

УДК 620.111

DOI 10.18698/0536-1044-2016-9-39-44

Анализ возможности применения низкотемпературных сплавов в качестве вспомогательного слоя между пьезоэлектрическим преобразователем и объектом контроля со сложной геометрической поверхностью

А.Л. Ремизов, А.А. Дерябин, М.А. Халилов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

The Analysis of the Possible Use of Low-Temperature Alloys as an Auxiliary Layer between the Piezoelectric Transducer and a Test Piece with Complex Geometry

A.L. Remizov, A.A. Deryabin, M.A. Khalilov

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1



e-mail: aad1_2000@mail.ru, khalilov.maxim@gmail.com

i Рассмотрена возможность применения вспомогательного слоя из низкотемпературных сплавов Вуда и Розе между пьезоэлектрическим преобразователем и объектом контроля с непрерывно изменяющимся радиусом кривизны поверхности и толщиной. Основное назначение вспомогательного слоя из сплавов Вуда и Розе заключается в обеспечении надежного акустического контакта между пьезоэлектрическим преобразователем и объектом контроля со сложной геометрической поверхностью. Материалы вспомогательного слоя подобраны таким образом, что значения акустических импедансов близки к показателям углеродистых и легированных сталей. Этот факт обеспечивает минимальное отражение продольной волны от границы системы сталь — вспомогательный слой, что позволяет контролировать эту систему как единое целое изделие, а следовательно, и тонкостенные изделия (толщиной менее 1 мм). Анализ результатов расчета уравнения акустического тракта для подобных систем и экспериментальные исследования показали, что применение вспомогательных слоев снижает чувствительность контроля (площадь минимального дефекта, который можно выявить, соответствует площади дискового отражателя радиусом 1,4 мм), что неприемлемо для диагностики ответственных изделий.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, слоистая среда, импеданс, уравнение акустического тракта, чувствительность контроля.

i The possibility of using low-temperature Wood's and Rose's alloys as an auxiliary layer between the piezoelectric transducer and a test piece with continuously changing surface curvature radius and thickness is considered. The main purpose of the auxiliary layer is to provide a close acoustic contact between the piezoelectric transducer and the test piece with complex geometry. The materials of the auxiliary layer are selected so that the acoustic impedance values are close to those of carbon and alloy steels. This provides minimum reflection of the longitudinal wave from the boundary of the 'steel — auxiliary layer' system.

This makes it possible to control the system as a whole and therefore test thin-walled pieces (less than 1 mm thickness). The experiments and analysis of the calculations of the acoustic duct for similar systems have shown that the application of the auxiliary layer reduces test sensitivity (the minimum defect that can be detected equals the square of a disk reflector with the 1.4 mm radius), and thus is unacceptable for testing critical pieces.

Keywords: ultrasonic testing, layered medium, impedance, acoustic duct equation, test sensitivity.

Всем практикующим дефектоскопистам известно, что особую трудность для ультразвукового контроля представляют объекты со сложной геометрической поверхностью. Кривизна поверхностей объектов контроля (ОК) требует «притирки» поверхности протектора пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП), т. е. придания протектору формы поверхности ОК. Однако не всегда поверхность ОК может иметь один радиус кривизны, на некоторых ОК этот радиус может непрерывно меняться (например, у лопаток насосов и авиационных двигателей). При таком изменении радиуса кривизны «притирка» ПЭП не даст желаемого результата.

Цель работы — разработка технического решения, которое позволит устранить влияние кривизны поверхностей на контроль объекта.

Рассмотрим возможность использования легкоплавких материалов для устранения влияния кривизны поверхностей на контроль. Суть метода заключается в нанесении легкоплавких покрытий (сплавов Вуда или Розе) на поверхность для устранения кривизны (рис. 1). Для оценки влияния подобных покрытий на чувствительность контроля необходимо провести расчеты распространения волн в слоистых средах.

При выборе материала особое внимание уделялось температуре его плавления, так как она может повлиять на структуру контролиру-

емого материала и технологичность процесса удаления наполнителя. С учетом этого в качестве материалов были выбраны сплавы Розе и Вуда.

Технические характеристики сплавов

	Розе	Вуда
Содержание, % (по массе):		
олово	25	12,5
свинец	25	25
висмут	50	50
кадмий	—	12,5
Температура плавления, °С	94	68,5
Скорость продольной волны*, м/с	2 350	2 330
Коэффициент затухания продольной волны при частоте 2,5 МГц*, дБ/мм	1,5	1,6
Плотность, кг/м ³	9 720	9 720

* Экспериментальные данные.

