10, no. 1, pp. 69–79 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-1-69-79

# Features of the Surface and Subsurface Waves Application for Ultrasonic Evaluation of Physicomechanical Properties of Solids. Part 2. Strenghtned Inhomogeneous Surface Layer

A.R. Baev<sup>1</sup>, A.L. Mayorov<sup>1</sup>, N.V. Levkovich<sup>2</sup>, M.V. Asadchaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus

<sup>2</sup>Belarusian State University,  
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus

Received 04.01.2019

Accepted for publication 28.02.2019

## Abstract

The propagation of a pulsed signal of a surface wave over an object with a non-uniform surface layer, obtained, for example, as a result of surface hardening, with structural damage, is accompanied by the dispersion of the velocity of the wave carrying important information about the parameters of such a layer. The aim of the work is to study the relationship between the acoustic parameters of a pulsed acoustic signal of a surface and subsurface waves and the surface layer of steel specimens hardened by high-frequency hardening, and gray iron-chill. Features of the surface and subsurface waves application for ultrasonic evaluation of physicomechanical properties of solids. Strenghtned inhomogeneous surface layer.

A brief analysis of the known works on determining the depth of hardened surface layers by various methods, including high-frequency hardening, cementation, etc., is carried out. Based on the Oulder integral expression. The dependence connecting the wave velocity, its frequency, the depth of the hardened layer and the spatial distribution of hardness represented as a step with a changing slope of its side surface simulating the transition zone of the hardened layer are calculated.

Using the pulse method and low-aperture transducers with a frequency of 1–3.8 MHz, the dependences of the surface wave velocity on the cutting height of a layer hardened by HDTV hardening are obtained. A comparison of experimental data and calculations of the theoretical model showed a good qualitative correspondence between them, demonstrate a high «sensitivity» of the method in relation to the nature of the change in hardness over the depth of the hardened layer. It is shown that the proposed approach is promising for solving the inverse problem of restoring the spatial distribution of hardness based on experimental data.

The goniometric method was approbated to determine the dependence between amplitude-angle characteristics and depth of the surface steel layers hardened by high-frequency hardening and depth of hardened gray iron specimens layer – with chill. It is shown that the optimal angle corresponding maximum of excited surface wave amplitude in steel specimens is decreasing up to 24–26' vs. hardened depth layer. But when the tested specimens from cast iron this angle decreasing is nearly of 6°. Recommendations on the use of research results in practice are given.

**Keywords:** surface waves, hardened metal layer.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-1-69-79

---

### Адрес для переписки:

А.Р. Баев  
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

---

### Address for correspondence:

A.R. Baev  
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science  
of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

---

### Для цитирования:

А.Р. Баев, А.Л. Майоров, Н.В. Левкович, М.В. Асадчая.  
Особенности распространения поверхностных  
и подповерхностных волн в объектах со слоистой структурой.  
Ч. 2. Упрочненный неоднородный поверхностный слой.  
Приборы и методы измерений.  
2019. – Т. 10, № 1. – С. 69–79.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-1-69-79

---

### For citation:

A.R. Baev, A.L. Mayorov, N.V. Levkovich, M.V. Asadchaya.  
[Features of the Surface and Subsurface Waves Application  
for Ultrasonic Evaluation of Physicomechanical Properties of Solids.  
Part 2. Strenghtned Inhomogeneous Surface Layer].  
*Devices and Methods of Measurements*.  
2019, vol. 10, no. 1, pp. 69–79 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-1-69-79

## Введение

Применение поверхностных и подповерхностных волн в твердых телах перспективно как для обнаружения дефектов на поверхности или в подповерхностной зоне, так и для оценки физико-механических свойств поверхности, включая механические напряжения  $\sigma_{ij}$ , прочность  $\sigma_{np}$ , твердость  $B$ , степень поврежденности металла и др. Определение качества упрочнения поверхности металлов термической, химико-термической, лазерной, механической обработкой и др. является насущной научно-технической задачей различных отраслей современного производства. При этом в качестве важнейшего параметра, характеризующего технологию упрочнения, выступает глубина упрочненного поверхностного (УП) слоя  $H$ , служащего в качестве своеобразной «кожи», существенно повышающей прочность и износостойкость функционирующего объекта.

Кроме того, представляет значительный интерес информация не только об  $H$ , но и о распределении по глубине УП слоя  $z$  таких важных параметров, как твердость  $B$  и бальность зерна металла  $b$ . В процессе упрочнения возможны некоторые вариации технологического процесса, обусловленные состоянием металла, геометрией металлоизделия, плотностью и локальностью воздействующего на его поверхность потока энергии и др. При этом, в зависимости от тепловых и диффузионных процессов, происходящих в поверхностном слое, характер распределения твердости  $B_r(z)$  и бальности зерна металла  $b(z)$  по высоте может изменяться. Так что, ориентируясь при принятии решения только на величину измеряемой твердости поверхности изделия, можно получить некорректную оценку глубины упрочненного слоя  $H$ .

В настоящее время наиболее надежным методом оценки глубины УП слоя является разрушающий, заключающийся в анализе характера изменения зависимостей  $B(z)$  и  $b(z)$ . Однако, вследствие трудоемкости, материальных и временных потерь, такому контролю подвергается выборочно незначительное количество изделий из изготавливаемой партии. В особенности, возникают трудности при контроле дорогостоящих изделий, имеющих сложный профиль. Однако, несмотря на объективность оценки контролируемых параметров разрушающим методом, существует вероятность пропуска изделий

с браком  $P(n)$ , возрастающая с уменьшением  $n$  и зависящая также от ряда производственных факторов.

Для решения этой важной для промышленности проблемы в мире предлагается использовать различные методы неразрушающего контроля по данным магнитных характеристик, электропроводности, шумов Баркгаузена и др. [1, 2], а также по данным акустических параметров [2–12]. Методы, основанные на анализе сигнала-отклика после воздействия квазистатического или переменного магнитного поля имеют ограничения. Причина кроется в том, что небольшие отклонения рецептуры (в пределах технических условий, технологии производства металла, а также сложная геометрия и состояние поверхности объекта оказывают существенное влияние на надежность контроля и существенно ограничивают применение этих методов.

