Ежеквартальный научно-технический и производственный журнал

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА и Неразрушающий контроль

# № 1, 2013

Издается с января 1989 г.

Учредители: Национальная академия наук Украины Институт электросварки им. Е.О.Патона Международная ассоциация «Сварка» Издатель: Международная ассоциация «Сварка»

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ Главный редактор

**Б. Е. ПАТОН** А. Я. Недосека (зам. гл. ред.),

В. А. Троицкий (зам. гл. ред.),
З. А. Майдан (отв. секр.),
Н. П. Алешин, В. Л. Венгринович,
Э. Ф. Гарф, А. А. Грузд,
Е. А. Давыдов, А. Т. Зельниченко,
М. Л. Казакевич, О. М. Карпаш,
В. В. Клюев, А. А. Лебедев,
Л. М. Лобанов, З. Т. Назарчук,
Н. В. Новиков, Ю. Н. Посыпайко,
Г. И. Прокопенко, В. А. Стороженко,
В. А. Стрижало, В. Н. Учанин,
С. К. Фомичев, Н. Г. Чаусов,
Е. В. Шаповалов, В. Е. Щербинин

#### Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150, ул.Боженко, 11 Институт электросварки им.Е.О.Патона НАН Украины Тел.: (38044) 205-23-90 Факс: (38044) 200-54-84, 200-82-77 www.patonpublishinghouse.com E-mail: journal@paton.kiev.ua URL: www.rucont.ru

> Научные редакторы Н. Г. Белый, А. А. Грузд

Н. Г. Белыи, А. А. Груз, **Редактор** 

Т. В. Юштина

Электронная верстка Л. Н. Герасименко, Д. И. Середа

Свидетельство о государственной регистрации КВ4787 от 09.01.2001

Журнал входит в перечень утвержденных Министерством образования и науки Украины изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Журнал «*Техническая диагностика* и неразрушающий контроль» переиздается в полном объеме на английском языке под названием «*Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*» издательством «Cambridge International Science Publishing», Великобритания

## СОДЕРЖАНИЕ

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А., ВОЛОШКЕВИЧ И. Г. О движении волн акустической эмиссии с большими скоростями......3

\_ . . . \_ . . . . . . . . . .

| ИЗДАНИЕ ПОЛЛЕРЖИВАЮТ:   |
|---|
| Правила для авторов журнала «Техническая диагностика<br>и неразрушающий контроль»63   |
| В Українському товаристві НК і ТД62   |
| Первая всеукраинская научно-техническая конференция<br>студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные<br>тенденции развития приборостроения»61   |
| Научно-техническая конференция «Проблемы ресурса<br>и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин»58  |
| 20-я Юбилейная международная конференция «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»  |
| ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ  |
| ДОЛИНСКИЙ В. М., СТОГНИЙ В. Н., ЧЕРЕМСКАЯ В. И.<br>Оценка работоспособности сосудов с овальностью   |
| ПРОИЗВОЛСТВЕННИЙ РАЗЛЕЛ   |
| КОШУЛЯН А. В., МАЛАЙЧУК В. П., МОЗГОВОЙ А. В.,<br>ТИМОЩЕНКО А. П., ЧУПРИНА Л. В. Исследования оста-<br>точных напояжений в цельнокатаных железнолорожных колесах 45                               |
| БЕЛЫЙ Н. Г., БУХЕНСКИЙ В. Н., МИХАЙЛОВ С. Р.,<br>СЛОБОДЯН Н. В., ШИЛО Д. С. Относительная чувствитель-<br>ность рентгенотелевизионных систем на основе импульсных<br>рентгеновских аппаратов      |
| СКАЛЬСЬКИЙ В. Р., СІМАКОВИЧ О. Г. Експериментальна акустико-емісійна оцінка зародження мікротріщин  |
| ЕРЕМЕНКО В. С., ПЕРЕЕДЕНКО А. В. Система неразру-<br>шающего контроля композиционных материалов на основе<br>нейронных сетей ART-2 и FUZZY-ART  |
| КУЦ Ю. В., ОЛІЙНИК Ю. А., БЛИЗНЮК О. Д., МОНЧЕНКО О. В.<br>Фазовий спосіб ультразвукової товщинометрії  |
| ШАПОВАЛОВ Е. В., ГАЛАГАН Р. М., КЛИЩАР Ф. С.,<br>ЗАПАРА В. И. Современные методы и средства неразру-<br>шающего контроля сварного соединения, выполненного<br>контактной точечной сваркой (Обзор) |

ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ: Технический комитет по стандартизации «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» ТК-78 Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

## **Quarterly Scientific-Technical and Production Journal**

## TEKHNICHESKAYA DIAGNOSTIKA

# № 1, 2013

# NERAZRUSHAYUSHCHIY KONTROL

Founded in January, 1989

Publisher: International Association «Welding»

Founders: The National Academy of Sciences of Ukraine The E. O. Paton Electric Welding Institute International Association «Welding»

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief B. E. PATON

A. Ya. Nedoseka (vice-chief ed.),
V. A. Troitsky (vice-chief ed.),
Z. A. Maidan (exec. secr.),
N. P. Aleshin, V. L. Vengrinovich,
E. F. Garf, A. A. Gruzd,
E. A Davydov, A. T. Zelnichenko,
M. L. Kazakevich, O. M. Karpash,
V. V. Klyuev, A. A. Lebedev,
L. M. Lobanov, Z. T. Nazarchuk,
N. V. Novikov, Yu. N. Posypayko,
G. I. Prokopenko, V. A. Storozhenko,
V. A. Strizhalo, V. N. Uchanin,
S. K. Fomichev, N. G. Chausov,
E. V. Shapovalov, V. E. Shcherbinin

#### Address

The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine Tel.: (38044) 200-23-90, Fax: (38044) 200-54-84, 200-82-77 E-mail: journal@paton.kiev.ua www.patonpublishinghouse.com URL: www.rucont.ru

> Scientific editors N. G. Bely, A. A. Gruzd

> > Editors T. V. Ushtina

Electron galley L. N. Gerasimenko, D. I. Sereda

State Registration Certificate KV 4787 of 09.01.2001. All rights reserved

This publication and each of thearticles contained here in are protected by copyright.

Permission to reproduce material contained in this journal must beobtained in writing from the Publisher

«Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol» journal is republished cover-to-cover in English under the title of «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» by Cambridge International Science Publishing, UK

## CONTENT

#### SCIENTIFIC-TECHNICAL

|   | NEDOSEKA A.Ya., NEDOSEKA S.A., VOLOSHKEVICH I.G.<br>On movement of acoustic emission waves at high speeds   | 3  |
|---|---|----|
|   | SHAPOVALOV E.V., GALAGAN R.M., KLISHCHAR F.S.,<br>ZAPARA V.I. Modern methods and means of NDT of welded joint<br>made by resistance spot welding (Review) | 10 |
| 1 | KUTS Yu.V., OLIJNYK Yu.A., BLIZNYUK O.D.,<br>MONCHENKO O.V. Phase method of ultrasonic thickness<br>measurement   | 23 |
|   | EREMENKO V.S., PEREEDENKO A.V. System for NDT of<br>composite materials based on neural networks ART-2<br>and FUZZY-ART                                   | 28 |
|   | SKALSKII V.R., SIMAKOVICH O.G. Experimental acoustic-emis-<br>sion assessment of microcrack initiation  | 35 |
|   | BELII N.G., BUKHENSKII V.N., MIKHAILOV S.R.,<br>SLOBODYAN N.V., SHILO D.S. Relative sensitivity of X-Ray TV<br>systems based on pulsed X-Ray units        | 39 |
| I | KOSHULYAN A.V., MALAICHUK V.P., MOZGOVOJ A.V.,<br>TIMOSHCHENKO A.P., CHUPRINA L.V. Investigations of<br>residual stresses in whole-rolled railway wheels  | 45 |
|   | INDUSTRIAL  |    |
| 1 | DOLYNSKII V.M., STOGNII V.N., CHEREMSKAYA V.I.<br>Assessment of performance of vessels with ovality   | 51 |
|   | NEWS AND INFORMATION  |    |
| : | 20 <sup>th</sup> Jubilee International Conference "Modern Methods and Means of Nondestructive Testing and Technical Diagnostics"                          | 53 |
|   | Scientific-Technical Conference "Problems of residual life and safe service of structures, constructions and machines"                                    | 58 |
|   | First All-Ukrainian Scientific-Technical Conference of students, post-graduates and young scientists on "Modern Tendencies in                             |    |

In the Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics ......62

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY: Technical Committee on standartization «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» TC-78 Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic

## О ДВИЖЕНИИ ВОЛН АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С БОЛЬШИМИ СКОРОСТЯМИ

#### А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, И. Г. ВОЛОШКЕВИЧ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены цилиндрические волны, возникающие от действия точечного источника возбуждения, расположенного в пластине на различной глубине, и распространяющиеся со скоростями выше продольной скорости распространения волны в металле  $C_1$ . Показано, что появившиеся элементарные волны двигаются индивидуально или группами с различными скоростями. Эти волны характеризуются практически бесконечным набором по волновым числам и скоростям. Суммарное действие элементарных волн вызывает перемещения поверхности пластины, состоящее из двух частей — суммарной волны, двигающейся с изменяющимся спектром и амплитудой, и фоном на всей поверхности пластины, сопровождающим суммарную волну. Количество элементарных волн в общем пакете уменьшается с увеличением скорости их движения. Уменьшение количества волн происходит за счет волн, движущихся с высокими скоростями. Показано, что с помощью фильтрации акустико-эмиссионных сигналов можно изменять их расчетные параметры, выбирая наиболее эффективные для работы измерительной аппаратуры и технологии контроля. Выборочной фильтрацией в определенном диапазоне скоростей можно формировать суммарную волну, распространяющуюся по поверхности пластины с заданной постоянной скоростью. Подтверждено, что в пластинах в результате действия точечного источника излучения появляется и распространяется волна с независимой от волнового числа скоростью  $C_1$ . Получена аналитическая зависимость для расчета таких волн. Библиогр. 10 назв., ил. 7.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, волны перемещения, скорости, волновые числа, спектр, фильтрация

Создание интеллектуальных конструкций требует более детального анализа состояния их материалов как на стадии испытаний, так и в процессе эксплуатации. При решении этого вопроса все большее значение приобретает метод акустической эмиссии (АЭ), позволяющий осуществлять 100%-й контроль и диагностику всего объема материала конструкции и прогнозировать его состояние и возможность и далее нести рабочую нагрузку [1–8].