Анализ приведенных характеристик показал, что более подходящим для исследований является сплав Розе, в котором затухание продольной волны меньше, а скорость продольной волны больше, чем в сплаве Вуда.

При этом влияние скорости волны на результаты контроля требует некоторого пояснения. Первой средой назовем ту среду, из которой падает волна на границу, а второй — среду,

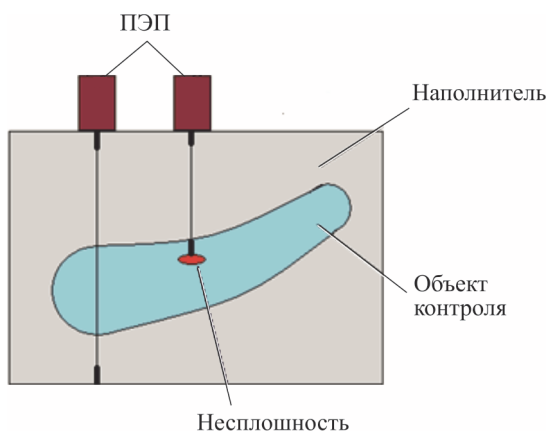


Рис. 1. Схема предлагаемого контроля

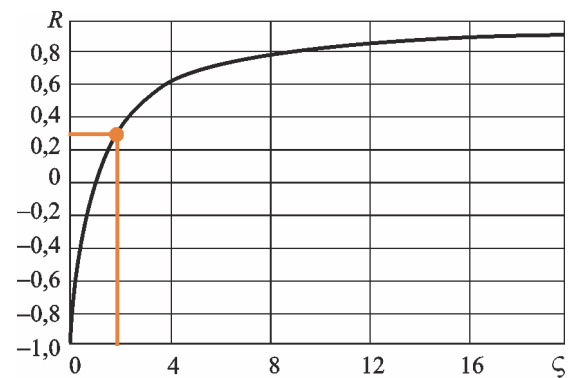


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения продольной волны на границе раздела сред R от параметра ζ :

• — значение коэффициента R для сплава Розе

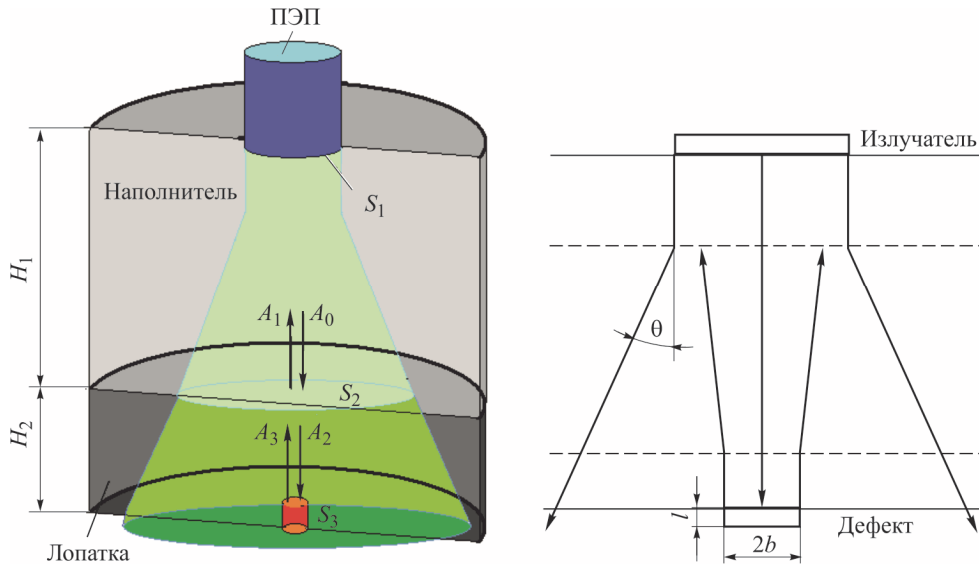


Рис. 3. Расчетная схема

на которую падает волна. Согласно работам [1–12], скорость распространения волны и плотность материала оказывают непосредственное влияние на коэффициенты отражения R и прозрачности D волн на границах сред:

$$R = \frac{\zeta - 1}{\zeta + 1}; \quad D = \frac{2\zeta}{\zeta + 1}; \quad \zeta = \rho_2 c_2 / (\rho_1 c_1),$$

где c_1, c_2 и ρ_1, ρ_2 — скорости звука и плотности соответственно первой и второй среды.