Как показывает анализ известных разработок в рассматриваемом направлении, совершенствование и использование именно акустических методов для неразрушающего контроля широкого спектра упрочняющих технологий является одним из наиболее перспективных направлений по созданию информативного и надежного метода оценки глубины УП слоя при достаточной простоте реализации его. Прежде всего, это обусловлено наличием непосредственной связи между физико-механическими параметрами  $\Xi_i \subset \{E, \rho, B, l_b, \dots\}$  и скоростями продольной ( $L$ ), поперечной ( $T$ ) и поверхностной ( $R$ ) упругих мод:

$$C_{L,R,T} = (E/\rho)^{0.5} F_{L,R,T}(\kappa), \quad (1)$$

где  $E$  и  $\rho$  – модуль Юнга и плотность металла;  $\kappa$  – коэффициент Пуассона. (Формула корректна для однородной среды).

Как показывает проведенный предварительный анализ известных исследований, включая, например [3–7], в качестве наиболее информативной моды, характеризующей параметры УП слоя, может служить поверхностная акустическая волна (ПАВ), ее базовый параметр – скорость волны  $C_R$ . Выбор именно ее обусловлен тем, что с изменением частоты  $f$  изменяется длина волны и глубина ее локализации пропорционально  $\lambda_R$ . Причем, как следует из (1), величина  $\lambda_R \sim C_R \sim (E/\rho)^{0.5}$ . Т. е. этот акустический параметр должен наилучшим образом коррелировать с параметрами поверхностного слоя.

Отметим, что поверхность металла может быть упрочнена различными способами, указанными выше для стальных изделий. Упрочнение же чугунов поверхностным отбелом может быть осуществлено направленно (например, для прокатных валков) или как результат брака. И в том, и в другом случае требуется определять качество упрочнения, где наиболее чувствительным параметром к изменению глубины отбела является ПАВ. Цель работы заключалась в изучении взаимосвязи между акустическими параметрами импульсного акустического сигнала ПАВ и упрочненного поверхностного слоя образцов стали и чугуна.

### Анализ методов и особенностей возбуждения и распространения поверхностных акустических волн в объектах с упрочненным поверхностным слоем

Согласно известным данным, как правило, при упрочнении поверхности термическим, химико-термическим методом, ТВЧ, механической обработкой, лазерным воздействием и др. величина скорости ультразвуковых волн уменьшается с увеличением твердости металла на 1–2 % и более, что зависит от зондирующей моды, а также свойств металла. При этом и модуль Юнга, и плотность металла также уменьшаются, но в разной степени, что и обуславливает наличие неравенства  $\frac{\partial C_{L,R,T}}{\partial V} < 0$ .

Исходя из анализа указанной взаимосвязи параметров УП слоя с акустическими свойствами, можно условно выделить 4 группы методов оценки глубины УП слоя. Причем, 1-я группа методов основана на прямом измерении скорости упругой моды, коррелирующей с глубиной УП слоя, – по данным времени  $\Delta t = t_2 - t_1$  прохождения сигнала акустической базы  $L_0$ :  $C_{L,R,T} = \frac{L_0}{\Delta t}$  [3–6]. В случае, когда волна поверхностная, то ее проникновение в глубь металла определяется длиной волны  $\lambda_R$ , а скорость ПАВ будет зависеть от отношения  $h_\lambda = h/\lambda_R \sim h(\rho/E)^{0,5}f$ . Т. е. можно считать, что возбуждаемый поток энергии ПАВ в твердом теле в двумерном пространстве представляет собой функцию  $\Pi = \Pi(E^*, \rho^*, \kappa^*)$ , где  $E^*$ ,  $\rho^*$ ,  $\kappa^*$  – некоторые усредненные в диапазоне  $z = 0 - \infty$  параметры, существенно зависящие от безразмерной

толщины упрочненного слоя  $H_\lambda$ . При этом:  $H_\lambda \rightarrow \infty$ , то  $\Pi \rightarrow \Pi_0$ ,  $C_R \rightarrow C_{R0}$ ;

$H_\lambda \rightarrow 0$ , то  $\Pi \rightarrow \infty$ ,  $C_R \rightarrow C_{R\infty}$ ,

где индекс  $\infty$  характеризует соответствующие параметры для случая распространения волны в «сырой» основе металла (без закалки), а индекс 0 – в материале с постоянной твердостью  $B_0$ .

В работах [3–5] для определения глубины УП слоя используется импульсно-фазовый теневой метод измерения скорости ПАВ на специально подобранной частоте  $f^*$  в предположении сохранения подобия профиля твердости по глубине слоя  $B(z)$ . При нарушении же режима поверхностного упрочнения металла как глубина УП слоя, так и форма профиля твердости могут измениться. Для решения подобной задачи при определении глубины нитроцементированного слоя предлагается объект прозвучивать на разных частотах, что (по мнению авторов) позволит с помощью зависимости  $C_R(f)$  оценивать более точно величину  $H$  по сравнению с методами, реализующими одночастотный принцип измерений [7]. Как показывает анализ акустического тракта, возможности этого метода ограничены. Использование этого метода возможно на объектах с плоской поверхностью и высокой чистотой обработки. Кроме того, не учитывается влияние качества контакта на спектр ПАВ и время прохождения последней при варьировании частоты импульса, вызванное, например, смещением точки выхода акустического луча из призмы преобразователя и сдвигом фазы при прохождении контактного слоя.

