

The article describes using of ultrasonic waves for determination of solid properties of cast iron and case hardened of steel objects. The possibility of evaluation of the gray iron type by indexes of speed of longitudinal and surface waves is shown. There is stable correlation dependence between surface speed, frequency and depth case hardened.

А. Р. БАЕВ, Г. Е. КОНОВАЛОВ, Я. В. АРТЕМЕНКО,
М. В. АСАДЧАЯ, К. А. ФИЛИППОВ, ГНУ ИПФ НАН Беларуси,
П. С. ГУРЧЕНКО, М. А. ТИЩЕНКО, РУП "МАЗ"

УДК 620.179

ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ СТРУКТУРЫ ЧУГУННЫХ И СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПО ДАННЫМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Введение

При производстве металлоизделий из чугуна или стали необходимо строгое соответствие параметров технологического процесса, включая соответствующий температурный режим, химический состав и др. При несоблюдении этого возможны отклонения параметров структуры металла от требуемых как непосредственно в объеме, так и в поверхностном слое. Так, например, при производстве высокопрочного чугуна вместо шаровидного или червеобразного графита возможно образование пластинчатого графита (серый чугун) как непосредственно по всему объему детали, так и в отдельных ее частях. (Последнее обычно имеет место в том случае, когда отливка достаточно громоздкая и имеются трудности в равномерном перемешивании состава реагентов и создании однородного температурного поля.) В процессе производства серого чугуна (СЧ) из-за указанных выше причин возможен выпуск отливок, марка которых отличается от требуемой, т.е. прочность на разрыв σ , а также твердость, измеряемая по Бринеллю B_{r} , не соответствуют заданной. На поверхности отливок СЧ, особенно на острых кромках, может образовываться высокопрочный "отбеленный" слой, толщина которого может составить от нескольких долей миллиметров до нескольких сантиметров, что существенно затрудняет или делает невозможным проведение чистовых операций. В других случаях для повышения износостойкости чугунных прокатных валков [1] на их поверхности специально создают слой отбела, достигающий толщины 40–60 мм. Для подобных целей на поверхности стальных изделий создают упрочняющие слои, выполняемые закалкой, цементацией, азотированием и другими методами [2].

Затронутые проблемы контроля чугунных и стальных объектов являются весьма актуальными и для их решения используются ультразвуковые

(УЗ), электромагнитные и акусто-реверберационные методы [3–9]. Благодаря широкому возможностям УЗ методы применялись на предприятиях дальнего зарубежья для контроля структуры и определения физико-механических свойств как чугунных, так и стальных изделий. Известны также работы по оценке толщины поверхностного отбела на отливках чугуна и глубины упрочненных слоев металлов УЗ методом [1, 4, 10].

Указанные выше проблемы изучаются и в настоящей работе. При этом устанавливаются взаимосвязи между акустическими и физико-механическими свойствами чугуна не только в объеме металла, но и в поверхностном слое. На основе разработанного прецизионного метода измерения скорости УЗК исследуются вопросы контроля упрочненных слоев стальных изделий, выполненных закалкой и цементацией.

Методика ультразвуковых измерений

Для проведения серии ультразвуковых измерений использовали электронную схему, которая включает в себя источник и приемник электрических импульсов, выполненные на базе прибора УД 2-12. Для анализа формы зондирующего сигнала и повышения точности измерений использовали осциллограф С1-71 и измеритель временных интервалов И2-22, выполняющий функцию электронной временной задержки. Последний применяется и для синхронизации работы генератора импульсов и осциллографа С1-71. Для измерения фазовых и амплитудных параметров зондирующего сигнала используется его недетектированная форма, что позволяет существенно повысить надежность измерительной процедуры.

Соответствие корреляционных зависимостей между механическими свойствами чугуна СЧ20 и акустическими параметрами исследуется методом измерения скорости УЗК путем определения временного интервала между отраженными им-

пульсами продольных волн в объеме образца. Одновременно измеряется скорость рэлеевской волны C_R теневым способом с погрешностью не более 0,03–0,05%. Для этого была проведена оригинальная разработка акустических малоапертурных преобразователей (АМП) [9], имеющих акустическую базу $L \approx (20-40) \cdot 10^{-3}$ м. Высокая точность измерений C_R достигается в основном за счет уменьшения погрешностей определения временного интервала, вызванных, как правило, нестабильностью переходных слоев при создании акустического контакта. Достигнутый рабочий диапазон частот составляет 1–4 МГц.