В связи со сказанным, практический интерес для разработчиков алгоритмов оценок состояния материалов конструкций, математического обеспечения на его основе и собственно АЭ аппаратуры представляют характеристики акустических волн, распространяющихся в пластинах при возникновении точечного источника возбуждения. Зная характеристики волн, воспринимаемых датчиками АЭ, можно более точно строить алгоритмы для одного из самых сложных вопросов теории прогнозирования — вопроса возвращения от характеристик сигнала АЭ, зарегистрированных прибором, к реальному сигналу, возникшему непосредственно в месте дефекта. Кроме того, знание этих характеристик позволяет более надежно выбирать диапазоны рабочих частот датчиков АЭ для тех или иных условий контроля.

Рассмотрим пластину больших размеров, в которой на глубине  $z_0$  возник и исчез точечный источник возбуждения АЭ (рис. 1). Дифференциальные уравнения, описывающие волновые процессы, в таком случае могут быть представлены в виде [4, 5]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} =$$

$$= -\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0^*}{2\pi r} \delta(r) \delta(z-z_0) \delta(p \pm \alpha C_{\alpha}),$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{1}{C_2^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0,$$
<sup>(1)</sup>

где  $\alpha$  — волновые числа, см<sup>-1</sup>; *p* — комплексная частота, с<sup>-1</sup>; *C*<sub> $\alpha$ </sub> — скорость распространения элементарной волны; *C*<sub>1</sub> и *C*<sub>2</sub> — скорости распространения продольной и поперечной волн соответственно.

Начальные условия задачи определяются дельта-функцией по времени  $\delta(t)$ , которая указывает на то, что в момент времени t = 0 возник и исчез источник возбуждения АЭ. Остальные дельтафункции характеризуют локальность воздействия источника и линейную связь комплексной частоты *p*, переданной источником пластине, с волновыми числами  $\alpha$  и скоростями распространения элементарных волн  $C_{\alpha}$ . Граничные условия: нап-





Рис. 1. Пластина с источником возмущения на глубине z<sub>0</sub>

ряжения  $\sigma_z$  и  $\tau_{rz}$  на свободных поверхностях пластины z = 0 и  $z = \delta$  должны быть равны нулю. После прямых преобразований Лапласа и Ханкеля уравнения (1) примут вид:

$$-\left(\alpha^{2} + \frac{p^{2}}{C_{1}^{2}}\right) \stackrel{=}{\varphi} + \frac{\partial^{2} \stackrel{=}{\varphi}}{\partial z^{2}} = -\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_{0}^{*}}{2\pi} \,\delta(z-z_{0}) \,\delta(p \pm \alpha C_{\alpha});$$
  
$$-\left(\alpha^{2} + \frac{p^{2}}{C_{1}^{2}}\right) \stackrel{=}{\varphi} + \frac{\partial^{2} \stackrel{=}{\varphi}}{\partial z^{2}} = 0.$$
(1a)

Процедура решения уравнений (1а) достаточно подробно описана в работах [4, 5]. Запишем полученное спектральное уравнение распространяющейся волны и формулу для расчета перемещений наружной (z = 0) поверхности, вызванных движением этой волны. Такой случай предусматривает расположение датчиков АЭ на наружной поверхности (с координатой z = 0). Спектральное уравнение, описывающее зависимость между волновыми числами  $\alpha$  и скоростями распространения упругих АЭ волн  $C_{\alpha}$ , можно представить следующим образом:

$$2\left(1-\gamma_{2}^{2}\right)^{2}\cos(\alpha\gamma_{1}\delta)\sin(\alpha\gamma_{1}z_{0})\sin(\alpha\gamma_{2}\delta) + \\ +8\gamma_{1}\gamma_{2}\sin(\alpha\gamma_{1}\delta)\sin(\alpha\gamma_{1}z_{0})\cos(\alpha\gamma_{2}\delta) + \\ +\left[\Gamma\cdot 4\gamma_{1}\gamma_{2}-\left(1-\gamma_{2}^{2}\right)^{2}\right]\times \\ \times\sin(\alpha\gamma_{1}\delta)\cos(\alpha\gamma_{1}z_{0})\sin(\alpha\gamma_{2}\delta) = 0, \qquad (2)$$

где

$$\gamma_1 = \sqrt{\frac{C_{\alpha}^2}{C_1^2} - 1}; \ \gamma_2 = \sqrt{\frac{C_{\alpha}^2}{C_1^2} 1,87^2 - 1}; \ \Gamma = \frac{4\gamma_1\gamma_2}{\left(1 - \gamma_2^2\right)^2}.$$

Зная выражение для расчета перемещений  $\overline{w}$  в зависимости от функций напряжений  $\overline{\phi}$  и  $\overline{\psi}$  [4]:

$$\overline{\overline{w}} = \frac{\partial \overline{\overline{\varphi}}}{\partial z} + \alpha^2 \overline{\overline{\psi}},$$

и подставив в него  $\overline{\phi}$  и  $\overline{\psi}$ , найденные из уравнений (1а), после выполнения обратных преобразований Лапласа и Ханкеля получим формулу для определения перемещений *w* внешней поверхности пластины z = 0:

$$w = \frac{1 + v V_0^*}{1 - v 2\pi^2} \times \int_0^\infty \left(1 - \frac{2}{1 - \gamma_2^2}\right) \alpha \cos(\alpha \gamma_1 z_0) \sin(\alpha C_\alpha t) J_0(\alpha r) d\alpha.$$
<sup>(3)</sup>

Одним из решений спектрального уравнения является случай, когда  $\gamma_1 = 0$ . Эти условия выполняются, если  $C_{\alpha} = C_1 = \text{const.}$  Для такой волны, распространяющейся с постоянной, независимой от

волнового числа α скоростью, приведенный выше интеграл может быть найден аналитически [9, 10]:

$$w = \frac{1 + v V_0^*}{1 - v 2\pi^2} \left( 1 - \frac{2}{1 - \gamma_2^2} \right) \frac{C_1 t}{\left( r^2 - \left( C_1 t \right)^2 \right)^{3/2}}.$$
 (4)

Эта формула описывает волну Лэмба для тонких пластин, распространяющуюся со скоростью *C*<sub>1</sub>.

Спектральное уравнение (2) имеет решения также при значении  $z_0 = 0$ . Первое решение определяет состав волны, распространяющейся по пластине со скоростями выше  $C_1$ . Второе, полученное приравниванием нулю выражения в квадратных скобках, выделяет волну Рэлея, двигающуюся с постоянной скоростью  $C_3 = 0.927C_2$ . Формулу, определяющую параметры этой волны, можно получить из общего выражения для расчета перемещений *w* из выражения (3):

$$w = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0^*}{2\pi^2} \left(1 - \frac{2}{1-\gamma_2^2}\right) \frac{C_1 t}{\left(r^2 - \left(C_3 t\right)^2\right)^{3/2}}$$

Эта формула идентична формуле (4), где вместо скорости продольной волны  $C_1$  подставлена скорость волны Рэлея  $C_3$ .

Для выполнения расчетов была создана специальная программа, учитывающая особенности решаемой задачи и требования к оформлению результатов (рис. 2). Программа позволила оптимизировать выполнение расчетных операций по времени и быстро получить необходимый результат. Кроме того, она позволила ввести данные расчета в Microsoft Office Excel, что дало возможность легко оперировать с материалами расчета, изменять необходимые параметры и получать достаточно представительные графики для использования их при оформлении отчетов и подготовке



Рис. 2. Окно программы расчета параметров АЭ волн по данным аналитических исследований

#### - НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

статей. Расчеты выполнялись для пластины из стали 09Г2С при  $C_1 = 0,57 \cdot 10^6$  см/с; v = 0,3; величина объемной деформации принималась равной  $V_0^* =$ = 4,2·10<sup>-9</sup> см<sup>3</sup> [4].

На рис. 3 представлены графики спектрального уравнения и его корней для  $C_{\alpha}/C_1$  в зависимости от величины волновых чисел α. Видна достаточно сложная картина как пересекающихся кривых решения спектрального уравнения, так и элементарных волн, которые, суммируясь, будут образовывать реальные волны, распространяющиеся по пластине. На рисунках для наглядности представлена информация для ограниченного числа скоростей и волновых чисел. В данном случае максимальное отношение  $C_{\alpha}/C_1$  принято равным 25. Можно убедиться, что волны АЭ в пластинах состоят, по-видимому, из сотен элементарных волн, которые в процессе распространения взаимодействуют, образуя реальную, изменяющуюся при движении сложную волну. Видно, что скорости распространения элементарных волн носят периодический характер, а при определенных значениях волновых чисел α кривые зависимостей скоростей элементарных волн резко поднимаются вверх, т. е. при определенных α происходит увеличение скоростей их распространения, что приводит к образованию пакетов, все время меняющих свое значение и положение. На графике такие точки можно отметить, например, для  $\alpha = 106,8$ ; 107,7 и 108,3 см<sup>-1</sup>. Хотя на рисунке приведен срез по волновым числам от 100 до 110 см<sup>-1</sup>, картина является типичной для всего диапазона изменения чисел  $\alpha$ . Волнистые кривые  $C_{\alpha}/C_1$  периодически резко устремляются вверх, образуя такие же периодические изменения пакетов суммарной волны. Если рассмотреть более полную картину возникших и распространяющихся в пластине волн, то картина будет значительно сложнее.