Для качественной оценки глубины УП слоя могут быть использованы и косвенные, амплитудно-угловые методы (2-я группа), которые, как правило, предназначены для определения скорости поверхностных или подповерхностных волн в материалах с однородной структурой [3, 11]. В этом случае определяют оптимальный угол падения  $\beta_m$  продольной моды на объект, при котором достигается максимум амплитуды возбуждаемой подповерхностной или поверхностной волны, а затем, исходя из закона Снеллиуса, определяют скорость той или иной моды  $C_{L,T,R} = C_1 (\sin \beta_m)^{-1}$ . (2)

Погрешность же измерений зависит от точности установки угла падения волны на объект, апертуры преобразователей, качества поверхности и др.

Отметим, что несмотря на простоту, применение амплитудно-угловых методов в режиме *On-Line* проблематично и ограничено, хотя, как будет показано ниже на примере использования гониометрического метода, для толщины отбела на сером чугуна это оправдано.

К 3-й группе методов оценки глубины УП слоя следует отнести те, что основаны на эффектах рефракции акустических лучей поля поперечных волн в неоднородном слое, возбуждаемых при падении упругой волны на объект под вторым критическим углом. Для реализации одной из разновидностей этого метода в работе [10] предложена теоретическая модель и методика определения глубины упрочненного слоя по данным измерения координат  $x_{\max,i}$  максимумов амплитуды интерферирующих волн  $A_i$ , локализованных в окрестности контактной поверхности объекта и рефрагирующих в объеме отбеленного слоя прокатного валка. Использование такого метода возможно лишь при условии, когда  $H_\lambda \gg 1$ , что существенно сужает возможности применения этого метода.

В последнее время появился ряд работ, посвященных определению глубины УП слоя путем статистической обработки рассеянных поперечных волн от граничной области между УП слоем (мартенситом) и феррит перлитной структурой [10, 11] – 4-я группа методов оценки глубины УП слоя. При этом глубина упрочненного слоя оценивается в режиме «эхо» – по времени прохождения высокочастотного импульса от поверхности УПС и обратно, а характерный путь  $S$  оценивается по данным статистической обработки сигнала, исходя из выражения  $S^* \approx C_R \Delta \tilde{t}_R = 2kH^*$ , где  $H^*$  – искомое значение глубины упрочненного слоя;  $C_R$  – усредненное значение скорости в слое металла;  $k$  – корреляционный коэффициент. Причем в работе [11] сообщается о возможности решения таким способом весьма важной задачи – восстановления профиля изменяющихся свойств УП слоя. Несмотря на кажущуюся простоту, применение такого метода на практике возможно лишь при измерении УП слоя глубиной 1,5–2 мм и более. Очевидно, что такой метод является весьма специфическим и не может найти широкого использования из-за трудности получения статистических корреляционных параметров с достаточной точностью в силу влияния даже незначительных изменений химического состава, особенностей

технологического процесса (в пределах технических условий) на структуру переходного слоя и расположения зерен по размерам по глубине. В настоящее же время наиболее востребованы именно технологии упрочнения металлоизделий на глубину до 2–2,5 мм.

Предварительный анализ рассмотренных выше методов измерений глубины УП слоев по данным скорости ПАВ, а также свойств объекта исследования в настоящей работе показывает, что наиболее предпочтительным для установления связи между параметрами ТВЧ упрочненного слоя и скоростью ПАВ является импульсно-фазовый метод. При этом представляет интерес, прежде всего, рассмотреть возможность определения не только глубины УП слоя, но и профиля твердости.

### О влиянии профиля твердости на скорость поверхностных акустических волн

Как указывалось выше, распространение ПАВ по объекту с неоднородным УП слоем сопровождается изменением скорости и длины волны в силу того, что эффективные значения модуля Юнга  $E^*$  и плотности среды  $\rho^*$  также изменяются в зависимости от глубины локализации. Так как  $\xi\Delta < 1$ , то из формулы (1) можно оценить изменение скорости согласно формуле  $C_R \sim (E^*/\rho^*)^{0,5}$ . Необходимо также отметить, что согласно результатам экспериментальных исследований [10], связь твердости материала, измеренной в окрестности некоторой координате  $z$ , где локальная скорость  $C_{RP}$ , предлагается аппроксимировать линейной зависимостью в переходной зоне  $z = 0 - H$ . Так что:

$$\Delta C_R = C_{R\infty} - C_{RP} = \eta[(B(z) - B_\infty)] \approx C_{R,z=H} - C_{RP} = \eta[(B(z) - B_{z=H})], \quad (3)$$

где  $C_{R\infty}$  и  $B = B_\infty = B_{z=H}$  – скорость и твердость в основе металла соответственно;  $C_{RP}$  – локальная скорость ПАВ на поверхности среза металла в плоскости  $z$ , измеренная в отсутствие дисперсии при  $f \rightarrow \infty$ ;  $\eta = \frac{C_{R\infty} - C_{R0}}{B_\infty - B_0}$  – экспериментально установленная постоянная для данного технологического процесса упрочнения.

Ввиду того, что в рассматриваемом случае  $\{\Delta E/E, \Delta \rho/\rho\} \ll 1$ , то скорость волны, распространяющейся по поверхности объект  $C_{R0}$ , может быть оценена из формулы Оулдера [12]:

$$C_R = \Delta C_R^* (C_{R0})^{-1} = \Omega \int_{-\infty}^0 (-\Delta w^2 \Delta \rho u_i^* u_i + u_{i,j}^* u_{k,l} \Delta P_{ijkl}) F(z) dz, \quad (4)$$