В первой части работы объектом исследования служили образцы серого чугуна, отнесенные к марке СЧ20 и прошедшие металлографические исследования и испытания на твердость и разрыв. Кроме того, на поверхности ряда образцов чугуна специальным образом был создан неравномерный слой отбела. Схема исследований и позиции преобразователей на поверхности отбеленного чугуна приведены на рис. 1 и 2.

Для установления взаимосвязей между акустическими характеристиками поверхностных волн и параметрами упрочненных слоев, выполненных ТВЧ закалкой или цементацией, была изготовлена серия стальных образцов. Причем изменение толщины упрочненного слоя производили путем его последовательного среза. Данные по напряжению разрыва получены на разрывной машине, а твердость поверхности в единицах Виккерса измеряли с помощью прибора ТПЦ, разработанного в ГНУ ИПФ НАН Беларуси.

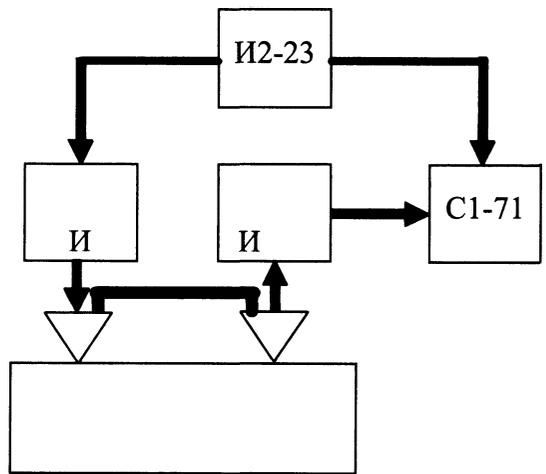


Рис. 1. Экспериментальная схема измерений

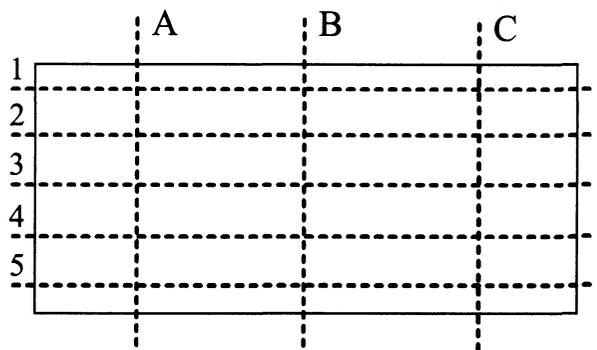


Рис. 2. Позиции преобразователей на поверхности образцов чугуна с отбелом

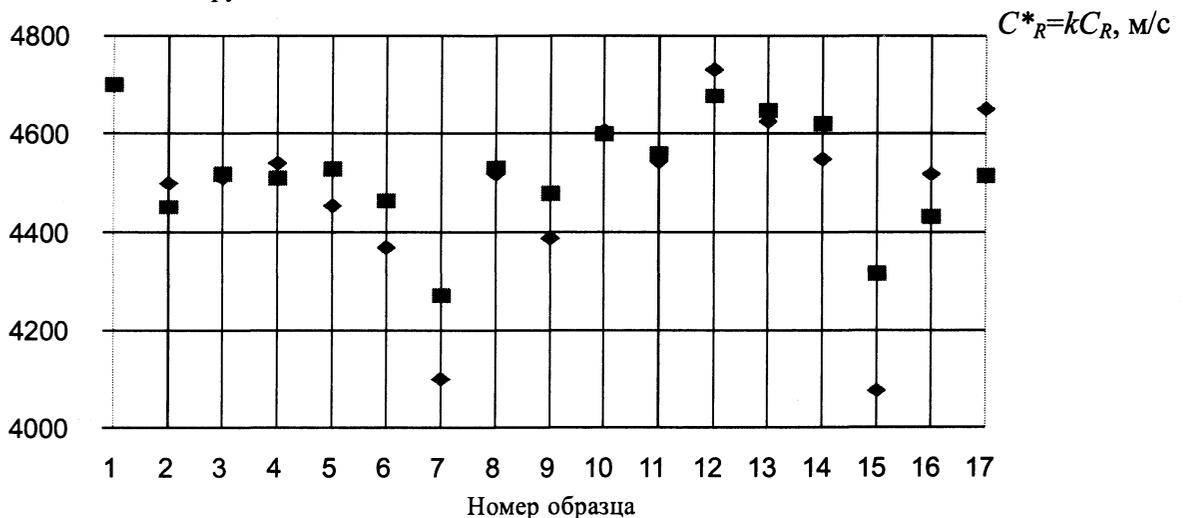


Рис. 3. Скорости продольной (♦) и поверхностной (■) (приведенной) УЗ волн в образцах СЧ

Анализ результатов исследований

Основные результаты проведенных исследований представлены на рис. 3–6.