На рис. 4 приведены результаты расчета параметров суммарной волны АЭ, распространяющейся по стальной пластине толщиной 1 см, когда источник возмущения возник и исчез на глубине 0,2 см. Указанная волна получена путем числен-



*Рис. 3.* Графическое изображение спектрального уравнения для стальной пластины толщиной 1 см с источником возмущения на глубине 0,2 см (для наглядности большая часть элементарных волн выведена из рассмотрения) (*a*) и корней спектрального уравнения в зависимости от волнового числа  $\alpha$  в пределах 25-кратных значений скоростей по отношению к скорости  $C_1$  (различным цветом отмечены порядки элементарных волн) (*б*) (на рис. 3, *a*:  $\alpha = 100...110$ ;  $\Delta \alpha = 0,1$  см<sup>-1</sup>;  $C_{\alpha}/C_1 = 1...25$ ;  $\Delta(C_{\alpha}/C_1) = 2$ ; на рис. 3, *б*:  $\Delta(C_{\alpha}/C_1) = 0,1$ )

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



*Рис. 4.* Распределение перемещений поверхности стальной пластины толщиной 1 см с источником возбуждения на глубине 0,2 см через 3,5 мкс (*a*) и 73,2 мкс (*б*) после начала действия источника (исходные данные для расчета:  $\alpha = 0...2000$ ;  $\Delta \alpha = 0.1 \text{ см}^{-1}$ ;  $C_{\alpha}/C_{1} = 1...4$ ;  $\Delta (C_{\alpha}/C_{1}) = 0,5$ ;  $\Delta r = 0,02 \text{ см}$ )

ного интегрирования выражения (3). В крайней левой части графика показана волна Лэмба с амплитудой  $w = 0,14 \cdot 10^{-5}$  см и скоростью  $C_1 =$  $= 0.57 \cdot 10^6$  см/с. До волны, двигающейся со скоростью  $C_1$ , никаких других волн нет. На графике виден только шумовой фон. За продольной волной С<sub>1</sub> появляются распространяющиеся на большое расстояние пакеты волн с различными амплитудами и скоростями. Видны наглядно выраженные пики амплитуд распространяющейся суммарной волны. Такие пики, все время меняющие свое положение и скорость, могут приводить к ошибкам в локации сигналов АЭ при определении координат мест возникновения вспышки АЭ. Показанное на графике волновое поле нестабильно и существует только в данный момент времени. В последующие моменты форма волны и величины амплитуд волн, входящих в пакет, меняются.

Отметим, что численные расчеты, проведенные авторами, показали, что часть элементарных волн при  $C_{\alpha}/C_1$  = const по мере увеличения числа корней спектрального уравнения, вводимых в рас-



*Рис. 5.* Спектр элементарных волн в пластине толщиной 1 см, распространяющихся с большими скоростями:  $\Delta \alpha = 0,1$  см<sup>-1</sup>;  $\Delta(C_{\alpha}/C_{1}) = 1$  (на рис. 4, 5 для удобства анализа перемещения пластины вверх приняты положительными)

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

чет, постепенно стремится к 1, тем самым подтверждая, что начальной волной в пакете является продольная волна (черная прямая в нижней части графика (рис. 3,  $\delta$ ).

Анализируя далее графики, представленные на рис. 3, видим, что при выбранных условиях счета с увеличением скорости элементарных волн их количество уменьшается. Отмечается обеднение спектра количеством волн, начиная от  $C_{\alpha}/C_{1}$ , примерно равном 24. Как видно, появляются области, где волн при определенных скоростях вообще нет. Чуть ниже область  $C_{\alpha}/C_{1}$  заполнена элементарными волнами, двигающимися с большими скоростями. Расчеты, выполненные для больших значений С<sub>а</sub>/С<sub>1</sub>, показывают, что и при таких больших скоростях элементарные волны распределяются примерно также, как и при более низких (рис. 5). Периодически возникают области, свободные от волн. Элементарные волны, суммируясь, создают общую картину двигающихся волн, создавая также и волновой фон, являющийся помехой при регистрации АЭ и требующий учета при проектировании АЭ аппаратуры и создании алгоритмов и программ расчета координат АЭ событий, формировании решения о состоянии материалов конструкций. Под влиянием элементарных волн основные волны частично меняют свою конфигурацию, которая по форме и величине амплитуд все время претерпевает изменения по мере распространения волны.

Существенное значение при приеме и расшифровке АЭ сигналов имеет их фильтрация аппаратурными способами или с помощью математической обработки. На рис. 6, *а* показаны сигналы АЭ, прошедшие математическую обработку в диапазоне волновых чисел от 100 до 200  $cm^{-1}$  с шагом 0,1 см<sup>-1</sup>. При этом скорости распространяющихся элементарных волн Са были ограничены диапазоном от  $C_1$  до  $3C_1$  с шагом 0,1. Из рисунка видно, что фильтрацией удалось выделить сигнал АЭ с достаточно большой амплитудой, перемещающийся со скоростью 0,8·10<sup>5</sup> см/с. Полученный сигнал отличается от полного суммарного сигнала, приведенного на рис. 4. Так, на рис. 6, б представлены графики последовательной фильтрации сигналов АЭ в узком по радиусу диапазоне от 1 до 1,5 см. Фильтрация проводилась при постоянных параметрах шага по волновым числам Δα = = 0,0625 см<sup>-1</sup> в диапазоне  $\alpha$  = 0...2000 см<sup>-1</sup>. Параметром фильтрации выбрали скорость распространения элементарных волн в диапазоне  $C_{\alpha}/C_{1} =$ = 1...3. Шаг фильтрации: 0,05; 0,02; 0,01; 0,005; 0,0025; 0,00125 отн. ед. (рис. 6, б). В первом из вариантов расчета также повысили предел фильтрации по скорости до 6 ед. Как видно из рисунка, это практически не повлияло на величину амплитуды сигнала. Анализируя графики, можно сделать заключение — фильтрация по скоростям в узком по радиусу диапазоне с уменьшающимся шагом выборки приводит к простому увеличению амплитуды суммарного сигнала в связи с тем, что в процесс суммирования вовлекается все большее количество элементарных волн. Таким образом, в зависимости от требований к контролю, фильтрацией АЭ сигналов можно подобрать выходные сигналы, наиболее эффективные для локации развивающихся дефектов и их расшифровки для принятия решений о состоянии конструкции. Так, на рис. 7 представлены графики двух типов суммар-



*Рис. 6.* Отфильтрованные с помощью программного обеспечения системы сигналы АЭ: *а* — сигналы в диапазоне 30...50 см по радиусу; *б* — последовательное изменение амплитуды АЭ сигнала в узком по радиусу диапазоне распространения в зависимости от ограничения фильтром скорости его распространения (в скобках — предел фильтрации)



*Рис.* 7. Волны, распространяющиеся в стальной пластине толщиной 1 см, с постоянными скоростями, равными  $2C_1$  и  $3C_1$ ;  $\Delta \alpha = 0,1$  см<sup>-1</sup>

ных волн, распространяющихся с постоянными скоростями, в два и три раза превосходящими скорость  $C_1$ . При этом верхняя волна кусочно-непрерывна по  $\alpha$  и в связи с этим менее эффективна, чем нижняя сплошная. Результаты получены фильтрацией скоростей в пределах 1...3 с интервалом 1.

Следует отметить весьма сложный характер подынтегральной функции выражения (3). Численное интегрирование выражения с такой сложной подынтегральной функцией затруднено, несмотря на некоторые упрощения, связанные с конкретными значениями волновых чисел, полученных при решении спектрального уравнения (2). Расчеты показали, что для получения удовлетворительных результатов необходимо интегрировать выражение для *w* в пределах от 0 до 2000 см<sup>-</sup> по α и более с пределом четырехкратного по отношению к скорости С1 изменением скоростей распространяющихся элементарных волн. На графиках рис. 4, а показаны волны АЭ в момент времени, составляющий 3,5 мкс от начала возникновения источника. Показана волна, двигающаяся с постоянной, не зависящей от волнового числа скоростью C<sub>1</sub> = 0,57 см/мкс. Вторая волна, более мощная, опережает первую, двигаясь в момент времени 3,5 мкс со скоростью 0,794 см/мкс.

При дальнейшем распространении волны еще более изменяются. Переотражения от верхней и нижней поверхностей пластины приводят, как было сказано, к образованию пакетов, двигающихся со скоростями выше  $C_1$  и выше скорости основной волны. На рис. 4,  $\delta$  представлен момент времени, наступивший спустя 73,7 мкс после начала действия источника. На графике хорошо виден пакет волн в диапазоне расстояния от источника, равном 40...50 см. Как и ранее, общую картину волнового поля сопровождают фоновые волны, значения амплитуд которых колеблется в пределах  $\pm 0,1\cdot 10^{-5}$ см.

#### Выводы

Аналитически в рамках принятых допущений установлены волны, распространяющиеся в пластинах со скоростями выше скорости  $C_1$ .

Показан широкий (в бесконечных пределах по скоростям и волновым числам) спектр возникающих и распространяющихся в пластинах элементарных волн.

Суммарное действие элементарных волн вызывает перемещение поверхности пластины, состоящее из двух частей — суммарной волны, двигающейся с изменяющимся спектром и амплитудой, и фоном на всей поверхности пластины, сопровождающим суммарную волну. Фоновые волны создают определенные неудобства при локации сигналов АЭ и их расшифровке.