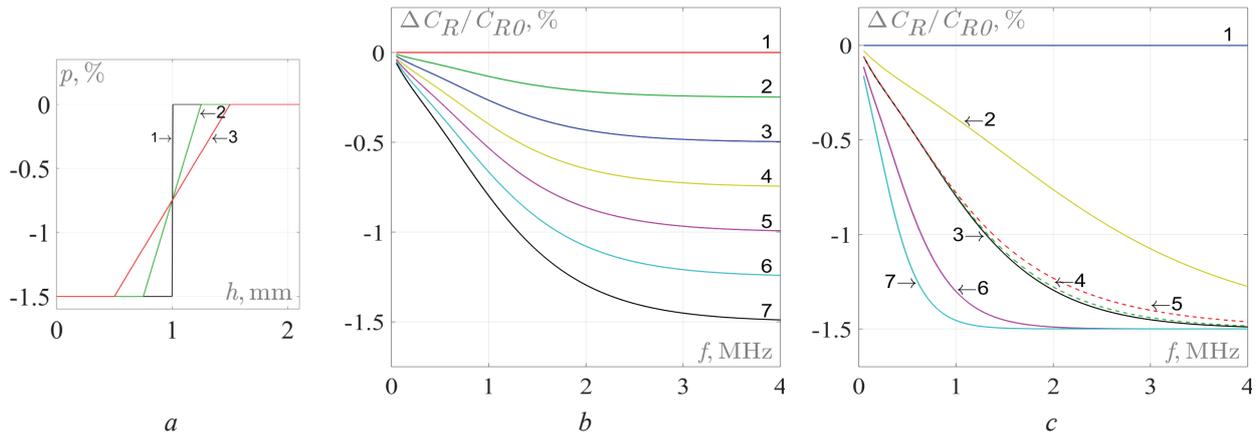
где  $\Delta C_R^* = C_R(z) - C_{R0}$ , а индекс 0 соответствует координате поверхности объекта  $z = 0$ ;  $u_i$  и  $u_i^*$  – скорости смещений невозмущенной и возмущенной волны соответственно;  $w$  – абсолютное значение средней за период энергии невозмущенной волны, переносимой через упругое полупространство единичной ширины;  $\Delta P_{ijkl}$  – изменения упругих модулей, причем  $\{\Delta \rho, \Delta P_{ijkl}\} \sim F(z)$ .

Некоторые результаты численного анализа изменения скорости ПАВ от глубины УП слоя и профиля твердости на разных частотах иллюстрируются рисунками 1 и 2а. Причем в первом случае моделируемый профиль твердости  $B(z)$  подобен ступеньке с варьируемым

углом наклона ее боковой поверхности  $\phi = \text{tg} \frac{d}{H}$ , где  $d$  – длина переходной зоны, характеризующей изменение твердости по глубине слоя. Для характеристики переходной зоны по оси ординат используется параметр  $p = (C_{RP}(z) - C_{RP0})/C_{RP0}$ , где  $C_{RP0} = C_{RP}$  при  $z = 0$ .

Представленная же на рисунке 2а кривая 4, описывающая профиль твердости и имеющая максимум в окрестности координаты  $z^* > z$ , характерна для данного технологического процесса ТВЧ закалки.

Ход зависимости скорости ПАВ в случае, когда максимум твердости расположен в подповерхностной зоне в окрестности координаты  $z \rightarrow z^* > 0$ , где «локальная» скорость волны  $C_{RP}$  принимает минимальное значение, иллюстрируется рисунком 2, где для сравнения представлены экспериментальные данные.



**Рисунок 1** – Влияния формы профиля упрочненного слоя в виде ступеньки (а) на изменение скорости поверхностной акустической волны (b, c) в образцах с разной глубиной среза  $h$ ; b: максимальная глубина упрочненного слоя  $H = 1$  мм,  $\theta = 0$  – при различной степени его упрочнения,  $\Delta C_R/C_{R0}, \% = 0$  (1); 0,5 (2); 1 (3); 1,5 (4); 2 (5); 2,5 (6); 3 (7); c:  $h$ , мм = 0 (1); 0,5 (2); 1 (3, 4, 5); 2 (6); 3 (7);  $\theta = 0$  (1, 2, 3, 5, 7);  $\theta = \pi/4$  (4);  $\pi/6$  (5)

**Figure 1** – Effects of the shape of the profile of the hardened layer in the form of a step (a) on the change in the velocity of the surface acoustic wave (b, c) in samples with different cut-off depth  $h$ ; b: maximum depth of the hardened layer  $H = 1$  mm,  $\theta = 0$  – at various degrees of its hardening,  $\Delta C_R/C_{R0}, \% = 0$  (1); 0,5 (2); 1 (3); 1,5 (4); 2 (5); 2,5 (6); 3 (7); c:  $h$ , mm = 0 (1); 0,5 (2); 1 (3, 4, 5); 2 (6); 3 (7);  $\theta = 0$  (1, 2, 3, 5, 7);  $\theta = \pi/4$  (4);  $\pi/6$  (5)

Как показывают численные расчеты, при моделировании профиля твердости или  $C_{RP}(z)$  в виде ступеньки с изменяющейся величиной переходной зоны  $d$  зависимости  $C_R(f)$  – монотонно убывающие функции, выходящие на насыщение независимо от соотношения  $d/H$ . Причем только в случае, когда  $f \rightarrow \infty$  (или  $H_\lambda = H/\lambda_R \gg 1$ )  $C_{RP} \rightarrow C_{R0}$ , где  $B \rightarrow B_{z=0}$ . Таким образом, используя формулы (2) и (3), а также определяя значение  $C_{R0}$ , представляется возможным оценить твердость на поверхности объекта согласно фор-

муле:  $B_{z=0} = B_0 = (C_{R\infty} - C_{R0})/\eta + B_\infty$ , не прибегая к механическим испытаниям, что в ряде случаев весьма затруднительно или невозможно.

Как видно, увеличение глубины УП слоя, степени закалки, а также уменьшение переходной зоны  $d$  сопровождается более быстрым спадом кривых  $C_R(f)$  и выходом их на насыщение. Кроме того, уменьшается и частотная область  $\Delta f$  квазилинейного изменения скорости ПАВ. Необходимо отметить, что если в процессе упрочнения сохраняется подобие профиля

твердости, определяемого преимущественно отношением  $d/H$ , а также известна зависимость  $C_{RP}(z)$ , то представляется возможным оценить толщину УП слоя по данным измеренной скорости волны на одной специально подобранной частоте. Для повышения же точности измерений необходим выбор такой рабочей частоты, при которой длина волны сопоставима с глубиной УП слоя. Причем, как следует из численных расчетов, наиболее высокая надежность измерений достигается при соблюдении условия:  $1/6 < h < 2\lambda/3$ .