Вторая среда — металл ($c_2 = 5\,900$ м/с, $\rho_1 = 7\,800$ кг/м³), первая среда — наполнитель. Таким образом, более предпочтительным является материал наполнителя с характеристиками, обеспечивающими значения ζ , приближающиеся к единице, так как в этом случае значения коэффициента отражения продольной волны на границе сред приближаются к нулю (рис. 2). Для сплава Розе коэффициент $R = 0,3$.

Для расчета акустического тракта была принята схема, приведенная на рис. 3.

Согласно работам [2–6, 9–12], уравнение акустического тракта можно представить в следующем виде:

$$\frac{A}{A_0} = \exp\{-2[\delta_1 H_1 + \delta_2 (H_2 - l)]\} \times S_1 \frac{1}{2\lambda_1 H_1} S_2 \frac{1}{2\lambda_2 H_2} A_d D_{12} D_{21},$$

где δ_1, δ_2 и λ_1, λ_2 — коэффициенты затухания и длины волн соответственно в первой и второй среде; $A_d = \pi b^2 / \lambda_2^2$ — для дефектов, где диаметр больше длины волны (b — радиус отражателя);

$A_d = b^3 / \lambda_2^3$ — для дефектов, где диаметр меньше длины волны; $S_1 = \pi a^2$; $S_2 = \pi[a + H_1 \operatorname{tg}(\theta/2)]^2$, $\theta = \arcsin(0,54\lambda_1/a)$; D_{12}, D_{21} — коэффициенты прозрачности границ по амплитуде.

Поскольку значения толщин ОК могут быть соизмеримы с длиной волны, коэффициенты прозрачности границ, согласно работе [2] (рис. 4), определяются по выражению

$$D = \frac{4Z_3 Z_2}{(Z_3 + Z_2)(Z_2 + Z_1)e^{-ik_{2z}d} + (Z_3 - Z_2)(Z_2 - Z_1)e^{ik_{2z}d}},$$

где $Z_j = \rho_j c_j$ ($j = 1, 2, 3$); i — мнимая единица; k_{2z} — проекция волнового числа распростра-

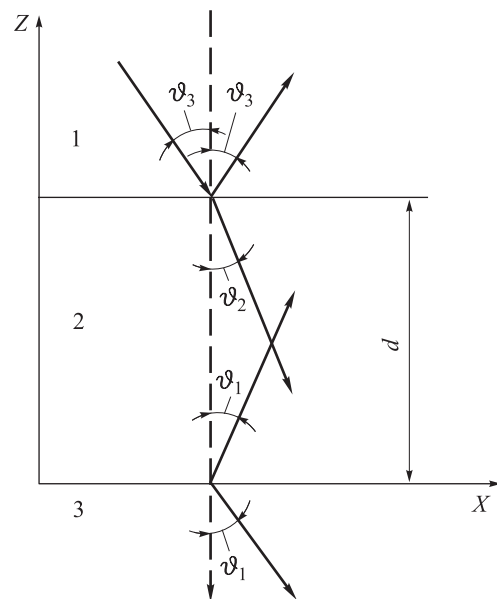


Рис. 4. Расчетная схема для определения коэффициентов прозрачности границ; φ_i — углы распространения волн в средах