Количество элементарных волн в общем пакете уменьшается с увеличением скорости их движения. Уменьшение количества волн происходит за счет волн, двигающихся с высокими скоростями.

Показано, что с помощью фильтрации АЭ сигналов можно изменять их расчетные параметры, выбирая наиболее эффективные для работы измерительной аппаратуры и технологии контроля.

Аналитические исследования показали, что выборочной фильтрацией в определенном диапазоне скоростей можно формировать суммарную волну, распространяющуюся по поверхности пластины с заданной постоянной скоростью.

Подтверждено, что в пластинах в результате действия точечного источника излучения появляется и распространяется волна с независимой от волнового числа скоростью  $C_1$ . Получена аналитическая зависимость для расчета таких волн.

Показано, что если источник возбуждения находится на поверхности пластины ( $z_0 = 0$ ), то дополнительно появляется поверхностная волна Рэлея, двигающаяся со скоростью  $C_3 = 0,927C_2$ .

- Андрейкив А. Е., Лысак Н. В. Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. — Киев: Наук. думка, 1989. — 176 с.
- Недосека А. Я. Влияние характера локальных изменений структуры материала на формирование упругих волн деформаций на поверхности толстой пластины // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1991. — № 3. — С. 66–73.
- 3. *Недосека А. Я.* О квантовании процесса возникновения и развития трещин // Там же. 1989. № 1. С. 11–15.
- Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Индпром, 2008. — 815 с.
- 5. Недосека А. Я., Недосека С. А., Волошкевич И. Г. Волны деформаций, возникающие при локальной перестройке структуры материалов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. 2004. № 3. С. 8–15.
- Акустическая эмиссия и ресурс конструкций / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека и др. Киев: Индпром, 2012. 312 с.
- 7. *Тимошенко С. П.* Колебания в инженерном деле. М.: Наука, 1967. 444 с.



10. Рекач В. Г. Руководство к решению задач по теории уп-

ругости. — М.: Высш. шк., 1966. — 227 с.

- 8. *Тимошенко С. П., Гудьер Дж.* Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.
- Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. — М.: Наука, 1971. — 288 с.

The paper deals with cylindrical waves generated by the impact of a point excitation source, located in a plate at different depths, and propagating at the velocities higher than the longitudinal velocity of wave propagation in metal  $C_1$ . It is shown that the appearing elementary waves move individually or in groups at different velocities. These waves are characterized by practically unlimited set by wave numbers and velocities. Summary action of elementary waves causes displacements over plate surface, consisting of two parts - summary wave moving with changing spectrum and amplitude, and background over the entire plate surface, accompanying the summary wave. Number of elementary waves in the general packet decreases with increase of their movement velocity. Reduction of the number of waves occurs due to elimination of waves moving at high velocities. It is shown that application of filtering of acoustic emission signals allows changing their calculated parameters, selecting the most effective ones for operation of measuring equipment and monitoring technology. Selective filtering in a certain range of velocities allows forming the summary wave, propagating over the plate surface with the specified constant velocity. It was confirmed that a wave with velocity  $C_1$  independent on wave number appears and propagates in plates as a result of the action of point radiation source. An analytical dependence for calculation of such waves was derived. 10 References. 7 Figures.

Keywords: acoustic emission, displacement waves, velocities, wave numbers, spectrum, filtering

Поступила в редакцию 11.10.2012

#### НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ МНОГОКАНАЛЬНЫХ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ СИСТЕМ

ЕМА-4 • 100-% контроль и диагностика крупногабаритных изделий в процессе эксплуатации и испытаний без их разборки и предварительной подготовки



- новейшее специализированное оборудование для АЭ диагностики
- оценка уровня разрушающей нагрузки без разрушения конструкции
- регистрация формы импульса АЭ для частотного анализа и корреляции
- возможность минимизации расстояния между прибором и датчиками
- измерение, обработка, протокол с помощью подключаемого ПК
- эффективная методика наращивания количества каналов АЭ
- аналоговые входы для измерения параметров нагрузки
   высокая надежность, низкое потребление энергии

|   | Dereenteen | ineppendite erb; | <br>nonpeomenne | 0 |
|---|------------|------------------|-----------------|---|
|   |            |                  |                 |   |
| _ |            |                  |                 |   |

| ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ                      |               |              |              |  |  |  |  |  |  |
|---|---------------|--------------|--------------|--|--|--|--|--|--|
| Система АЭ  | AED-404       | AED-416      | AED-432      |  |  |  |  |  |  |
| Количество каналов АЭ                               | 4             | 16           | 32           |  |  |  |  |  |  |
| Измерение всех стандартных параметров АЭ            | есть          | есть         | есть         |  |  |  |  |  |  |
| Программируемый цифровой фильтр на входе каналов АЭ | 30-1000 кГц   | 30-1000 кГц  | 30-1000 кГц  |  |  |  |  |  |  |
| Сохранение полной формы импульса по всем каналам АЭ | 8 MC          | 8 MC         | 8 мс         |  |  |  |  |  |  |
| Частотный анализ импульса АЭ                        | есть          | есть         | есть         |  |  |  |  |  |  |
| Корреляция между сигналами АЭ                       | есть          | есть         | есть         |  |  |  |  |  |  |
| Интерфейс с управляющим компьютером                 | USB, Ethernet | USB, Ethe    | ernet, радио |  |  |  |  |  |  |
| Питание   | 12 B / 0,25 A | 12 B / 1,0 A | 12 B / 2,0 A |  |  |  |  |  |  |
| Возможность питания через интерфейс                 | USB           | Eth          | ernet        |  |  |  |  |  |  |
| Размеры [мм]  | 119×113×35    | 126×213×77   | 380×270×167  |  |  |  |  |  |  |
| Bec   | 0,35 кг       | 1,3 кг       | 7,0 кг       |  |  |  |  |  |  |

| НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ:            |  |
|--|--|
| Компьютерные интерфейсы USB, Ethernet, радио | A CONTRACT OF A DECEMBER OF A  |
| Синхронизация приборов сигналами GPS         |  |
| Цифровые полосовые фильтры                   |  |
| Детектирование разрыва и короткого замыкания |  |
| в цепи внешнего предварительного усилителя   | - heredell - heredell  |
| Автоматическая установка                     | and the second of the second   |
| фиксированных / плавающих порогов            | 12000000000000000000000000000000000000   |
| Режим осциллографа по всем каналам АЭ        | with a second state of the |
| Упорядочение импульсов, принятых             |  |
| разными каналами, по времени их начала       | многоуровневое программное обеспечение   |

#### ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины

E-mail: office@paton.kiev.ua

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННОГО КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКОЙ (ОБЗОР)

#### Е. В. ШАПОВАЛОВ, Р. М. ГАЛАГАН, Ф. С. КЛИЩАР, В. И. ЗАПАРА

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Представлен обзор современных методов и средств неразрушающего контроля сварного соединения, выполненного контактной точечной сваркой: капиллярных, оптических, вихретоковых, магнитных, электрических, тепловых, радиационных и акустических. Кратко рассмотрены преимущества и недостатки используемых методов, а также тенденции их развития. Особое внимание уделено анализу возможностей УЗ метода с использованием различных методик контроля, схем прозвучивания и типов преобразователей. Показано, что актуальным вопросом является повышение достоверности контроля самого опасного дефекта сварного соединения, полученного контактной точечной сваркой — непровара. Для этих целей можно использовать большинство описанных в статье методов, однако отдельные недостатки каждого метода не позволяют гарантировать надежное выявление данного дефекта. Поэтому перспективным является использование одновременно нескольких бесконтактных методов и разработка оптимальных способов анализа данных для каждого отдельного метода. Недостатком такого подхода является увеличение времени контроля, однако его можно минимизировать с помощью правильной стратегии проведения всего комплекса контрольно-измерительных мероприятий. Соответственно даны рекомендации по выбору методов контроля сварного соединения, выполненного контактной точечной сваркой, и предложен подход к созданию автоматизированной системы контроля с использование одновременно нескольких методов. Библиогр. 70 назв., рис. 8.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, контактная точечная сварка, ультразвук, надежность

Широкое применение контактной точечной сварки (КТС) в различных областях промышленности обусловлено высокой степенью ее механизации, роботизации, автоматизации и, как следствие, высокой производительностью. В сварном точечном соединении возможно возникновение различных дефектов, причинами которых являются несовершенство оборудования для КТС, сборочные, подготовительные операции и др. Необходимым условием формирования качественного сварного соединения, выполненного КТС, является образование общей зоны расплавления заданных размеров, что обеспечивает важнейшее эксплуатационное свойство — прочность соединения [1]. Размер этой зоны при точечной сварке определяется диаметром литого ядра и регламентируется ГОСТ 15878-79 «Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры».

Основными дефектами КТС можно назвать непровар, выплеск, трещины, раковины и отклонение геометрических параметров сварного соединения [2]. Непровар является одним из самых опасных дефектов и может проявляться в виде полного отсутствия или уменьшения литого ядра, а также при частичном или полном сохранении оксидной пленки или плакирующего слоя в контакте деталь-деталь. Количество дефектов, допускаемых без исправления и подлежащих исправлению, зависит от ответственности сварного узла и регламентируется соответствующими техническими условиями. Значительно снизить количество дефектов и вероятность их появления позволяет контроль режимов работы оборудования (электрических и механических) и управление процессом КТС [3].

Контролируют качество точечной сварки чаще всего внешним осмотром деталей и разрушением опытных образцов. Преобладание разрушающих методов контроля обусловлено простотой и наглядностью результатов. Однако разрушающие методы имеют существенный недостаток (кроме, естественно, самого процесса разрушения) — позволяют проводить только выборочный контроль. Подобного недостатка лишены методы НК.