Данные по скорости продольной волны C_L и рэлеевской волны C_R в образцах серого чугуна из различных плавок приведены на рис. 3. Скорости продольной и рэлеевской волн определены на частоте 1,8 МГц. Для удобства на рисунке показаны значения не C_R , а ее приведенное значение $C^*_R = kC_R$, где k – некоторый коэффициент,

равный отношению максимального значения скорости продольной волны C к C_R . Как видно из рисунка, диапазон изменения абсолютных значений скорости продольных волн в исследованных образцах составляет 4730–4100 м/с, что соответствует относительному изменению скорости на 13%. Для рэлеевской же моды это изменение не более 9%.

На рис. 4 приведены экспериментальные и расчетные данные величины напряжения разрыва

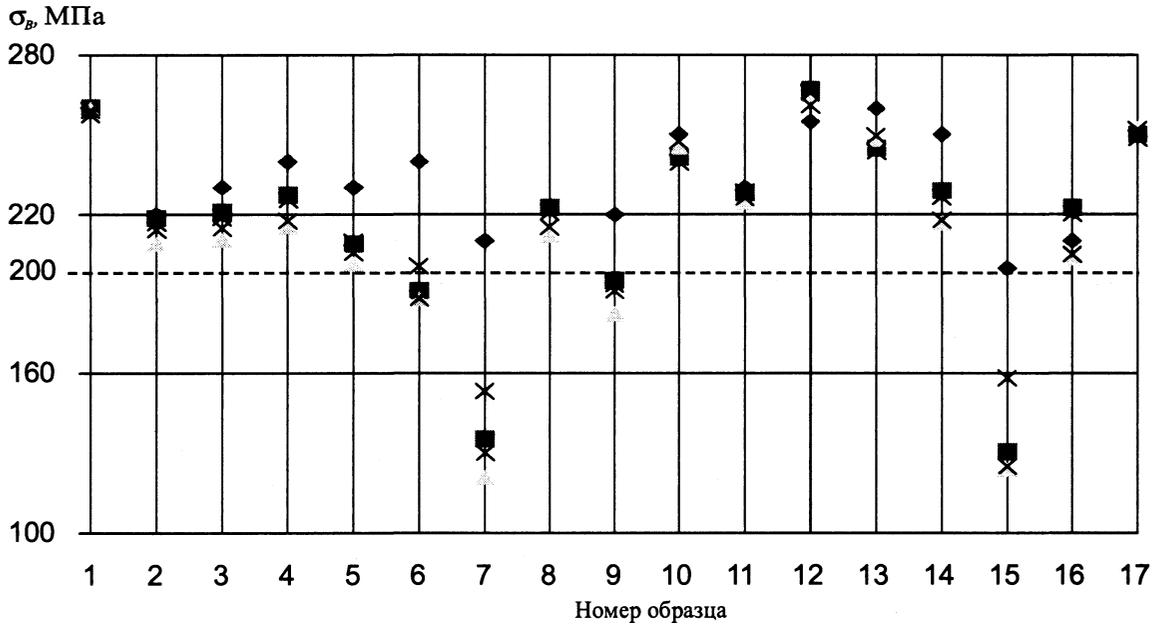


Рис. 4. Зависимость величины напряжения разрыва σ_B в образцах чугуна от скорости продольной волны: \blacklozenge – экспериментальные данные; \blacksquare – расчет σ_B по формуле (1); \blacktriangle – по (2) и (3); \times – по (2) и (4); \star – по (2) и (5)