С другой стороны, при сохранении подобия моделируемого профиля твердости и монотонно убывающем характере  $C_{RP}(f)$  представляется возможным оценить параметры УП слоя, включая его глубину и ширину переходной зоны, измеряя скорость ПАВ на нескольких специально подобранных частотах  $f_i$ . Отметим, что если УП слой имеет скорость упругих мод больше, чем основа, то следует ожидать обратного – рост  $C_R$  с увеличением  $H$ .

## Сравнение расчетных и экспериментальных данных

### Методические особенности экспериментальных измерений

Для сравнения расчетных и опытных данных были проведены экспериментальные исследования скорости ПАВ импульсно-фазовым методом на стальном образце с упрочненным ТВЧ закалкой слоем. Путем последовательного среза верхнего слоя на глубину формировался образец ступенчатой формы. Длина каждой ступеньки, определяющей акустическую базу прозвучивания, составляла 46 мм. Измерение скорости ПАВ производилось путем установки измерительных малоапертурных преобразователей на поверхность ступеньки образца, расположенной на расстоянии  $z = h_i$  от поверхности с нулевым срезом  $z = 0$ .

Исследуемый частотный диапазон  $f = 1\text{--}3,8$  МГц. Измерения скорости ПАВ проводились теневым методом и с постоянной акустической базой  $L = 40$  мм. Для повышения точности относительных измерений до 0,1–0,15 % использованы разработанные в Институте прикладной физики НАН Беларуси малоапертурные преобразователи с рабочей контактной поверхностью, поперечный размер которой составляет  $\Delta l = 200\text{--}300$  мкм, шириной рабочей поверхности преобразователей 0,2–0,3 мм.

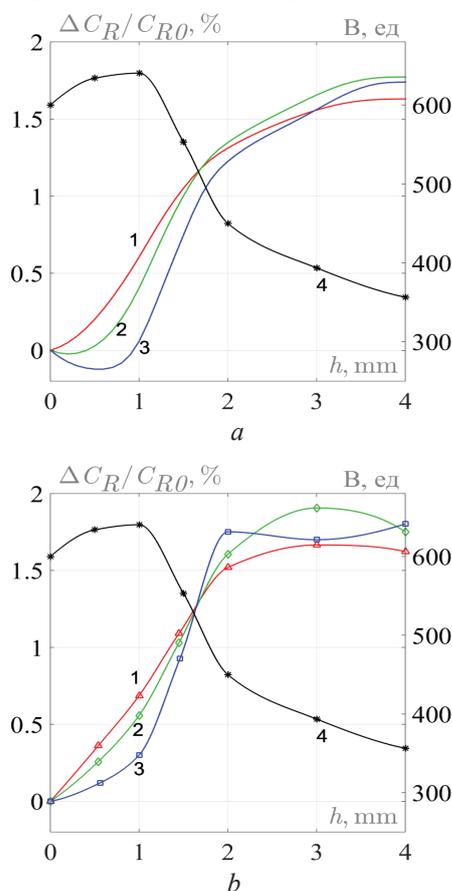
Измерение временных интервалов производилось с помощью измерителя временных интервалов И1-8 с временной шкалой до 1 нс. С одного из выходов прибора опорный сигнал запускает генератор электрических импульсов возбуждения ПАВ. С другого же выхода прибора сигнал подается для запуска развертки осциллографа, служащего в качестве индикатора. На вход осциллографа подаются импульсы с приемников колебаний, что позволяет с помощью электронной задержки И1-8 определять временной интервал прохождения  $\Delta t = t_2 - t_1$  волной фиксированного расстояния и определять искомую скорость по формуле:  $C_R = L(t_2 - t_1 + \Delta t^*)^{-1}$ , где  $\Delta t^*$  – временная поправка. Она обусловлена влиянием переходных слоев и особенностями возбуждения и приема ПАВ при условии, когда ширина волноводов преобразователей в окрестности контактной поверхности объекта  $\Delta l < 0,5\lambda_R$ . Эта поправка нивелируется за счет дополнительного измерения ПАВ на незакаленном стальном образце той же марки с известной скоростью ПАВ.

В качестве генератора и усилителя недетектированных электрических импульсов использованы блоки прибора УД2-12. Объектом исследований глубины УП слоя импульсно-фазовым методом служили стальные образцы с разной глубиной среза, а также образец без закалки («сырой»). Временная погрешность измерений, обусловленная нестабильностью установки преобразователей на объект и аппаратурной погрешностью, не превышала приблизительно 5 нс при максимальном изменении измеряемого временного интервала до  $\Delta t \approx 300$  нс.

### Данные сравнения эксперимента и расчетов

На рисунке 2 представлены экспериментальные и расчетные зависимости изменения скорости ПАВ и твердости от глубины среза, выполненного на стальных образцах (Ст45) с ТВЧ закалкой. Как видно из представленных данных, наблюдается неплохое качественное соответствие между расчетными и опытными данными. Причем тенденция хода зависимости  $\Delta C_R$  от  $h$  показывает, что с увеличением частоты волны дифференциальный параметр  $c^* = \frac{\partial C_R}{\partial h} > 0$  в окрестности  $\Delta h_c \rightarrow 0$  уменьшается. При характерном же значении  $f \rightarrow f^*$  и  $c^* \rightarrow 0$ ,  $\frac{\partial^2 C_R}{\partial^2 h} > 0$  наблюдается

минимум функции  $c^*(z)$ . Уменьшение же частоты волны приводит к нивелированию этого эффекта. Таким образом, изменяя частоту или длину поверхностной акустической волны, представляется возможным «чувствовать» изменения по глубине упругих свойств УП слоя. Т.е. частотная зависимость скорости ПАВ представляет собой наиболее надежный источник информации о качестве упрочнения металла, а также позволяет устранить неоднозначность измерений. Отметим, что если измерения проводятся на специально подобранной частоте, то надежные измерения достигаются лишь при сохранении подобия профиля  $B(z)$ , а выбранная длина волны зондирующего сигнала  $\lambda_R = \lambda_R^* > H$ , где  $H$  – требуемая глубина упрочнения.