Данная работа посвящена обзору методов НК сварного соединения, выполненного контактной точечной сваркой, анализу достоинств и недостатков каждого из них и определению основных тенденций их дальнейшего развития.

Капиллярные методы контроля. Данные методы основаны на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей (пенетрантов) в полости поверхностных и сквозных несплошностей контролируемых изделий и регистрации образующихся индикаторных следов визуальным способом или с помощью специальных преобразователей. Капиллярные методы в зависимости от способа выявления индикаторного рисунка подразделяют на люминесцентный, цветной, люминесцентноцветной, яркостный [4].

© Е. В. Шаповалов, Р. М. Галаган, Ф. С. Клищар, В. И. Запара, 2013

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

К недостаткам метода можно отнести то, что он выявляет только поверхностные или сквозные несплошности; требует значительных временных затрат на подготовку поверхности изделий, а также на обработку результатов контроля; невозможность автоматизации. Значительная трудоемкость капиллярных методов препятствует их использованию для контроля КТС, так как в некоторых конструкциях количество сварных точек может достигать нескольких тысяч и более.

Оптические методы контроля. Наиболее дешевым и оперативным методом НК является внешний осмотр. Обычно внешним осмотром контролируют все сварные изделия независимо от применения других видов контроля. Внешний осмотр соединений проводят невооруженным глазом или через увеличительную лупу. При осмотре проверяют расположение сварных точек, форму и размеры вмятины от электродов, наличие наружных дефектов, зазоры между деталями [5]. Отпечатки сварных точек должны иметь круглую форму (допускается некоторая овальность). Нормальная глубина вмятины составляет 10...15 % толщины деталей, а при сварке деталей неравной толщины может увеличиваться до 25 % [2]. На поверхности точек не должно быть выплесков металла.

Применение оптико-электронных средств обработки изображений увеличивает эффективность оптического контроля, позволяя автоматизировать контроль КТС. Например, лазерные сканирующие сенсоры и цифровые видеокамеры используются для измерения контура отпечатков сварочных электродов, определения наружных дефектов и трещин [6]. В новых разработках оптических сканеров применяется динамический порог и алгоритмы морфологии для сегментирования дефектов [7]. Размеры отпечатков от электродов не могут служить объективным показателем качества сварного соединения. Однако изменение размеров отпечатков при неизменной настройке машины свидетельствует о том, что был нарушен процесс сварки, а это могло привести к изменению качества соединения.

Приборы оптической интерферометрии позволяют с большой точностью измерять перемещения и деформации элементов сварных конструкций как в процессе их изготовления, так и эксплуатации. Оценку качества КТС также проводят по результатам моделирования напряженно-деформированного состояния сварных соединений [8].

В последние годы для НК качества точечных соединений используется метод электронной ширографии (Digital Shearography), который является бесконтактным оптическим интерференционным методом контроля деталей и конструкций, изготовленных из различных материалов [9]. Суть метода электронной ширографии состоит в следующем. Объект контроля (ОК) частично или полностью освещается с помощью лазера когерентной волной, которая при отражении от его поверхности попадает на сдвиговый элемент, разперед объективом СС**D**-камеры мещенный (рис. 1). В плоскости изображения ССД-камеры появляются два смещенных изображения ОК. Интерференция световых волн образует хаотическую микроинтерференционную спекл-структуру, которая с помощью ССД-камеры вводится в компь-Полученные микроинтерференционные ютер. спекл-структуры, записанные для двух состояний объекта (до и после нагружения), сравниваются и обрабатываются с целью получения макроинтерференционных полос (широграммы), которые несут информацию о производных от компонент вектора перемещений точек поверхности. Концентрация напряжений и деформаций в зоне дефектов под воздействием нагрузки проявляется в виде локальной особенности на картине интерференционных полос. На основе полученных данных можно судить о наличии дефектов в контролируемом объекте [10, 11]. Метод также позволяет определить размер ядра сварной точки. Результаты применения электронной ширографии для диагностики сварных точечных соединений приведены в работе [12].

К недостаткам электронной ширографии можно отнести необходимость нагружения ОК, что может потребовать дополнительных приспособлений и времени на проведение контроля КТС. К тому же по полученным картинам интерференционных полос трудно судить о параметрах дефекта.

Вихретоковые методы контроля. Вихретоковый (электромагнитный) метод контроля основан на регистрации изменения поля вихревых токов, наводимых в приповерхностном слое изделия. Вихретоковый метод применительно к КТС ис-



Рис. 1. Схема контроля с применением электронной ширографии: 1 — сварная конструкция; 2 — источник лазерного излучения; 3 — подвижное зеркало; 4 — светоделитель; 5 — ССD-камера; 6 — неподвижное зеркало; 7 — компьютер

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

пользуют для контроля размеров литого ядра. При отсутствии литого ядра локальная электропроводность максимальна и соответствует полному непровару. С увеличением литого ядра до номинального значения она снижается до некоторой экспериментально установленной величины. Изменение электропроводности вызывает изменение электрических параметров преобразователя — активного и реактивного сопротивления катушки индуктивности, которое регистрируется дефектоскопом [2, 13].

На чувствительность электромагнитного метода значительно влияет зазор между датчиком и поверхностью контролируемого изделия (обусловленный глубиной вмятины), а также их взаимное расположение, форма и размеры [14]. Так как в настоящее время не существует теоретических методов установления зависимости удельной электрической проводимости от дефектности сварного соединения, то задача решается экспериментальным путем [15], что можно отнести к недостаткам данного метода.

Магнитные методы контроля. Магнитные методы НК применяют главным образом для контроля изделий из ферромагнитных материалов. В зависимости от используемого способа получения информации магнитные методы делятся на магнитопорошковый, магнитографический, феррозондовый, индукционный, эффект Холла, пондеромоторный, магниторезисторный [4]. С помощью магнитных методов контролируют размеры сварной точки, сплошность и механические свойства. При использовании магнитных методов в области сварного соединения создается сильное магнитное поле. Любой дефект, попадающий в это поле, будет создавать локальное поле утечки (рассеяния). По распределению магнитного поля вокруг места сварного соединения определяют качество КТС. Например, в магнитопорошковом способе характер распределения магнитного поля определяется по расположению частиц, специально помещенных на поверхности изделия. Очевидным недостатком данного способа является его трудоемкость и невозможность автоматизации (в отличие от других способов магнитного НК). К общим недостаткам традиционных магнитных методов можно отнести то, что распределение магнитного поля на поверхности ОК может зависеть не только от дефектов, но и от локальной структурной или магнитной неоднородности металла. Это требует создания специализированных методов обработки первичной информации, чтобы избежать ложной расшифровки полученных в процессе контроля данных.

В работе [16] предложен способ магнитного контроля точечных сварных соединений, при котором сварное соединение после сварки размагничивают, а затем намагничивают в слабых диапазонах полей 2...40 А/см. Над сварной точкой устанавливают феррозонд-градиентометр перпендикулярно плоскости соединения. С помощью устройства сканирования датчик перемещают над сварной точкой с постоянной скоростью. С шагом h = 0,1 мм проводят запись величины нормальной составляющей поля рассеяния, выделяют ее экстремальные значения, а о качестве сварного соединения судят по диаметру сварной точки, который определяется выражением d = hn (где n — количество измерений между двумя экстремумами).

Для повышения пространственного разрешения и чувствительности магнитного метода используют специальные миниатюрные датчики в виде решеток на базе магниторезисторов (giant magnetoresistor, GMR) или датчиков SDT (spin dependent tunneling) [17, 18].

Заслуживает внимания возможность применения для контроля КТС метода магнитной памяти металла (МПМ) [19]. Это метод НК, основанный на анализе распределения собственного магнитного поля рассеяния (СМПР) на поверхности изделий для определения зон концентрации напряжений, дефектов и неоднородности структур металла и сварных соединений [20]. Путем считывания СМПР, формирующегося естественным образом в процессе сварки и отображающего остаточную намагниченность, можно выполнять интегральную оценку состояния сварного соединения. Качество соединения оценивают по характеру распределения нормальной составляющей магнитного поля и его градиента. Бесспорным преимуществом метода является то, что не используется процедура намагничивания изделия. Однако в некоторых случаях использование метода МПМ для КТС может потребовать предварительных экспериментальных исследований для разработки методики контроля и способов обработки информации, так как согласно некоторым исследованиям результаты, полученные с использованием данного метода, не позволяют достоверно прогнозировать место разрушения образцов [21].

Для контроля КТС разработан метод, получивший название магнитно-тепловой [22]. Суть метода заключается в том, что участок конструкции, подлежащий сварке, предварительно намагничивают постоянным магнитным полем определенной величины и направления, а затем сваривают. Под действием теплового поля от источника сварочного нагрева металл размагничивается. После сварки характер распределения остаточной магнитной индукции в общем случае будет отражать характер распространения теплового поля в пределах температур ниже точки Кюри. Учитывая, что непровар в основном связан с недостаточным разогревом соответствующей зоны металла, по распределению полей остаточной магнитной ин-

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕ

дукции можно определить геометрические параметры зоны проплавления сварного соединения.

Интерес также представляет развитие магнитооптического метода контроля, который основан на визуализации магнитограмм [23]. В первую очередь метод используется для контроля поверхностных дефектов (трещин). Кроме этого, с помощью магнитооптического контроля можно визуализировать области концентрации остаточных напряжений в точке роста трещин. Важными преимуществами метода является некритичность к плоскостности, шероховатости и ориентации исследуемой поверхности, возможность программной обработки и документирования результатов контроля.

