

## REFERENCES

1. Berdnikov V.I., Gudim Yu.A. Thermodynamic properties of binary metallic systems containing intermetallic compounds. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 5, pp. 37–41. (In Russ.).
2. Berdnikov V.I., Gudim Yu.A. Forecasting of thermodynamic properties of liquid intermetallic solutions. *Izvestiya VUZov Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 7, pp. 34–37. (In Russ.).
3. Desai P.D. *J. Phys. Chem. Ref. Data*. Vol. 16, no. 1, 1987, pp. 110–124.
4. Batalin G.I., Beloborodova E.A., Kazimirov V.P. *Termodinamika i stroenie zhidkikh splavov na osnove alyuminiya* [Thermodynamics and structure of liquid aluminum-based alloys]. Moscow: Metallurgiya. 1983. 159 p. (In Russ.).
5. Moiseev G.K., Vatolin N.A., Marshuk L.A., Il'inykh N.I. *Temperaturnye zavisimosti privedennoi energii Gibbsa nekotorykh neorganicheskikh veshchestv (al'ternativnyi bank dannykh ASTRA. OWN)* [Temperature dependence of the reduced Gibbs energy of some inorganic substances (alternative database ASTRA.OWN)]. Ekaterinburg: UrO RAN. 1997. 231 p. (In Russ.).
6. Il'inykh N.I., Moiseev G.K., Kulikova T.V., Shunyaev K.Yu., Leont'ev L.I., Lisin V.L. Thermodynamic characteristics of the Fe–Al melt. *Izv. Chelyabinskogo nauchnogo tsentra*. Issue 2. (19). 2003, pp. 32–36. (In Russ.).
7. Tyurin A.G. Diagrams of chemical and electrochemical stability of hot metal coatings on low-carbon steel. *Vestnik Chelyabinskogo un-ta. Seriya 4. Khimiya. Nauchnyi zhurnal*. Chelyabinsk: ChGU. 1996, pp. 81–92. (In Russ.).
8. Morachevskii A.G., Mokrievich A.G., Maiorova E.A. Application of the model of associated solution to liquid metal systems with negative deviations from Raoult's law. *Zhurnal prikladnoi khimii*. Vol. 66. Issue 7. 1993, pp. 1441–1447. (In Russ.).
9. Batalin G.I. *Termodinamika zhidkikh splavov na osnove zheleza* [Thermodynamics of liquid iron-based alloys]. Kiev: Vishcha shkola. 1980. 132 p. (In Russ.).
10. Zubov V.L., Gasik M.I. *Elektrometallurgiya ferrosilitsiya* [Electrometallurgy of ferrosilicon]. Dnepropetrovsk: Sistemnye tekhnologii. 2002. 704 p. (In Russ.).
11. «HSC Chemistry». Antti Roine – Pori (Finland): Outokumpu Research Oy, Information Service, 2006.

Received September 9, 2014

УДК 620.183+620.179.16

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРНА МЕТАЛЛА ПО АКУСТИЧЕСКИМ СТРУКТУРНЫМ ШУМАМ\*

**Муравьев В.В.<sup>1</sup>**, д. т. н., профессор, зав. кафедрой «Приборы и методы  
контроля качества» (vmuraviev@mail.ru)

**Котоломов А.Ю.<sup>2</sup>**, к.т.н., гл. сварщик

**Байтеряков А.В.<sup>1</sup>**, аспирант кафедры «Приборы и методы контроля качества»

**Дедов А.И.<sup>1</sup>**, аспирант кафедры «Приборы и методы контроля качества»

<sup>1</sup> Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова  
(426069, Россия, Удмуртская Республика, Ижевск, ул. Студенческая, д. 7)

<sup>2</sup> ОАО «Газпром Трансгаз Чайковский»  
(617760, Россия, Пермский край, Чайковский, Приморский бульвар, 30)

**Аннотация.** В развитие ультразвуковой структуроскопии предложен новый подход к оценке структуры металла по значению интегрального уровня акустических структурных шумов. Дано определение акустическим структурным шумам металла, методика оценки которых обоснована с позиций выбора частотного диапазона, зоны контроля, опорного сигнала, алгоритма обработки сигнала. На примере стали 45 представлены экспериментальные результаты использования структурных шумов для определения размера зерен. Выявлена однозначная зависимость между величиной зерен в образцах исследуемой стали 45, полученных после различных видов термической обработки, и усредненной амплитудой структурных шумов. Полученная зависимость удовлетворительно согласуется с теоретическими представлениями.