**Рисунок 2** – Сравнение данных теоретического моделирования (а) и эксперимента (b) – зависимости изменения скорости поверхностной акустической волны  $\Delta C_R/C_{R0}$  (1–3) и твердости  $B$  (4) от толщины среза поверхностного слоя металла  $h$ , упрочненного ТВЧ закалкой;  $f$ , МГц = 1 (1); 1,8 (2); 3,8 (3)

**Figure 2** – Comparing the data of theoretical modeling (a) and experiment (b) – dependence of the speed of the surface acoustic wave  $\Delta C_R/C_{R0}$  (1–3) and hardness  $B$  (4) vs. the cut thickness of the surface metal layer  $h$ , strengthened by high-frequency hardening;  $f$ , MHz = 1 (1); 1.8 (2); 3.8 (3)

Необходимо отметить, что имеющееся различие между экспериментальными и расчетными данными обусловлено некоторым упрощением расчетной модели, не учитывающей спектральный состав зондирующего сигнала. Так в частности, в эксперименте используется импульсный режим возбуждения ПАВ, где более значимый вклад в изменение скорости ПАВ вносят именно низкочастотные составляющие спектра. Это обусловлено особенностями распространения ПАВ по объекту и их трансформации при излучении и прохождении через границу контактной поверхности образца.

Необходимо отметить, что профиль  $B(z)$  или  $C_R(z)$  подбирается минимизацией функции среднеквадратичного отклонения измеренной дисперсионной кривой и дисперсионной кривой, получаемой из подбираемого профиля закалки по формуле Оулда. На первом этапе моделирования процесса распространения ПАВ для минимизации указанной функции использовался метод случайного поиска, хотя (как выяснилось) для повышения точности и уменьшения временных затрат существуют и другие методы.

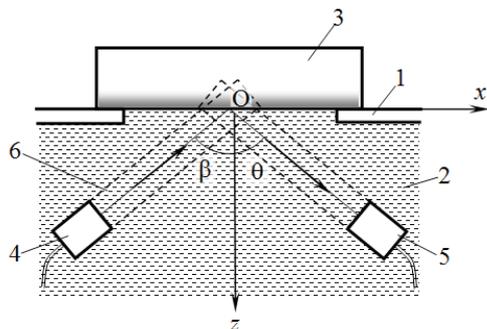
## О возможности оценки глубины упрочнения металлов методом гониометра

Как указывалось выше, в некоторых случаях представляется возможным оценивать глубину упрочненного слоя не по изменению скорости ПАВ, а по другим параметрам, непосредственно зависящим от нее. Ниже в качестве такого параметра используется угол падения волны на объект (формула (2)), при котором амплитуда возбуждаемой в нем ПАВ максимальная, а отраженной – минимальная, что реализуется методом гониометра.

Гониометрическая схема для определения глубины УП слоя приведена на рисунке 3. Сущность работы гониометра заключается в определении угла падения продольной волны на объект  $\beta_m$ , соответствующего минимуму амплитуды зеркально отраженной волны или максимуму возбуждаемой в образце ПАВ. При этом, как упоминалось ранее, в соответствии с законом Снеллиуса величина  $\beta_m = \arcsin(C_1/C_R)$ . Т.е.  $\beta_m$  является косвенным параметром, зависящим от скорости ПАВ и, что естественно, от глубины УП слоя.

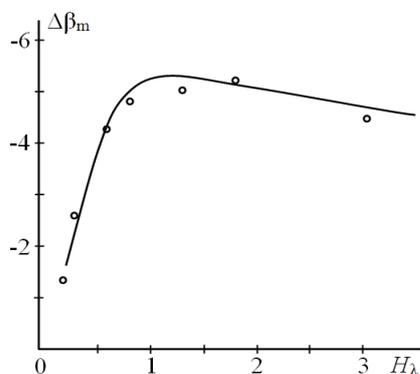
Апробация гониометрической схемы измерений приведена на образцах серого чугуна с поверхностным отбелом разной толщины, а также

образцах с упрочненным ТВЧ закалкой слоем (без среза и со срезом). На опорные поверхности окна ванны 1 с иммерсионной средой 2 помещают исследуемый образец 3, обращенный к преобразователям 4 и 5 плоской (отражающей звук) поверхностью. В этой плоскости находится ось вращения излучающего и принимающего УЗК преобразователей 4 и 5.



**Рисунок 3** – Принципиальная схема работы гониометра для контроля свойств поверхности металла: 1 – опорная поверхность; 2 – иммерсионная среда; 3 – образец; 4 – излучающий и 5 – приемный пьезо-преобразователи; 6 – коромысла

**Figure 3** – Schematic diagram of the operation of the goniometer to control the properties of the metal surface: 1 – supporting surface; 2 – immersion medium; 3 – sample; 4 – radiating and 5 – receiving ultrasonic probes; 6 – rocker



**Рисунок 4** – Отклонение угла минимума амплитуды отраженного сигнала  $\Delta\beta_m$  в зависимости от толщины отбела на сером чугуна

**Figure 4** – Deviation of the angle of the minimum amplitude of the reflected signal  $\Delta\beta_m$  vs. the thickness of chill on gray iron

Результаты исследований, проведенных на образцах стали Ст45 с упрочненным ТВЧ закалкой слоем как без среза (глубиной  $H$ ), так и при наличии среза (высотой  $h$ ) показали, что изменение этих величин в диапазоне

$\{H, h\} = 0-1,4$  мм сопровождается изменением  $\beta_m$  не более, чем на  $|\Delta\beta_m| = 22-25'$ . Причем  $\Delta\beta_m(h) < 0$ , а  $\Delta\beta_m(H) > 0$ . Т. е. увеличение глубины УП слоя, обладающего меньшей, чем основа металла скоростью  $C_R$  (и модулем Юнга  $E$ ) как бы «размягчает» исследуемую среду и приводит согласно закону Снеллиуса (при учете формулы (1)) к росту  $\beta_m$  и наоборот. Отметим, что указанные зависимости  $\Delta\beta_m(h)$  и  $\Delta\beta_m(H)$  выходят на насыщение при  $\{H_\lambda, h_\lambda\} > 1-1,1$ .