В работе [24] предложен способ магнитооптического контроля, который заключается в том, что после намагничивания ОК к его поверхности прижимается гибкий магнитный носитель. На носитель копируется магнитное поле при перемещении его вдоль поверхности изделия. Записанное распределение намагниченности визуализируется в магнитооптической пленке из копии распределения, полученной на гибком магнитном носителе.

Электрические методы контроля. Согласно работе [25], к перспективным методам НК соединения, полученного контактной точечной сваркой, относится использование токов шунтирования (рис. 2). Способ состоит в пропускании через сварное соединение с одной стороны листа постоянного или высокочастотного тока 10...20 А в импульсном режиме (0,3...0,5 с) с замером тока шунтирования (величины падения напряжения со стороны второго листа в области сварки). По величине сигнала от датчика судят о характере сварки по сравнению с сигналом от эталонного образца.

Тепловые методы контроля. Тепловые методы основаны на измерении температурного поля поверхности объекта, являющегося источником информации об особенностях процесса теплопередачи, которые, в свою очередь, зависят от наличия внутренних или наружных дефектов. Основными регистрируемыми параметрами являются интенсивность, температурный градиент, контраст, лучистость и др.

Достоинствами теплового контроля являются дистанционность (при условии использования бесконтактных датчиков), высокая производительность испытаний и возможность создания автоматизированных систем контроля и управления технологическими процессами. К недостаткам бесконтактных измерений можно отнести достаточно жесткие требования к чистоте окружающей среды и качеству подготовки поверхности. Для контроля КТС разработаны специализированные системы, в которых предусмотрен местный нагрев участка точки и термографическое определение распределения температуры в районе соединения. Система следует за сварочным роботом и фикси-



Рис. 2. Схема контроля непровара с использованием токов шунтирования:  $I_{\rm m}$  — ток шунтирования;  $I_{\rm p}$  — рабочий ток;  $\Pi$  — потенциальный щуп; T — токовый щуп

рует дефекты сварки [26]. В качестве импульсного источника нагрева рекомендуется использовать ксеноновую блитц-лампу [27].

Контроль размера литого ядра в сварном точечном соединении можно проводить с помощью анализа термоупругих напряжений. В данном случае с помощью инфракрасной термографии (ИКТ) регистрируется распределение температуры в области сварного соединения, обусловленное адиабатическим тепловым расширением, которое является результатом приложенных к ОК переменных механических сил. Когда величина напряжений ниже предела упругости, соотношение между изменением температуры  $\Delta T$  и изменением главного напряжения  $\Delta \sigma$  может быть выражено следующим уравнением [28]:

$$\Delta T = (-kT\Delta\sigma)/\rho C_v = -K_m T\Delta\sigma, \tag{1}$$

где k — коэффициент теплового расширения; T — абсолютная температура;  $\rho$  — плотность;  $C_v$  — удельная теплоемкость при постоянном объеме;  $K_m$  — коэффициент термоупругости.

Таким образом, регистрируя распределение температуры можно определить изменение суммы главных напряжений. Коэффициент термоупругости  $K_m$  имеет очень низкие значения, например, для алюминия  $K_m \approx 8,9 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{H}$ . Если предположить, что изменение суммы главных напряжений составит  $\Delta \sigma = 10$  МПа, то при комнатной температуре для алюминия получим  $\Delta T \approx 0,027$  К, т. е. для измерения температуры с высокой точностью необходима соответствующая разрешающая способность оборудования. Современные инфракрасные сенсоры имеют соизмеримую с рассчитанной выше величиной  $\Delta T$  разность эквивалентных шумовых температур при измерении методом ИКТ. Соответственно получить разрешаю-

### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

щую способность и точность, достаточные для измерения термоупругих напряжений, довольно сложно. Для решения проблем с измерением напряжений методом ИКТ при контроле точечных сварных соединений было предложено учитывать тот факт, что объект измерения находится под воздействием переменных циклических нагрузок, поэтому из выходных данных инфракрасного сенсора выбираются только данные о температурах, изменяющихся синхронно с сигналами нагрузки [29]. Они затем суммируются и усредняются для каждого цикла нагружения, что дает возможность значительно повысить точность и разрешающую способность при измерении температуры. Недостатком ИКТ является необходимость приложения переменных нагрузок к ОК.

Необходимо отметить, что тепловые методы могут быть использованы не только для контроля сварных соединений в процессе эксплуатации, но и для управления процессом сваривания [30].

Радиационные методы контроля. Радиационный контроль сварных соединений обычно проводят с помощью рентгеновского или гаммаизлучения [31]. Этим способом выявляются трещины, раковины, скопление оксидов, поры и выплески. К сожалению, рентгеновское просвечивание для большинства металлов не позволяет установить наличие литой зоны сварных соединений, так как коэффициент ослабления рентгеновских лучей литого и основного металлов практически одинаковы. Поэтому на рентгеновском снимке граница литого ядра практически не выявляется, а видимый круг иной контрастности связан с вмятиной от электродов. Однако у некоторых металлов в результате сварки металл литой зоны неоднороден по химическому составу. Это приводит к неодинаковому ослаблению рентгеновских лучей различными участками литого ядра.

Можно искусственно вызвать химическую неоднородность металла зоны сварки, введя предварительно в нахлестку соединения рентгенокотрастный материал-свидетель (РКМС), имеющий высокий коэффициент ослабления рентгеновских лучей [32]. При расплавлении металла в ядре РКМС перемещается на периферию. При просвечивании на рентгенограмме видно светлое кольцо, соответствующее диаметру литого ядра. Если литое ядро не образовалось, то РКМС равномерно распределен в нахлестке и светлого кольца нет.

Очевидными недостатками рентгеновских методов являются их повышенная опасность для дефектоскописта, значительная стоимость и габариты оборудования, трудность расшифровки полученных снимков. Однако в последнее время налажен выпуск переносных малогабаритных рентгеновских дефектоскопов (например, серия ERESCO MF4), которые соответствуют европейским требованиям безопасности и могут применяться в условиях производства. При этом достигнут значительный прогресс в разработке методов расшифровки и классификации дефектов по радиографическим снимкам сварных соединений, что позволит автоматизировать процесс контроля. Так, в работе [33] приведено математическое описание изображений различных дефектов сварных соединений и разработан эвристический классификатор для определения типа дефекта. В работе [34] предложен алгоритм многомасштабного анализа рентгенографических снимков металлоконструкций, направленный на обнаружение дефектов и оценку качества сварных соединений. Алгоритм основан на использовании вейвлет-преобразования с выбором масштабирующих коэффициентов адаптивно к изменению геометрических характеристик визуальных образов дефектов.

Акустические методы контроля. На сегодня акустические методы приобрели наибольшее распространение в дефектоскопии сварных соединений, в том числе и КТС. Эффективность метода доказана большим количеством исследований и разработок, проведенных на разных заводах [35– 38]. Американская металлургическая компания «Alcoa» и международная компания «ScanMaster-IRT» на протяжении нескольких лет проводили исследования качества КТС алюминиевых сплавов с помощью УЗ методов. Результаты НК (ультразвукового) и разрушающего (контроля на разрыв) совпали более чем в 90 % случаев [39].

При УЗ контроле, как правило, используется пьезоэлектрический преобразователь частотой 10...20 МГц с линией задержки для генерации серии эхо-сигналов, представляющих различные отражения звуковой волны внутри сварного соединения, которые далее интерпретируются для определения его качества [40]. При использовании обычных одноэлементных датчиков результат контроля отображается на экране дефектоскопа в виде А-скана, представляющего зависимость амплитуды принятых сигналов от времени (толщины). УЗ контроль позволяет определять раковины, трещины, поры и выплески, а также может эффективно использоваться для диагностики полного непровара. Для определения частичного непровара необходимо использовать специальные методики контроля и расшифровки УЗ дефектограмм. Недостатком большинства УЗ методов является невозможность отличить наличие литого ядра от слипания. В целом для УЗ контроля характерно то, что дефектоскопист должен принимать непосредственное участие в настройке контрольно-измерительных операций во время контроля, например, устанавливать стробы, задавать браковочные уровни и, вообще, наблюдать сам Аскан для обеспечения корректной работы системы. Поэтому перспективным направлением является развитие и внедрение в практику УЗ контроля систем искусственного интеллекта, которые бы позволяли принимать решения по результатам контроля с минимальным вовлечением в этот процесс дефектоскописта. В последнее время для интерпретации УЗ осциллограмм и оценки качества КТС широко применяются искусственные нейронные сети, что позволяет уменьшить субъективную ошибку и повысить степень автоматизации контроля [41, 42].

Для контроля сварных точек в основном применяют эхо- и реверберационный методы [43]. Первый позволяет определять толщину литого ядра в направлении прозвучивания, второй — основан на анализе времени объемной реверберации (процесса постепенного затухания звука в некотором объеме ОК), что дает возможность определить микроструктуру материала и литого ядра. Литое ядро имеет крупнозернистую структуру, которая увеличивает затухание ультразвука, вследствие чего уменьшается количество убывающих донных импульсов. Измерение толщины литого ядра в направлении прозвучивания вызывает определенные трудности. Это связано с тем, что для некоторых материалов акустические характеристики литого ядра и основного металла практически идентичны, а значит, даже при образовании требуемой зоны взаимного расплавления, отражения УЗ волны от границы изделиеядро (ядро-изделие) будут минимальны и трудно различимы на А-скане. Теоретическим и экспериментальным аспектам применения эхо-метода для контроля КТС посвящены работы [44, 45], в которых описаны схемы и приборы контроля, а также приведены УЗ дефектограммы образцов, выполненных точечной сваркой. Применение эхо-метода для контроля изменения диаметра литого ядра в зависимости от циклического нагружения сварного точечного соединения описано в работе [46].