**Ключевые слова:** акустические структурные шумы, структуроскопия, рассеяния ультразвуковых волн, размер зерна.

Большинство методов оценки структурного состояния металла основано на измерении скорости распространения и затухания ультразвуковых (УЗ) волн [1–3]. Использование электромагнитно-акустического метода возбуждения-приема УЗ волн увеличивает возможности структуроскопии [4–6]. Значительная часть работ посвящена исследованиям напряженно-деформированного состояния изделий и термического упрочнения металлов по параметрам УЗ волн [7–11].

\* Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект № 12-У-2-1013), Программы стратегического развития ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» на 2012–2016 гг. (проект ПСР/М2/Н2.5/МВВ).

Исследования влияния величины зерна на скорость распространения акустических волн в разных металлах и сплавах представлены в работах [1, 12]. Особый интерес представляют исследования влияния накопления усталостных повреждений на акустические характеристики [13–15].

В данной работе представлен новый подход к структуроскопии металла, основанный на использовании в качестве информативного параметра усредненного значения амплитуды структурных шумов.

Акустическая волна, распространяясь в поликристаллическом теле, порождает рассеянные волны, которые, распространяясь в произвольных направлениях

«не поддерживают» основной волновой поток. Коэффициент затухания УЗ волны, вызванный рассеянием  $\delta$ , зависит от соотношения между длиной волны  $\lambda$  и средним размером зерна  $D_g$ . Для большинства конструкционных материалов выполняется условие  $D_g \ll \lambda$  ( $D_g = 20 \div 100$  мкм,  $\lambda = 0,5 \div 6$  мм в диапазоне частот от 1 до 5 МГц). Рассеяние в этой области называется рэлеевским и происходит на частицах размером меньше длины волны. При этом коэффициент  $\delta$  оказывается пропорциональным третьей степени диаметра зерна  $D_g^3$  и четвертой степени частоты  $f^4$ .

В частности, для малоуглеродистой стали коэффициент затухания продольных волн  $\delta$  может быть рассчитан по упрощенной формуле

$$\delta = 20 f^4 D_g^3, \quad (1)$$

где  $f$  – частота, МГц;  $D_g$  – средний диаметр зерна, мм.

Импульсы, образовавшиеся в результате обратного рассеяния ультразвука на неоднородностях структуры, формируют структурный шум, имеющий вид отдельных близко расположенных пиков на индикаторе дефектоскопа. В зависимости от случайного соотношения фаз отдельных рассеянных импульсов они могут усилить или ослабить друг друга.

Используя формулы [12], можно рассчитать средний уровень структурных шумов  $U_{sn}$  в ближней (2) и дальней (3) зонах для совмещенного преобразователя:

$$U_{sn} = U_0 \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{\delta C \tau}{\pi S}} e^{-2\delta r}, \quad (2)$$

$$U_{sn} = U_0 \frac{1}{2r} \sqrt{\frac{\delta C \tau S}{2\pi}} e^{-2\delta r}, \quad (3)$$

где  $U_0$  – амплитуда излученного сигнала;  $C$  – скорость УЗ волн в среде;  $\tau$  – длительность УЗ импульса;  $S$  – площадь преобразователя;  $r$  – расстояние от преобразователя до области рассеяния.

Представленные формулы (1) – (3) позволяют исследовать влияние размеров зерна  $D_g$  и параметров преобразователя  $f$ ,  $S$ ,  $\tau$  на уровень структурных шумов. С одной стороны, уровень структурных шумов пропорционален коэффициенту затухания:  $U_{sn} \sim \sqrt{\delta} \sim \sqrt{D_g^3}$ , с другой стороны, уровень структурных шумов уменьшается по экспоненциальному закону за счет затухания:

$$U_{sn} \sim \exp(-2\delta r) = \exp\left[-(0,12 f + 20 D_g^3 f^4) r\right]. \quad (4)$$

Амплитуда акустических структурных шумов, как правило, существенно меньше уровня донных сигналов, поэтому регистрация структурных шумов требует использования высоких коэффициентов усиления. Предлагается использование в качестве опорного сигнала амплитуды «пролаза» рэлеевской волны. В отличие от донного сигнала, сигнал «пролаза» рэлеевской

волны является наиболее стабильным при изменении качества контакта, шероховатости поверхности и не зависит от состояния донной поверхности [16].