Что касается исследований, проведенных на образцах серого чугуна с поверхностным отбелом (рисунок 4), то в соответствии со сказанным выше величина  $\Delta\beta_m < 0$  и достигает  $\Delta\beta_m \approx -6^\circ$ , что практически в 14–16 раз больше, чем при ТВЧ закалке.

Как указывалось выше, такой результат обусловлен преимущественно существенной разницей упругих модулей отбела и чугуна (в разы) при небольшой разнице их плотностей. Важно также отметить характерную особенность хода экспериментальной зависимости изменения  $C_R(H_\lambda)$ , заключающуюся в том, что в диапазоне  $H_\lambda = 0-0,7$  величина  $\Delta\beta_m \sim H_\lambda$ , а при  $H_\lambda > 1$  наблюдается даже некоторое снижение абсолютной величины  $\Delta\beta$ . По-видимому, это обусловлено особенностями проявления волноводных свойств исследуемой слоистой системы и рассеяние падающего акустического пучка в области переходного слоя отделяющего структуру серого чугуна (с преимущественно перлитной фазой) и отбела.

Интересно, что проведенные в работе [12] исследования зависимости  $C_R$  от глубины отбела на сером чугуна (марка не указана) показали квазилинейный характер именно роста функции  $C_R(H_\lambda)$  вплоть до  $H_\lambda \approx 1$ . (К сожалению, в работе отсутствует конкретизация акустических свойств контактирующих металлов).

Таким образом, результаты исследования амплитудно-угловых характеристик на поверхностно упрочненных образцах чугуна и стали показали, что наибольшая надежность и точность измерений глубины УП слоя может быть достигнута именно в том случае, когда объектом исследования является чугун с поверхностным отбелом. При этом в ряде случаев требования к точным параметрам гониометрической установки и условиям ее эксплуатации могут быть даже снижены, что позволит использовать метод гониометра в цеховых условиях, а также, что весьма важно, для контроля толщины отбела на объектах

цилиндрической формы с характерным радиусом кривизны  $R > R^*$ . При этом прозвучивание объекта должно осуществляться при совпадении плоскости падения УЗК на объект и образующей к нему.

На основании проведенных исследований и их практического использования можно сделать заключение, что именно применение импульсно-фазового метода является наиболее эффективным и удобным при определении глубины упрочненного ТВЧ закалкой слоя при погрешности измерений  $\approx 10\text{--}15\%$ . Получение же подобного результата в цеховых условиях методом гониометра весьма затруднительно, что связано с необходимостью реализации иммерсионного варианта ввода-приема падающего на объект акустического пучка и использования прецизионной установки, а также высокими требованиями к обработке контролируемой поверхности.

В то же время существует возможность повышения точностных и эксплуатационных параметров гониометрического метода контроля путем использования предложенного нами в работе [11] способа измерений. В этом случае для создания акустического контакта предлагается использовать локальную иммерсионную ванну, создаваемую путем удержания магнитной жидкости в любом пространственном положении с помощью пондеромоторных сил  $\vec{f} = \mu_0 M \nabla H_f$ , где  $M$  – намагниченность магнитной жидкости;  $H_f$  – напряженность магнитного поля. При проведении же измерений используется не теневой режим, а режим эхо. В этом случае акустический пучок дважды отражается от контролируемого объекта, что существенно сказывается на изменении амплитуды отраженного луча и, естественно, на повышении точности измерения угла  $\beta_m$ .

## Заключение

Проведен краткий анализ известных работ, посвященных определению глубины упрочненных поверхностных слоев различными методами, включая ТВЧ закалку, цементацию и др., и показана эффективность использования именно акустических методов для решения этих задач. Обращено внимание на необходимость реализации импульсно-фазового метода, связывающего скорость поверхностной волны с параметрами упрочненного слоя, включая его глубину и профиль твердости.

На основе интегрального выражения Оулдера, используя упрощенную модель, выпол-

нен расчет зависимости, связывающей скорость волны, ее частоту, глубину упрочненного слоя и пространственное распределения твердости, представляемой в виде ступеньки с изменяющимся наклоном ее боковой поверхности, моделирующей переходную зону упрочненного слоя. Импульсным методом с использованием малоапертурных преобразователей частотой 1–3,8 МГц получены зависимости скорости поверхностной волны от высоты среза упрочненного ТВЧ закалкой слоя.

Проведенное сравнение данных эксперимента и расчетов упрощенной теоретической модели показало хорошее качественное соответствие между ними, демонстрируя высокую «чувствительность» метода по отношению к характеру изменения твердости по глубине упрочненного слоя. Полученные данные являются основой для решения обратной задачи по восстановлению пространственного распределения твердости на основе анализа частотно-фазовых характеристик поверхностных волн.

Проведена апробация на стальных образцах и образцах серого чугуна метода гониометра – для определения глубины (и толщины среза металла) в упрочненном ТВЧ закалкой слое стальных образцов и толщины отбела на сером чугуне по данным угла  $\beta_m$ , соответствующего условию достижения минимума амплитуды зеркально отраженной волны. При этом возбуждаемая в образце ПАВ достигает максимума амплитуды. Показано, что изменение этого угла в зависимости от толщины среза или глубины упрочненного ТВЧ закалкой слоя составляет всего 24–26', а глубины отбеленного чугуна в 14–16 раз больше. На основании полученных результатов даны рекомендации по их использованию на практике.