В качественном сварном соединении расстояние между эхо-сигналами пропорционально общей толщине свариваемых деталей, а скорость распада (скорость, с которой происходит снижение амплитуды в последовательных эхо-сигналах) соотносится с затуханием внутри литого ядра [47]. Если в процессе сварки не образовалось литого ядра (т. е. имеет место полный непровар), то последующие эхо-сигналы гораздо ближе один к другому и имеют большую амплитуду [48]. В случае некачественного сварного соединения (например, диаметр литого ядра меньше номинального) часть звукового импульса будет отражаться от поверхности на глубине общей толщины деталей, а другая часть от поверхности на расстоянии толщины единичного материала. При этом на дисплей будут выводиться мелкие пики, представляющие отраженные сигналы на толщине одного материала, между большими более выраженными эхо-сигналами от свариваемых материалов (рис. 3). Если металлические части вплавлены, но не до конца изза недостаточно высокой температуры, изменится скорость распада волны, что повлечет за собой отображение на дисплее эхо-сигналов больших размеров с несущественным изменением амплитуды последовательных эхо-сигналов.

В целом, контроль эхо-методом при контактном нормальном вводе колебаний в точечное сварное соединение весьма затруднителен. Вопервых, это обусловлено шероховатостью (или наличием выплесков) и криволинейностью поверхности (рис. 4, *a*), а также малыми размерами сварной точки, что обусловливает необходимость подбора размера датчика под диаметр сварной точки



*Рис. 3.* А-скан УЗ сигнала при контроле сварной точки: *а* — хорошее сварное соединение; *б* — некачественное сварное соединение (диаметр литого ядра меньше номинального)

#### АУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

(рис. 4, б). Криволинейность, обусловленная вмятинами от электродов, затрудняет точную установку преобразователя больших размеров, чем сварная точка, и приводит к погрешности измерения толщины литого ядра (рис. 4, в). Для того, чтобы избежать влияния шероховатости на результат контроля используют иммерсионный способ ввода УЗ колебаний в ОК (рис. 4, г). Недостатком иммерсионного способа является необходимость создания сложной конструкции удержания жидкости в месте контроля, что особо трудно реализуемо в производственных условиях при контроле изделий сложной формы. Во-вторых, при малых толщинах контролируемых эхо-методом изделий приходится использовать специальные линии задержки (призмы) и повышать частоту вводимых УЗ колебаний, чтобы на результат контроля не влияла «мертвая зона» преобразователя (рис. 4, *d*). Мертвая зона — это зона нечувствительности преобразователя, работающего в эхо-импульсном режиме, которая состоит из длительности зондирующего импульса и реверберационных шумов:

$$h_{\rm M3} = \frac{C}{2} \, (\tau_{\rm 3H} + \tau_{\rm III}), \tag{2}$$

где  $h_{_{\rm M3}}$  — глубина мертвой зоны;  $\tau_{_{\rm 3H}}$  — длительность зондирующего импульса;  $\tau_{\rm m}$  — длительность реверберационных шумов; C — скорость УЗ колебаний в ОК.

Длительность зондирующего импульса уменьшают сильным демпфированием пьезопреобразователя. Однако при этом стоит учитывать, что снижается чувствительность контроля. Уменьшение реверберационных шумов обеспечивается

частотными свойствами самого пьезоэлемента, а также качеством его акустического и электрического демпфирования, в частности, качеством приклеивания преобразователя к демпферу и протектору. По формуле (2) можно предварительно рассчитать глубину мертвой зоны для разных материалов ОК, частот преобразователя и общей длительности зондирующего импульса. Так, для алюминия со средней скоростью ультразвука С = 6300 м/с при общей длительности зондирующего импульса 5 периодов колебаний ( $\tau_{\text{общ}} = \tau_{_{3H}} + \tau_{_{1H}} = 5T = 5/f$ ) на частоте 5 МГц глубина мертвой зоны составит  $h_{\rm M3} = 3,15$  мм, на частоте 20 МГц —  $h_{\rm M3} = 0,79$  мм.

Важным фактором, который непоследней. Это связано с тем, что на границе «линия задержки-изделие» будет возникать отраженная волна. При небольших толщинах линии задержки и малом затухании эта волна будет много раз переотражаться по толщине линии задержки и регистрироваться преобразователем. Если эти сигналы будут перекрывать полезные сигналы от ОК, то правильная интерпретация результатов контроля будет невозможной. Избежать влияния линии задержки и глубины мертвой зоны можно, используя раздельно-совмещенный тип датчика. Однако такие датчики могут иметь сравнительно большие габариты, что усложняет их использование для контроля КТС. При использовании раздельно-совмещенных датчиков необходимо учитывать, что время задержки импульса в ОК непропорционально толщине [49].

Одной из современных систем УЗ контроля, в которой используется иммерсионный способ контроля сварных точечных соединений, является «Nugget Viewer». Это устройство оснащено миниатюрным УЗ преобразователем и позволяет визуализировать состояние металла как в сварных точках, так и на поверхности поперечного сечения в определенных местах [50]. Сканирующее устройство перемещает преобразователь, помещенный в иммерсионную ванну диаметром 12 мм. Минимальный шаг сканирования 0,2 мм. Система сбора данных обрабатывает полученную информацию и выводит ее на цветной экран. В приборе «Nugget Viewer» реализована функция расчета площади и диаметра ядра сварной точки по результатам измерения. Несмотря на положительные возможности системы, из-за использования иммерсион-



обходимо учитывать при разработ- Рис. 4. Контроль КТС УЗ эхо-методом: а — влияние выплесков на установку ке датчиков с линией задержки, яв- преобразователя; б — подбор размера преобразователя под диаметр сварной ляется правильный выбор толщины точки; в — установка преобразователя, размер которого больше диаметра сварной точки (возникновение локальной иммерсионной ванны); г — иммерсионный способ контроля; *д* — установка преобразователя с линией задержки

ной ванны она имеет существенное ограничение при контроле в условиях производства.

В патенте США [51] предложена конструкция датчика для ввода УЗ колебаний в сварное точечное соединение через иммерсионную среду, находящуюся в специальной конической насадке (рис. 5). Используемый частотный диапазон излучаемых колебаний 5...25 МГц. Благодаря сканированию поверхности появляется возможность получать изображения в виде В- и С-сканов.

Конструкция датчика (рис. 5) содержит фокусирующий УЗ преобразователь 1 (в качестве которого может быть использован концентратор), который вводит колебания в коническую насадку 2, заполненную водой. Для удержания воды используется мембрана 3. Материал мембраны выбирается достаточно тонким и таким образом, чтобы он был как можно более акустически прозрачным при заданной частоте вводимых колебаний. Коническая насадка соединяется с круглым наконечником малого диаметра 4 (также заполненном водой), который является частью прижимной системы 5, служащей для обеспечения жесткого контакта датчика с поверхностью ОК, а также позволяющей удерживать датчик строго перпендикулярно поверхности. Благодаря тому, что



Рис. 5. Конструкция сканирующей системы с фокусирующим преобразователем (обозначения см. в тексте)

система 5 съемная, ее размер можно подбирать под диаметр контролируемого точечного соединения. Контактная жидкость в наконечник вводится через специальное отверстие 6, соединенное с системой подачи воды. На корпусе преобразователя (а именно на конической насадке 2) устанавливается датчик положения 7. В состав сканирующей системы входит тяговый зажим 8 и стержень 9. Данные с выхода УЗ преобразователя *1* и датчика положения 7 поступают на вход системы сбора информации 10. Очевидным преимуществом данного датчика является возможность фокусировки ультразвука, что позволяет улучшить разрешающую способность. К недостаткам стоит отнести очень сложную конструкцию.

Для контроля точечных сварных соединений можно использовать фокусирующие преобразователи на базе твердотелых концентраторов [52]. В отличие от фокусирующих преобразователей с иммерсионным вводом колебаний (см. рис. 5) они имеют более простую конструкцию (рис. 6). В таких преобразователях в качестве излучателя используются пьезопластины любого диаметра и толщины (поэтому возможно использование не только низких частот, но и частот мегагерцового диапазона), мертвая зона всегда будет находиться в теле концентратора, диаметр поверхности контакта «концентраторизделие» составляет 1,52...22. При этом в точке контакта обеспечивается не геометрический, а фазовый фокус, что не удлиняет форму исходного импульса. Благодаря малой поверхности контакта уменьшается влияние шероховатости, к тому же снижается расход контактной жидкости. К недостаткам данных преобразователей можно отнести их низкую чувствительность.

Специально для контроля точечных сварных соединений (рис. 7, *a*) фирмой «Panametrics-NDT» разработаны преобразователи серии V23xx (рабочая частота 15 МГц) и V24xx (рабочая частота 20 МГц) различных диаметров (рис. 7, *б*). Преобразователи комплектуются съемными твердотелыми или иммерсионными линиями задержек. Интерес представляют фокусирующие преобразо-



*Рис. 6.* Ультразвуковые фокусирующие концентраторы на базе рефрактора: *а* — конструкция преобразователя; *б* — экспериментальные образцы (*C*<sub>1</sub>, *C*<sub>2</sub> — скорости ультразвука в линзе и теле концентратора соответственно)

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, №1,2013

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



Рис. 7. УЗ преобразователи фирмы «Panametrics-NDT»: *a* — процесс контроля КТС; *б* — датчики серии V23xx и V24xx; *в* — фокусирующий датчик серии V316B (V312B)

ватели серии V316В (рабочая частота 20 МГц) и V312В (рабочая частота 10 МГц) для ручного контроля с локальной иммерсионной ванной, которая оснащена сменным наконечником из нержавеющей стали (рис. 7, *в*). Преобразователи этого типа обеспечивают высокую разрешающую способность и удобны для контроля тонких материалов.