В экспериментах использовали ультразвуковой дефектоскоп ДУК-66, РС преобразователь П112-5,0-Ø8. Для сохранения и дальнейшей обработки электрического сигнала структурных шумов, к выходу VideoSignal дефектоскопа ДУК-66 подключен цифровой осциллограф RIGOL DS1102C, синхронизированный с дефектоскопом через линию синхронизации.

Результаты регистрации донного импульса (ДИ) и «пролаза» рэлеевской волны представлены на рис. 1. Вид усиленных сигналов структурных шумов в зоне контроля между импульсом «пролаза» рэлеевской волны и ДИ иллюстрирует структурные шумы в исследуемом образце.

Ввиду того, что уровень структурных шумов является результатом интерференции волн, многократно рассеянных от зерен материала, оценивается интегральная характеристика структурного шума, определяемая как результат интегрирования структурного шума по всей рабочей зоне после интерполяции оцифрованного сигнала.

Для апробации разработанной методики исследования структурных шумов подготовлены образцы из круглого проката конструкционной стали 45 в виде дисков с различными режимами термической обработки, реализующими различные структуры с разным номером зерна. Основные характеристики образцов приведены в таблице.

Фотографии микроструктур шлифов плоской поверхности образцов после травления в 4 % -ном водном растворе  $\text{HNO}_3$ , полученные с помощью микроскопа Альтами МЕТ 1М, представлены на рис. 2. Результаты металлографической оценки размеров зерна представлены в таблице.

На рис. 3 приведена зависимость отношения структурный шум  $U_{sn}$  – «пролаз» рэлеевской волны  $U_R$  от диаметра зерна для исследованных образцов. Зависимость отношения структурный шум  $U_{sn}$  – донный сигнал  $U_{bp}$  практически совпадает с приведенным графиче-



Рис. 1. Осциллограмма импульсов на экране осциллографа: «пролаз», зона структурных шумов, донный импульс

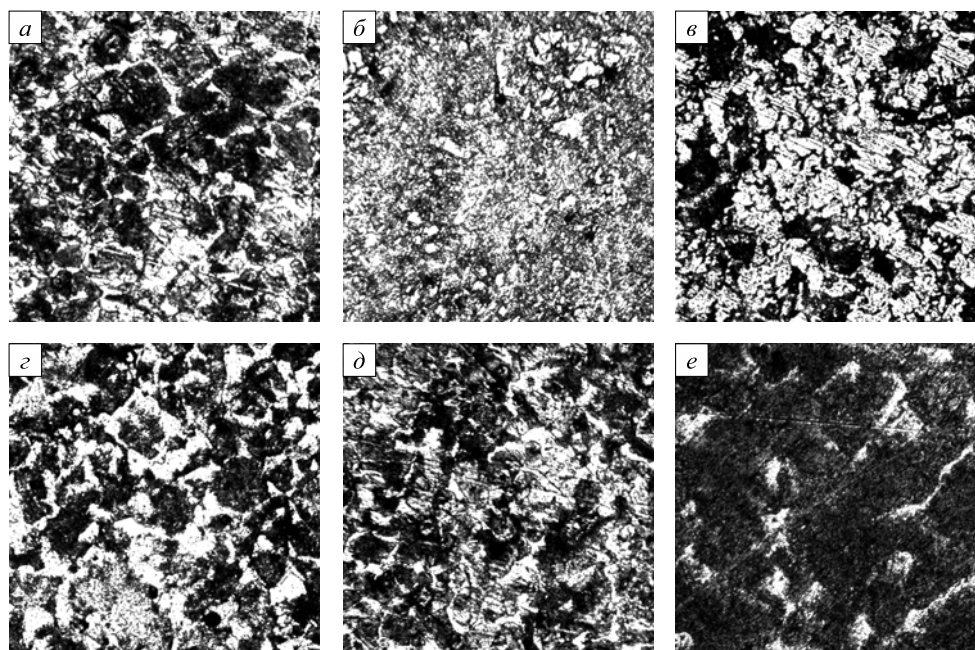


Рис. 2. Металлография по номерам образцов к таблице:  
а, в, г, д –  $\times 200$ ; б –  $\times 500$ ; е –  $\times 400$