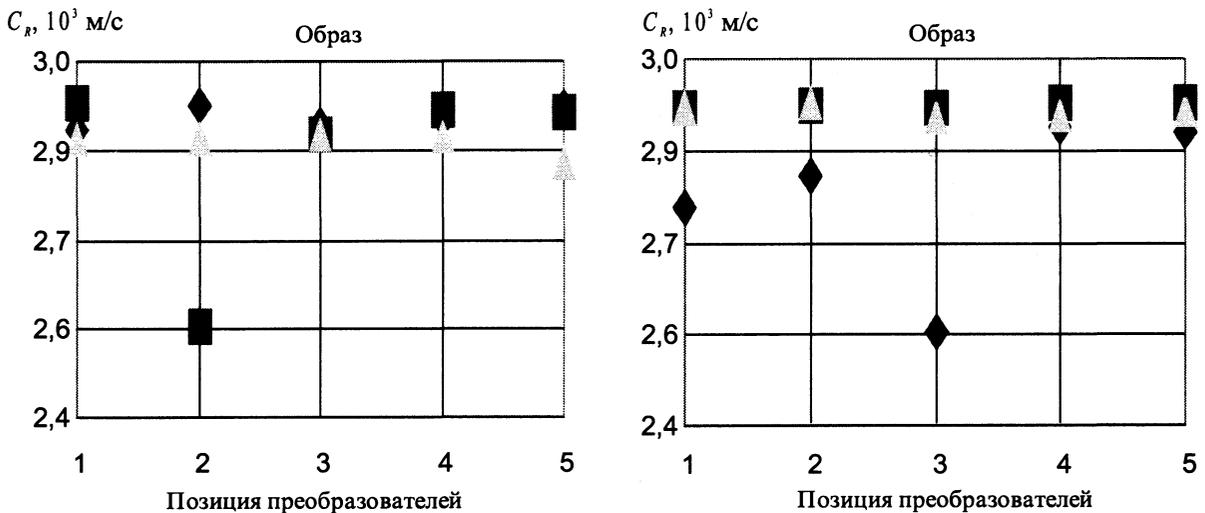


Рис. 5. Скорость рэлеевской волны в образцах чугуна с отбелом: \blacklozenge – сечение А; \blacksquare – сечение В; \blacktriangle – сечение С

образцов серого чугуна. Расчетные формулы (1)–(3) взяты из работы [4], а формулы (4) и (5) для значений твердости НВ были получены нами на основании обработки статистических данных. Причем квадратные скобки означают безразмерную величину заключенного в них параметра:

$$\begin{aligned} \sigma_B &= 0,277[C_L] - 783, & (1) \\ \sigma_B &= 0,16[C_L] + 0,86\text{НВ} - 689, & (2) \\ \text{НВ} &= 0,04853[C_L] - 57,4, & (3) \\ \text{НВ} &= 75,563[C_L] - 129, & (4) \\ \text{НВ} &= 231,15[C_R] - 320. & (5) \end{aligned}$$

Необходимо отметить, что наилучшее соответствие расчетных и экспериментальных данных наблюдается в том случае, когда в качестве акустического параметра используется скорость не

продольных волн, а рэлеевских (поверхностных). Наибольшее отклонение сравниваемых данных наблюдается тогда, когда экспериментальные значения разрыва образцов σ_0 близки к нижней границе значений σ , определяющих марку чугуна. Исходя из результатов исследований, можно заключить, что такой акустический параметр как скорость УЗК может быть использован для предварительной оценки прочностных свойств серого чугуна. При этом около 70–80 % образцов могут быть “идентифицированы” акустическим методом.

Исследование упрочненных слоев

Приведенные ниже данные ультразвуковых исследований посвящены изучению упрочненных слоев на сером чугуне и стали. Суть измерительной процедуры заключается в том, что упругие свойства

отбела и основы существенно различаются. Так, например, скорость C_L в отбеле достигает $(6,1-6,3) \cdot 10^3$ м/с, а в сером чугуна — $4,9 \cdot 10^3$ м/с. Рэлеевская волна, распространяясь в металле, локализуется в его поверхностном слое глубиной $\delta \leq \lambda$. Если глубина отбела $h < \delta$, то наблюдаются как амплитудные, так и фазовые изменения зондирующего сигнала. Теоретический расчет такой задачи затруднен и поэтому, как правило, используются эмпирические формулы, связывающие скорость рэлеевской волны, глубину отбела и частоту волны. Испытания разработанной нами измерительной схемы на базе акустических малоапертурных преобразователей (АМП) показали их высокую эффективность, обеспечивая требуемые точностные характеристики и повторяемость измерений. Как видно, с помощью данных по скорости C_R представляется возможным определить закономерности изменения толщины отбеленного слоя на контролируемой поверхности чугуна. При этом локальность измерений определяется длиной акустической базы прозвучивания L .