## Благодарности

Эта работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по контракту Т17-159 от 18.04.2017.

## Список использованных источников

1. Cuffe, J. Eddy Current Measurement of Case Hardened Depth of Steel Components / J. Cuffe [et al.] // 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, Oct. 25–28. – 2008. – P. 5.
2. Moorthy, V. Important factors influencing the magnetic Barkhausen noise profile / V. Moorthy //

IEEE Transactions on Magnetics. – 2016. – Vol. 52, iss. 4. – P. 221–227. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2502222

3. Баев, А.Р. О возбуждении ПАВ в металлах с поверхностным упрочненным слоем / А.Р. Баев [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012, № 3. – С. 11–18.

4. Кондратьев, А.И. Влияние термообработки на акустические характеристики материалов / А.И. Кондратьев, А.Н. Иванов, С.Н. Химуни // Дефектоскопия. – 2006. – № 3. – С. 28–31.

5. Гурченко, П.С. Ультразвуковой метод измерения глубины упрочненных слоев / П.С. Гурченко, А.А. Солонович, А.Л. Майоров // Индукционный нагрев. – 2009. – № 7. – С. 11–14.

6. Гуляев, Ю.В. Поверхностные акустические волны в неоднородных средах / Ю.В. Гуляев [и др.] // Москва : Наука, 1991. – 10 с.

7. Good, M.S., Schuster, G.J., Skorpik, J.R. Ultrasonic Material Hardness Depth Measurement. United States Patent, Patent No. 5646351, 1997.

8. Baqeri, R. Case Depth Profile Measurement of Hardened Components Using Ultrasonic Backscattering Method / R. Baqeri, F. Honarvar, R. Mehdizad // 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, South Africa, April 16–20. – 2012.

9. Theiner, W. Process Integrated Nondestructive Testing of Ground and Case Depth Hardened Parts / W. Theiner, R. Kern, M. Stroh // European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT2002), Barcelona, Spain, June 17–21. – 2002.

10. Басацкая, Л.В. Дифракция ультразвуковых волн в поверхностно-закаленном слое металлов и метод измерения глубины закаленного слоя / Л.В. Басацкая, А.Ч. Вopilкин, А.П. Шишов // Дефектоскопия. – № 7. – 1988. – С. 54–65.

11. Способ ультразвукового контроля поверхности твердого тела / А.Р. Баев, А.Л. Майоров, М.А. Тищенко, М.В. Асадчая, Г.Е. Коновалов. – Патент РФ на изобретение № 1475, Б.И. № 4, 2011. – С. 130–131.

12. Воронкова, Л.В. Контроль чугуновых отливок ультразвуком. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 25 с.

## Acknowledgments

This work was carried out with the support of the Belarusian Republican Fund of fundamental investigations within the bounds of contract No. T17-159 of 18.04.2017.

## References

1. Cuffe J., Sun H., Plotnikov Y., Nath S., Sheila-Vadde A. Eddy Current Measurement of Case Hardened

Depth of Steel Components. 17th World Conference on Nondestructive Testing, Oct. 25–28, Shanghai, China, 2008, 5 p.

2. Moorthy V. Important factors influencing the magnetic Barkhausen noise profile. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, vol. 52, iss. 4, pp. 221–227.

DOI: 10.1109/TMAG.2015.2502222

3. Baev A.R., Majorov A.L., Asadchaja M.V., Sergeeva O.S., Kononov G.E. [On the excitation of surfactants in metals with a surface hardened layer] *Nerazrushajushhij kontrol' i diagnostika* [Non-Destructive Testing and Diagnostics], 2012, no. 3, pp. 11–18 (in Russian).

4. Kondrat'ev A.I., Ivanov A.N., Himunin S.N. Effect of thermal treatment on acoustic characteristics of materials. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2006, vol. 42, no. 3, pp. 167–173.

5. Gurchenko P.S., Solonovich A.A., Majorov A.L. [Surface acoustic waves in inhomogeneous media] / «Induktionnyj nagrev» [Induction heating], 2009, no. 7, pp. 11–14 (in Russian).

6. Guljaev J.U.V., Krylov V.V., Birjukov S.V., Pleskij P. *Poverkhnostnye akusticheskie volny v neodnorodnykh sredakh* [Surface acoustic waves in inhomogeneous media]. Moscow, Nauka Publ., 1991, 210 p.

7. Good M.S., Schuster G.J., Skorpik J.R. Ultrasonic Material Hardness Depth Measurement. United States Patent, Patent no. 5646351, 1997.

8. Baqeri R., Honarvar F., Mehdizad R. Case Depth Profile Measurement of Hardened Components Using Ultrasonic Backscattering Method. 18th World Conference on Nondestructive Testing, April 16–20, Durban, South Africa, 2012.

9. Theiner W., Kern R., Stroh M. Process Integrated Nondestructive Testing of Ground and Case Depth Hardened Parts. *European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT2002)*, June 17–21, Barcelona, Spain, 2002.

10. Basackaja L.V., Vopilkin A.Ch., Shishov A.P. [Ultrasonic waves diffraction in a surface-quenched metal layer and a method for measuring the depth of a quenched layer]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 1988, no. 7, pp. 54–65 (in Russian).

11. Baev A.R., Majorov A.L., Tishhenko M.A., Asadchaja M.V., Kononov G.E. *Sposob ul'trazvukovogo kontrolya poverkhnosti tverdogo tela* [Method for ultrasonic testing of a solid surface]. Patent RB no. 1475, B.I. No. 4, 2011, pp. 130–131.

12. Voronkova L.V. *Kontrol' chugunnykh otlivok ul'trazvukom* [The control of iron castings by ultrasound]. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2005, 25 p.