#### Характеристика образцов для исследований

Номер образца	Вид термической обработки	Температура нагрева под закалку, °С	Номер зерна $G$ / средний диаметр зерна $D_g$ , мкм	Структура
1	Поставка (нормализация)	850	5 / 62	Перлит + феррит
2	Закалка, вода	780	8 / 22	Мартенсит
3	Закалка, масло	850	7 / 31	Мартенсит + троостит
4	Закалка + улучшение	850 + 600	6 / 44	Сорбит
5	Поставка (нормализация)	850	5 / 62	Феррит + перлит
6	Перегрев под отжиг	1050	3 / 125	Крупнозернистый феррит + перлит

ком. Интервалы отклонений для экспериментальных точек по горизонтали соответствуют отклонениям от среднего значения диаметра зерна  $D_g$  в соответствии

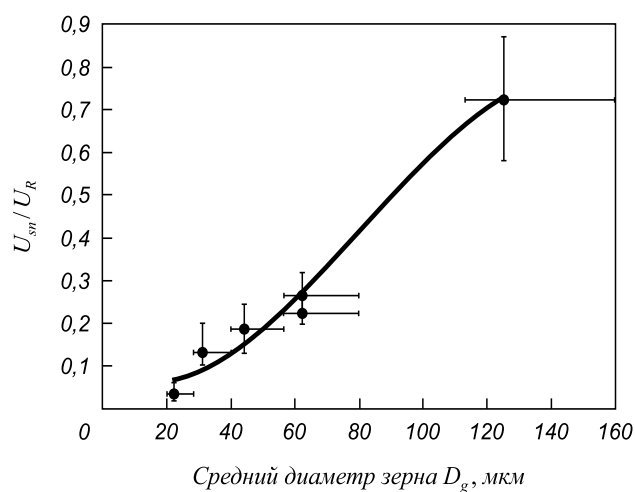


Рис. 3. Зависимость структурного шума от диаметра зерна

с ГОСТ 5639-82. Интервалы отклонений по вертикали соответствуют отклонениям уровня структурных шумов в различных областях исследуемых образцов. Отметим, что отклонение уровня структурных шумов от среднего значения находится в пределах, соответствующих разбросам по величине зерна относительно среднего значения.

Наличие однозначной зависимости уровня структурных шумов от размера зерна свидетельствует о возможности использования разработанной методики для оценки структуры металла. При этом разброс в уровне структурных шумов свидетельствует о структурных различиях по областям образца.

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований показывает, что амплитуда УЗ волн, отраженных от структурных элементов, прямо пропорциональна размеру зерен в термически обработанных образцах исследуемой стали 45. Полученная зависимость удовлетворительно согласуется с теоретическими представлениями.



Разработанный алгоритм структуроскопии с помощью структурных шумов может быть автоматизирован и применен на этапе производства для выходного контроля качества металлических изделий, а также для контроля текущего состояния эксплуатируемых деталей.

**Выводы.** В развитие УЗ структуроскопии предложен новый подход к оценке структуры металла по значению интегрального уровня акустических структурных шумов.

Методика оценки акустических структурных шумов металла обоснована с позиций выбора частотного диапазона, зоны контроля, опорного сигнала («пролаз» рэлеевской волны), алгоритма обработки сигнала.