Необходимо отметить, что для контроля поверхностного отбела могут быть использованы не только рэлеевские, но и головные волны, возбуждаемые под критическими углами падения ультразвуковой волны на поверхность объекта. На рис. 6 приведена схема преобразователя, реализующего предлагаемый метод. Каждый из преобразователей выполнен составным и содержит две пьезопластины, установленные под критическими углами β_1 и β_2 , соответствующими вводу УЗК в отбеленный и серый чугун. Причем точки выхода акустического луча, идущего от пьезопластин преобразователя, совпадают, что обеспечивает минимальные погрешности измерительной процедуры.

При прозвучивании чугуна с отбеленным слоем головными волнами, возбуждаемыми под разными углами β_1 и β_2 , будут регистрироваться сигналы с различными значениями амплитуды P_i и фазы φ_i . При этом P_i и φ_i являются функциями толщины отбеленного слоя, частоты волны и длины акустической базы L . Установлено, что эффективность контроля глубины отбеленного слоя h указанным методом наиболее высока, когда длина головной волны в чугуна $l \approx (1-2)h$.

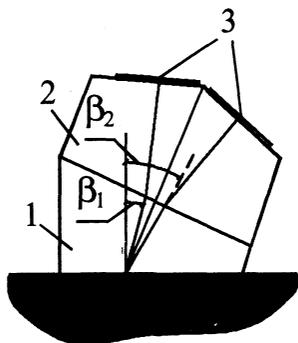


Рис. 6. Составной преобразователь головных волн для контроля поверхностной структуры чугуна с двумя углами ввода: 1 — призма из плексигласа; 2 — призма из дюрала; 3 — пьезоэлементы

Необходимо отметить, что с увеличением глубины отбеленного слоя (вплоть до некоторых граничных значений h^*) измеряемая скорость УЗК является возрастающей функцией h . В случае же, когда объектом исследования служат упрочненные слои на стальных изделиях, то тенденция изменения функции $C_R(h)$ обратная, о чем свидетельствуют данные, приведенные на рис. 7, 8. На рисунках показаны возможности ультразвукового контроля упрочненных слоев стальных изделий, выполненных ТВЧ закалкой и цементацией.

Как следует из данных исследований, скорость рэлеевской волны возрастает с увеличением глубины среза упрочненного слоя плавно и монотонно, если твердость поверхности σ_v также монотонно падает с увеличением глубины среза слоя h_c . При этом изменение скорости C_R тем больше, чем выше частота волны. Как известно [3], такой характер изменения функции $C(h_c)$ 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.

Интересно отметить, что в исследованных образцах с ТВЧ закаленным слоем 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, представляется возможность локализовать область взаимодействия упругих возмущений в слое и получить

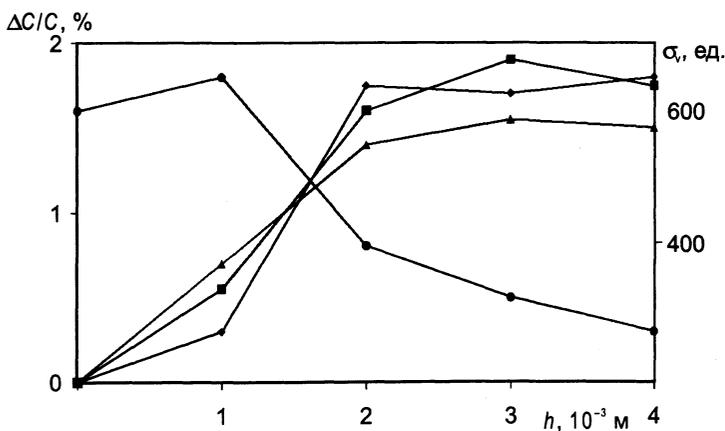


Рис. 7. Скорость рэлеевской волны (\blacktriangle \blacklozenge \blacksquare) и твердость закаленного слоя (\bullet) в зависимости от глубины его среза: \blacktriangle — частота волны 1 МГц; \blacklozenge — 1,8; \blacksquare — 4 МГц

данные о некоторых интегральных параметрах структуры и механических свойствах металла. По-видимому, при воздействии зондирующего сигнала в достаточно в широком диапазоне частот представится возможным оценить не только глубину упрочненного слоя, но его структурные изменения по глубине.