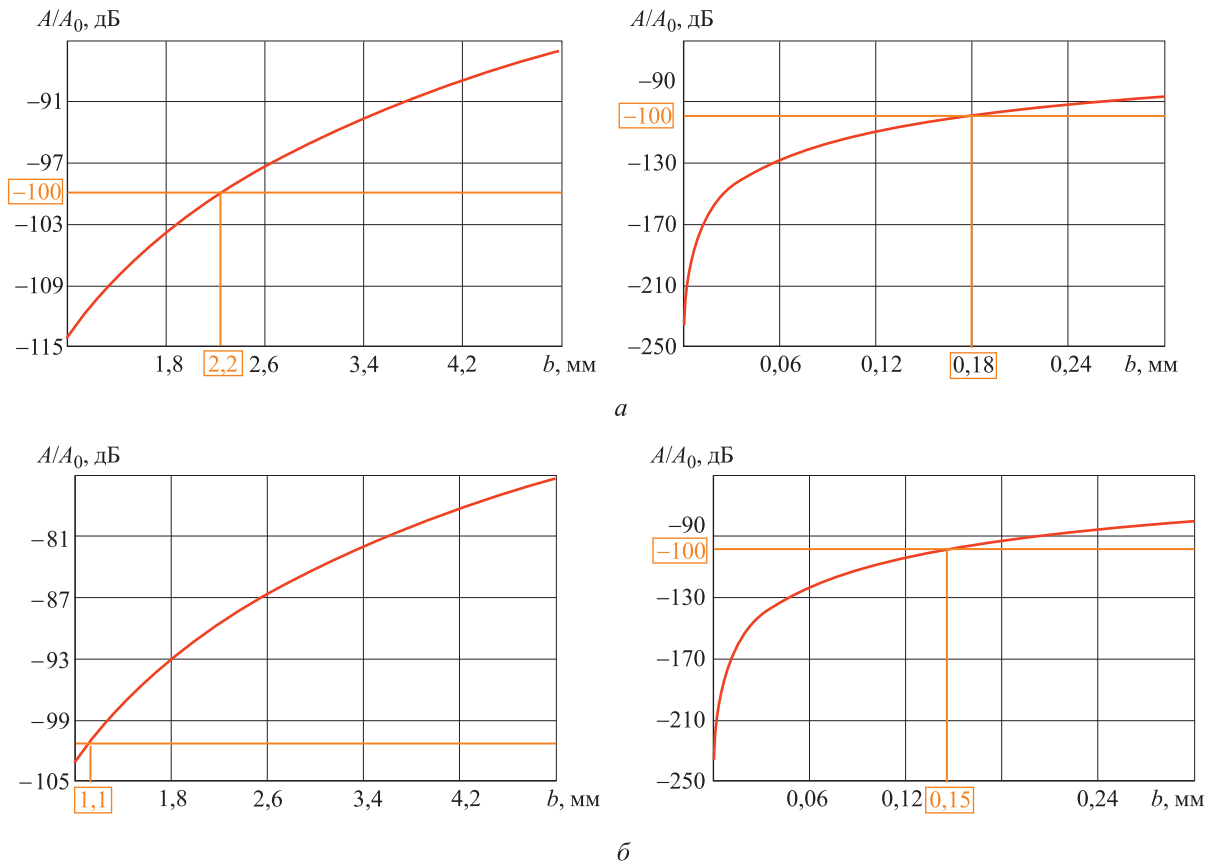


Рис. 5. Расчетные зависимости отношения A/A_0 от радиуса отражателя b для титановых сплавов (а) и жаропрочных сталей (б) при частоте волны $f = 10$ МГц (слева) и $f = 5$ МГц (справа)

нящейся волны на ось OZ во второй среде, $k_{2z} = \sqrt{k_2^2 - k_{2x}^2}$ ($k_2 = 2\pi f/c_2$, f — частота волны).

Расчеты показали, что теоретически можно обнаружить несплошности в виде плоскодонных отражателей следующих размеров:

- для титановых сплавов при $f = 5$ МГц — $b = 0,18$ мм, а при $f = 10$ МГц — $b = 2,2$ мм
- для жаропрочных сталей при $f = 5$ МГц — $b = 0,15$ мм, а при $f = 10$ МГц — $b = 1,1$ мм.

На рис. 5 приведены результаты расчетов для титановых сплавов и жаропрочных сталей, оранжевым цветом показаны предельный ко-

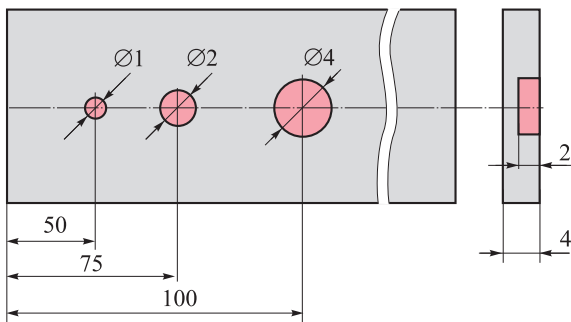


Рис. 6. Схема конструкции исследуемого образца

эффициент усиления прибора (100 дБ) и минимальное значение радиуса отражателя b .

Критерием обнаружения несплошностей принято максимальное значение коэффициента усиления дефектоскопа УД 2-70, равное 100 дБ. Уменьшение чувствительности при увеличении частоты связано с ростом коэффициента затухания δ .

Для проверки результатов расчетов проведены экспериментальные исследования образца, изготовленного из стали Ст-20 (рис. 6), согласно схеме, приведенной на рис. 7.