Выявлена однозначная зависимость между величиной зерен в образцах исследуемой стали 45, полученных после различных видов термической обработки, и усредненной амплитудой структурных шумов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Муравьев В.В., Бояркин Е.В. Неразрушающий контроль структурно-механического состояния рельсов текущего производства по скорости ультразвуковых волн // Дефектоскопия. 2003. № 3. С. 24 – 33.
2. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Кокорина Е.Н. Акустическая структуроскопия и дефектоскопия прутков из стали 60С2А при производстве пружин с наноразмерной структурой // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 4. С. 66 – 70.
3. Муравьев В.В., Коробейникова О.В., Платунов А.В. Влияние напряженно-деформированного и структурного состояния в проволоках на основные закономерности распространения стержневой волны Похгаммера // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 10. С. 44 – 48.
4. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Платунов А.В. и др. Исследование акустоупругих характеристик стержневой волны в термически обработанных стальных проволоках электромагнитно-акустическим методом // Дефектоскопия. 2012. № 8. С. 3 – 15.
5. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Кокорина Е.Н. Контроль качества термической обработки прутков из стали 60С2А электромагнитно-акустическим методом // Дефектоскопия. 2013. № 1. С. 20 – 32.
6. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Кокорина Е.Н. и др. Оптимизация систем подмагничивания проходных электромагнитно-акустических преобразователей объемных волн для неразрушающего контроля пруткового проката // Датчики и системы. 2013. № 2. С. 2 – 9.
7. Буденков Г.А., Муравьев В.В., Коробейникова О.В. Исследование напряженно-деформированного состояния ободьев цельнокатаных вагонных колес методом акустической тензометрии // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2009. Т. 6. № 3. С. 111 – 117.
8. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Стрижак В.А. и др. Оценка остаточных напряжений в ободьях вагонных колес электромагнитно-акустическим методом // Дефектоскопия. 2011. № 8. С. 16 – 28.
9. Муравьев В.В., Петров С.Ю., Платунов А.В. и др. Распределение остаточных напряжений при электроконтактном упрочнении бандажей локомотивных колес // Технология машиностроения. 2011. № 9. С. 42 – 45.
10. Муравьев В.В., Волкова Л.В., Балобанов Е.Н. Оценка остаточных напряжений в бандажах локомотивных колес методом акустоупругости // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 22 – 28.
11. Муравьев В.В., Волкова Л.В. Оценка величины натяга бандажей локомотивных колес методом акустоупругости // Дефектоскопия. 2013. № 9. С. 40 – 46.
12. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Байтеряков А.В. и др. Методика определения акустических структурных шумов металла // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 1. С. 143 – 148.
13. Зуев Л.Б., Целлермаер В.Я., Громов В.Е., Муравьев В.В. Ультразвуковой контроль накопления усталостных повреждений и восстановление ресурса деталей // Журнал технической физики. 1997. Т. 67. № 9. С. 123 – 125.
14. Зуев Л.Б., Соснин О.В., Чиракадзе Д.З. и др. Акустический контроль долговечности стальных образцов и восстановление их ресурса // Прикладная механика и техническая физика. 1998. Т. 39. № 4. С. 180 – 183.
15. Зуев Л.Б., Муравьев В.В., Данилова Ю.С. О признаке усталостного разрушения сталей // Письма в «Журнал технической физики». 1999. Т. 25. № 9. С. 31 – 34.
16. Буденков Г.А., Недзвецкая О.В. К расчету преобразователей рэлеевских волн // Дефектоскопия. 1992. № 10. С. 76 – 81.

© 2014 г. *Муравьев В.В., Котоломов А.Ю., Байтеряков А.В., Дедов А.И.*  
Поступила 2 сентября 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2014. Vol. 57. No. 11, pp. 65–69.

#### THE METHODOLOGY OF DETERMINING THE GRAIN SIZE BY ACOUSTIC STRUCTURAL NOISE OF STEEL

*Murav'ev V.V.<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Devices and methods for quality control"*

(vmuraviev@mail.ru)

*Kotolomov A.Yu.<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Chief Welder*

*Baiteryakov A.V.<sup>1</sup>, Undergraduate Student*

*Dedov A.I.<sup>1</sup>, Postgraduate*

<sup>1</sup> *Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya str., Izhevsk, Udmurtian Republic, 426069, Russia)*

<sup>2</sup> *JSC Gazprom Transgaz Tchaikovsky (30, Primorskii bul'var, Tchaikovsky, Perm Territory, 617760, Russia)*

**Abstract.** A new approach to the evaluation of the metal structure based on the value of the integral structural level of acoustic

noise was found in the development of ultrasonic structuroscopy. There was made the definition of acoustic structural noise of metal. Methods of assessing structural acoustic noise were justified from the position of selection of the frequency range, the control zone, a reference signal and the signal processing algorithm. The experimental results of the use of structural noise to determine the size of the grains were shown on the example of steel 45. Revealed unambiguous relationship between grain size in the samples of investigated steel 45 obtained after the various types of heat treatment and the average amplitude of the structural noise. The obtained dependence is in satisfactory agreement with the theoretical concepts.