На рис. 8 приведены данные, демонстрирующие возможности ультразвукового метода применительно к определению качества цементации поверхностных слоев металла. Как видно из рисунка, для двух частот $\nu=1,8$ и $3,0$ МГц функция скорости УЗК от глубины среза h_c представляет собой возрастающие зависимости, подобные исследованным при ТВЧ закалке. Как в предыдущем, так и в этом случае причиной такого хода кривой $C(h_c)$ является изменение упругих свойств слоя по глубине, обусловленное структурными превращениями, имеющими место при насыщении металла углеродом. Причем увеличение содержания углерода сопровождается снижением упругих констант, определяющих величину скорости рэлеевской волны:

$$C_R = \frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \mu)}}, \quad (6)$$

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

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показывают высокую эффективность применения ультразвуковых методов для оценки структуры чугунов и стальных изделий. На основании данных измерений скорости УЗК может быть произведена оценка структуры и прочностных свойств серого чугуна. Установлены взаимосвязи между скоростью звука и структурой упрочненных слоев, полученных азотированием, цементацией, ТВЧ закалкой.

Литература

1. Иванушкин П.Н. Неразрушающий контроль чугуна. Киев: Навукова думка, 1983.

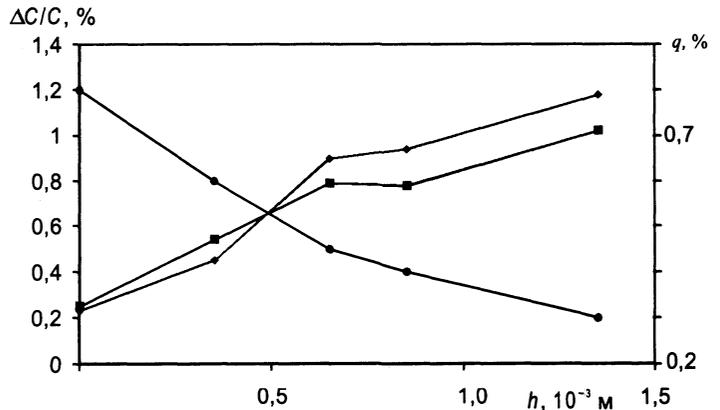


Рис. 8. Скорость рэлеевской волны (■◆) и концентрация углерода (●) в зависимости от глубины среза цементированного слоя: ■ — частота УЗК — 1,8 МГц; ◆ — 3 МГц

2. Гуляев А.П. *Металловедение*. М.: *Металлургия*, 1986.
3. Крауткремер Й., Крауткремер Г. *Ультразвуковой контроль*. М.: *Машиностроение*, 1991.
4. Воронкова Л.П. *Ультразвуковой контроль чугуна*. М.: *ЦНИИМАШ*, 1996.
5. Табачник В.П., Горкунов Э.С., Чернова Г.С. *Контроль цементированного слоя зубчатых колес // Дефектоскопия*. 1998. №9. С.41-49.
6. Debej J. Využití Kontrolu tvaru grafitu pomocí ultrazvuku. *Slevarenství*. 1985. Vol.33. N11. P. 442-444.
7. Blower M. Semiautomatic ultrasonic work station improves reability of testing. *Foundryman*. 1991. Vol.84. N11. P. 448-449.
8. Stephan C.H., Chesney H.L. Computer-aided Measurement of Case Depth and Surface Hardness in Automobile Axle Shafts. *Materials Evaluation*, 42, December 1984. P. 1612-1618.
9. Баев А.Р., Асадчая М.В., Филиппов К.А., Артеменко Я.В. Влияние геометрии контактной поверхности твердых тел и жидкой контактной среды на распространение подповерхностных волн // *Достижения физики неразрушающего контроля: Сб. тр. Ин-та прикладной физики НАН Беларуси / Под ред. П. П. Прохоренко*. Мн.: *Ин-т прикладной физики НАН Беларуси*, 2003. С. 224-236.
10. Вopilкин А.Х., Шишов А.П., Ермолов И.Н., Басацкая Л.В. *Ультразвуковой способ определения твердости поверхностно-закаленных слоев изделий: А. с. 729503 СССР*.