При исследовании использован дефектоскоп УД 2-70 с комплектом преобразователей СО-2. Частота волны составляла 5 МГц.

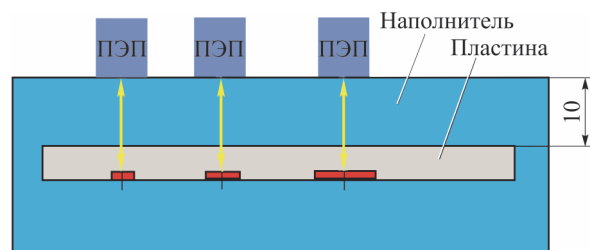


Рис. 7. Схема проведения эксперимента

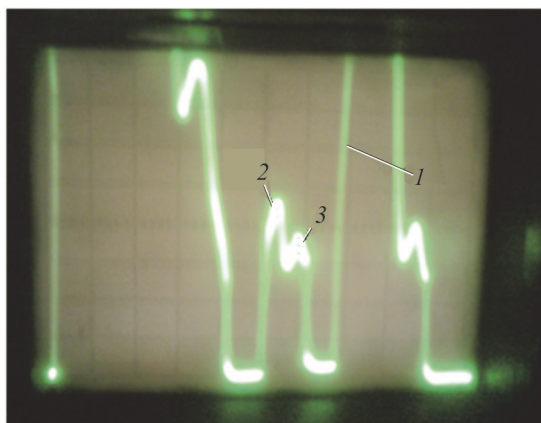


Рис. 8. Обнаружение отражателя радиусом $b = 1$ мм:
1 — донный; 2 — граница; 3 — отражатель радиусом $b = 1$ мм

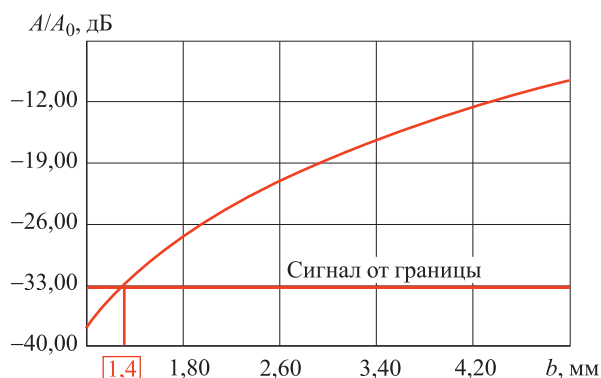


Рис. 9. Расчетная зависимость отношения A/A_0 от радиуса отражателя b , соответствующая предельным возможностям метода (минимальный радиус дискового отражателя 1,4 мм)

В результате работы плоскодонный отражатель радиусом $b = 0,5$ мм обнаружен не был, хотя теоретические расчеты показали, что для сталей возможно выявление плоскодонного отражателя радиусом $b = 0,15$ мм.

Анализ экспериментальных данных показал, что на обнаружение несплошностей влияет отражение от границ, т. е. отраженный от них сигнал близок по времени к сигналу от отражателя, поэтому сигналы «сливаются» — становятся неразличимыми (рис. 8).

Указанный фактор снижает чувствительность предлагаемой схемы до радиусом $b = 1,4$ мм (рис. 9), что неприемлемо для контроля.

Выводы

1. Применение низкотемпературных сплавов в качестве вспомогательного слоя между пьезоэлектрическим преобразователем и объектом контроля со сложной геометрической поверхностью обеспечивает надежный акустический контакт, но требует учета влияния отражения от границы раздела сред.

2. Установлено, что метод, учитывающий отражение от границ, позволяет выявить площадь минимального дефекта, соответствующую площади дискового отражателя радиусом 1,4 мм при оптимальной рабочей частоте 5 МГц, что неприемлемо для контроля.