**Keywords:** ultrasound, structural noise, dispersion of ultrasound, grain size.

## REFERENCES

1. Murav'ev V.V., Boyarkin E.V. Nondestructive testing of the structural-mechanical state of currently produced rails on the basis of the ultrasonic wave velocity. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2003, no. 3 (39), pp. 187–197.
2. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Kokorina E.N. Acoustic structural testing and nondestructive testing of steel rods (60C2A) 60Si2A in the production of nanoscaled structure springs. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 4, pp. 66–70. (In Russ.).
3. Murav'ev V.V., Korobeinikova O.V., Platonov A.V. The impact of strain-deformed and structure state of wire on the main regularizes of Pohhammer's C-type wane propagation. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2009, no. 10, pp. 44–48. (In Russ.).
4. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Platonov A.V., Zlobin, D.V. Investigations of acoustoelastic characteristics of rod waves in heat-treated steel wires using the electromagnetic-acoustic method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2012, no. 8 (48), pp. 447–456.
5. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Kokorina E.N. Quality control of the heat treatment of rods of steel 60Si2A by electromagnetic acoustic method. *Defektoskopiya*. 2013, no. 1, pp. 20–32. (In Russ.).
6. Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Kokorina E.N., Sterkhov V.D., Malyutin D.V. Optimization of bias-through electromagnetic acoustic transducer volumetric waves for nondestructive testing of bar stock. *Datchiki i sistemy*. 2013, no. 2, pp. 2–9. (In Russ.).
7. Budenkov G.A., Murav'ev V.V., Korobeinikova O.V. Investigation of the stress-strain state of solid-rolled rims of wagon wheels by acoustic strain. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2009, vol.6, no. 3, pp. 111–117. (In Russ.).
8. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Balobanov E.N., Volkova L.V. Evaluation of residual stresses in the rims of wagon wheels by electromagnetic-acoustic method. *Defektoskopiya*. 2011, no. 8, pp. 16–28. (In Russ.).
9. Murav'ev V.V., Petrov S.Yu., Platonov A.V., Balobanov E.N. Distribution of residual stresses at electrocontact hardening of bandages of locomotive wheels. *Tekhnologiya mashinostroeniya*. 2011, no. 9, pp. 42–45. (In Russ.).
10. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Balobanov E.N. Estimation of residual stresses in locomotive wheel treads using the acoustoelasticity. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2013. Vol. 49, no. 7, pp. 382–386.
11. Murav'ev V.V., Volkova L.V. Evaluation of the interference value for the treads of locomotive wheels by the acoustic elasticity method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2013. Vol. 49, no. 9, pp. 524–529.
12. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Baiteryakov A.V., Dedov A.I. Method of determining the acoustic noise of structural metal. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2013, no. 1, pp. 143–148. (In Russ.).
13. Zuev L.B., Tsellermaer V.Ya., Gromov V.E., Murav'ev V.V. Ultrasonic monitoring of the accumulation of aging damage and recovery of the useful lifetime of industrial parts. *Technical Physics*. 1997. Vol. 42, no. 9, pp. 1094–1096.
14. Zuev L.B., Sosnin O.V., Chirakadze D.Z., Gromov V.E., Murav'ev V.V. Acoustic control of durability of steel samples and restore of their life time. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 1998. Vol. 39, no. 4, pp. 180–183. (In Russ.).
15. Zuev L.B., Murav'ev V.V., Danilova Yu.S. Criterion for fatigue failure in steels. *Technical Physics Letters*. 1999. Vol. 25, no. 5, pp. 352–353.
16. Budenkov G.A., Nedzvetskaya O.V. On the calculation of the Rayleigh wave inverters. *Defektoskopiya*. 1992, no. 10, pp. 76–81. (In Russ.).

**Acknowledgements.** This work was supported by the Basic Research Program of UB RAS (project no. 12-U-2-1013) and by the Program of strategic development of the VPO “Kalashnikov IzhSTU” for the period 2012 – 2016 (project PSR / M2 / N2.5 / MVV).

Received September 2, 2014