Литература

- [1] Алёшин Н.П. *Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений*. Москва, Машиностроение, 2013. 576 с.
- [2] Бреховских Л.М. *Волны в слоистых средах*. Москва, Наука, 1973. 343 с.
- [3] Алёшин Н.П., ред. *Методы акустического контроля металлов*. Москва, Машиностроение, 1989. 456 с.
- [4] Скучик Е. *Основы акустики*. Москва, Мир, 1976, т. 1, 451 с.
- [5] Кретов Е.Ф. *Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении*. Санкт-Петербург, Изд-во СВЕН, 2007. 296 с.
- [6] Капранов Б.И., Коротков М.М. *Акустические методы контроля и диагностики*. Ч. 1. Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 186 с.
- [7] Бреховских Л.М., Гончаров В.В. *Введение в механику сплошных сред*. Москва, Наука, 1982. 335 с.
- [8] Щербинский В.Г., Алешин Н.П. *Ультразвуковой контроль сварных соединений*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 496 с.
- [9] Клюев В.В., ред. *Неразрушающий контроль: справочник. В 8 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль*. Москва, Машиностроение, 2006. 864 с.
- [10] Алешин Н.П., Баранов В.Ю., Могильнер Л.Ю. Повышение выявляемости объемных дефектов. *Дефектоскопия*, 1985, № 7, с. 24–32.
- [11] Алешин Н.П., Волков С.А., Мартыненко С.В. Расчет поля рассеяния на плоскостных дефектах. *Дефектоскопия*, 1984, № 11, с. 3–10.

- [12] Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф., Быстрова Н.А., Галкин Д.И. *Основы диагностики технических устройств и сооружений*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 442 с.

References

- [1] Aleshin N.P. *Fizicheskie metody nerazrushaiushchego kontrolya svarykh soedinenii* [Physical methods for non-destructive testing of welded joints]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2013. 576 p.
- [2] Brekhovskikh L.M. *Volny v sloistyykh sredakh* [Waves in Layered Media]. Moscow, Nauka publ., 1973. 343 p.
- [3] *Metody akusticheskogo kontrolya metallov* [Methods for monitoring acoustic metal]. Ed. Aleshin N.P. Moscow, Mashinostroenie publ., 1989. 456 p.
- [4] Skuchik E. *Osnovy akustiki* [Acoustics basics]. Moscow, Mir publ., 1976, vol. 1, 451 p.
- [5] Kretov E.F. *Ul'trazvukovaia defektoskopiia v energomashinostroenii* [Ultrasonic testing in power]. Saint Petersburg, SVEN publ., 2007. 296 p.
- [6] Kapranov B.I., Korotkov M.M. *Akusticheskie metody kontrolya i diagnostiki. Ch. 1* [Acoustic methods of control and diagnostics. Pt. 1]. Tomsk, Tomskii politekhnicheskii universitet publ., 2008. 186 p.
- [7] Brekhovskikh L.M., Goncharov V.V. *Vvedenie v mekhaniku sploshnykh sred* [Introduction to continuum mechanics]. Moscow, Nauka publ., 1982. 335 p.
- [8] Shcherbinskii V.G., Aleshin N.P. *Ul'trazvukovoi kontrol' svarykh soedinenii* [Ultrasonic testing of welded joints]. Moscow, Bauman Press, 2000. 496 p.
- [9] *Nerazrushaiushchii kontrol'. Spravochnik. T. 3 Ul'trazvukovoi kontrol'* [Unbreakable control. Directory. Vol. 3. Ultrasonic Inspection]. Ed. Kliuev V.V. Moscow, Mashinostroenie publ., 2006. 864 p.
- [10] Aleshin N.P., Baranov V.Iu., Mogil'ner L.Iu. *Povyshenie vyavliaemosti ob'emnykh defektov* [Improving detection of bulk defects]. *Defektoskopiia* [Russian Journal of Nondestructive Testing]. 1985, no. 7, pp. 24–32.
- [11] Aleshin N.P., Volkov S.A., Martynenko S.V. *Raschet polia rasseianiia na ploskostnykh defektakh* [Calculation of the field scattering by planar defects]. *Defektoskopiia* [Russian Journal of Nondestructive Testing]. 1984, no. 11, pp. 3–10.
- [12] Bigus G.A., Daniev Iu.F., Bystrova N.A., Galkin D.I. *Osnovy diagnostiki tekhnicheskikh ustroistv i sooruzhenii* [Basics of diagnostics of technical equipment and installations]. Moscow, Bauman Press, 2015. 442 p.

Статья поступила в редакцию 25.05.2016

Информация об авторах

РЕМИЗОВ Андрей Леонидович (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

ДЕРЯБИН Алексей Александрович (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: aad1_2000@mail.ru).

ХАЛИЛОВ Максим Анатольевич (Москва) — аспирант кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: khalilov.maxim@gmail.com).

Information about the authors

REMIZOV Andrey Leonidovich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1).

DERYABIN Aleksey Aleksandrovich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: aad1_2000@mail.ru).

KHALILOV Maksim Anatolievich (Moscow) — Postgraduate, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: khalilov.maxim@gmail.com).