Контроль сварных точек осуществляется также зеркально-теневым методом [53]. Признаком отсутствия сварки является приход донного сигнала от первого листа к приемному искателю. Перемещая искатель по поверхности изделия, определяют размеры сварной точки.

Учитывая, что свариваемые КТС детали в основном имеют небольшие толщины, некоторыми авторами предложено использовать для контроля нормальные волны (волны Лэмба) [54]. Разработанная система включает наклонный излучатель (И) и приемник (П), которые размещаются по разные стороны сварного точечного соединения (рис. 8).

Излученная волна проходит через сварное соединение и попадает на приемник. Амплитуда принятого сигнала будет зависеть от наличия или отсутствия литого ядра. Таким образом, перемещая излучатель и приемник вдоль сварной точки и фиксируя амплитуду, можно определить диаметр литого ядра (рис. 9). Полученные результаты позволяют говорить о хорошей корреляции между измерениями амплитуды прошедшего сигнала и диаметра литого ядра. Недостатками предложенного метода является использование иммерсионного способа контроля и необходимость механического сканирования. Для устранения второго недостатка рекомендовано использовать как для излучения, так и для приема линейки пьезоэлементов. Алгоритм работы следующий: элементы излучателя возбуждают волны Лэмба в ОК пос-



*Рис.* 8. Контроль КТС с использованием волн Лэмба (*И* — излучатель; *П* — приемник)

ледовательно, а фиксируются всеми элементами приемника одновременно. После обработки данные выводятся в виде матрицы, каждый элемент которой кодирован по яркости (отметим, что полученные результаты не являются классическим В-сканом).

Значительно расширить возможности УЗ контроля КТС позволяет технология фазированных решеток (ФР) [55, 56], преимуществом которых является замена механического сканирования сварного точечного соединения электронным, что позволяет увеличить производительность контроля. Также преимуществами ФР по сравнению с обычными преобразователями являются возможность фокусировки луча для повышения разрешающей способности и получение двумерного изображения внутренней структуры ОК. Поэтому использованию систем на базе ФР для контроля КТС необходимо уделять первостепенное внимание.

К общему недостатку УЗ методов с применением пьезопреобразователей часто относят то, что они требуют наличия акустического контакта, который оказывает существенное влияние на информативные сигналы. В целом надежность УЗ контроля зависит от правильной установки пьезопреобразователя на центр сварной точки, его ориентации относительно поверхности детали, качества контакта [57]. Это приводит к необходимости разработки специальных конструкций датчиков и схем прозвучивания, зависящих от характеристик ОК (геометрических и физико-механических) и типов дефектов, а также использованию контактной жидкости. Соответственно, перспективным



Рис. 9. Определение диаметра литого ядра: 1 — направление излучения; 2 — сварная точка; 3 — направление перемещения датчиков; 4 — ширина полосы ослабления (пропорциональна диаметру литого ядра); 5 — амплитуда

является использование бесконтактных методов излучения/приема УЗ колебаний применительно именно к контролю КТС, основанных на электромагнитоакустическом (ЭМА) преобразовании. Среди недостатков ЭМА способа УЗ контроля ранее отмечались недостаточная чувствительность и сложность практической реализации, однако благодаря использованию современной элементной базы и теоретико-экспериментальным наработкам в настоящее время эти недостатки практически полностью устранены. При применении некоторых способов УЗ контроля КТС излучение и прием колебаний осуществляются под определенным углом к поверхности изделия, тогда как традиционные ЭМА преобразователи позволяют возбуждать волны нормально к поверхности (конечно, если не учитывать возможность возбуждения рэлеевской волны). При излучении под углом используются специальные конструкции ЭМА датчиков и способы их возбуждения [58]. Хотя в этом направлении проведено немало исследований, однако эффективное применение в промышленных целях ЭМА датчиков для ввода волн под углом к поверхности оставляет желать лучшего [59].

УЗ методы находят широкое применение не только при осуществлении контроля сварных точечных соединений в процессе эксплуатации, но и при контроле самого процесса сварки. В этом случае УЗ датчики встраиваются в сварочный электрод [13, 60]. Немецкая компания «Vogt Ultrasonic GmbH» разработала УЗ систему SpotLine для контроля и управления работой машины КТС [61]. В качестве датчиков используются два УЗ преобразователя, которые устанавливаются в канале охлаждения возле рабочей части каждого сварочного электрода.

Особое место среди методов УЗ дефектоскопии занимает акустико-эмиссионный (АЭ) метод, применяемый для контроля и управления процессом КТС [62]. При сварке в материале соединяемых деталей возникают упругие колебания (акустическая эмиссия), которые обусловлены резкими изменениями его структуры, фазовыми превращениями и развитием дефектов [63]. Сигналы АЭ можно принимать на протяжении всего сварочного цикла, а также в процессе остывания сварного соединения. Анализ параметров АЭ сигналов позволяет оценить размеры литой зоны свариваемых деталей и следить за возникновением внутренних дефектов, а также диагностировать слипание (по отсутствию регистрации сигналов АЭ) [64, 65]. Однако метод АЭ имеет ряд недостатков (что затрудняет его широкое применение для контроля и управления процессом КТС), основным из которых является низкая помехоустойчивость, поскольку в процессе сварки сигналы АЭ регистрируются на фоне высокого уровня шумов сварочного оборудования.

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Другие методы НК. К неразрушающему контролю относят испытания соединений тарированной нагрузкой [25]. В этом случае к сварному соединению прикладываются нагрузки, не превышающие допустимые.

Для контроля точечных сварных соединений предложено использовать метод электромеханического импеданса [66]. Данный метод подразумевает применение матрицы миниатюрных пьезопреобразователей, которые жестко крепятся к поверхности изделия в области сварного соединения. При переменной нагрузке, приложенной к изделию, снимаются данные с каждого датчика и проводится их анализ. Измеряемой величиной является электромеханический импеданс пьезопреобразователей.

Выбор методов контроля. Эффективность применения методов НК определяется большим количеством факторов, главные из которых — выявляемость (типы) дефектов, производительность, оперативность, безопасность и стоимость [67]. В целом понятие «эффективность» достаточно трудно формализируемо при сравнении разных методов контроля и включает не только перечисленные выше факторы. Например, эффективность применения того или иного метода НК зависит от геометрических параметров и физико-механических свойств ОК; степени развития способов обработки полезного сигнала (теоретической базы для используемого метода); уровня развития электроники и схемотехники (возможности использования высокоскоростных устройств приема/передачи и обработки данных); разработки новых методик и материалов для проведения контроля и т. п. Поэтому любое сравнение эффективности методов НК является достаточно субъективным, узконаправленным и применимым в течение ограниченного промежутка времени (например, до очередного скачка в развитии вычислительной техники или создания нового поколения преобразователей для того или иного метода). Например, в работе [68] приведены примерные оценки различных методов НК по выявляемости дефектов в изделиях из различных материалов различного назначения. Для сварных соединений оценки следующие: радиационный — 3, акустический — 5, вихретоковый — 3, магнитный — 3, капиллярный — 4, тепловой — 3, оптический — 0, радиоволновой — 0 (где 5 — отлично, 4 — хорошо, 3 удовлетворительно, 0 — неудовлетворительно). Конечно же, такая оценка является обобщенной, потому что неизвестно, по каким конкретно параметрам и какой методике проводилось сравнение. Хотя оптическому методу поставлена оценка «0», однако мы считаем, что тенденции развития этого метода для контроля сварных соединений (и, в частности, КТС) уже сейчас позволяют значительно повысить эту оценку.

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

Выбор метода НК контактной точечной сварки может быть обусловлен: 1) особенностями геометрических параметров и физико-механических характеристик ОК; 2) требованиями к качеству изделий, что регламентируется соответствующей документацией; 3) характером и видом наиболее вероятных и/или опасных дефектов; 4) производительностью метода контроля; 5) экономическими показателями.

Однако оптимальным решением является использование комплексного подхода к контролю качества КТС. Данный подход заключается в использовании ряда методов, в результате которых получают полную информацию о наличии дефектов, их виде, размерах, глубине залегания [69]. Естественно, что недостатком такого подхода являются значительные затраты времени на проведение всех контрольно-измерительных операций. Все же с развитием электроники (особенно высокоскоростных компонентов обработки, приема/передачи данных) этот недостаток вполне преодолим. Еще один фактор, позволяющий снизить время контроля, — автоматизация процесса измерения и анализа данных, при котором оператор лишь контролирует этот процесс (его вмешательство может быть обусловлено только возникновением нестандартной ситуации). В этом отношении ключевую роль в ближайшем будущем будут играть нейронные сети и разработка алгоритмов классификации дефектов.

Применительно к контролю КТС можно предложить следующий подход, в котором сочетаются такие методы контроля как поверхностных, так и внутренних дефектов: УЗ (с использованием либо ФР, либо ЭМА преобразователей), оптический и магнитотепловой (при условии его дальнейшего развития). Преимуществом оптического, магнитотеплового и УЗ (с использованием ЭМА датчиков) методов является их бесконтактность. Хотя при УЗ контроле с использованием ФР необходим контакт преобразователя и ОК, все же он не требует механического сканирования и позволяет получать двумерное изображение внутренней структуры сварного соединения. УЗ контроль успешно применяется для диагностики таких внутренних дефектов, как раковины, трещины, поры, а также непровар. Учитывая, что непровар является самым опасным дефектом и УЗ способом не всегда эффективно выявляется, для повышения достоверности его обнаружения используется магнитотепловой метод. Установкой оптического контроля в данном случае можно, с одной стороны, выявить поверхностные трещины, выплески, форму и размеры сварной точки; с другой — корректировать пространственное положение остальных узлов системы. Оптические методы можно использовать и для косвенного контроля непровара, который основан на регистрации отсутствия или уменьшения зоны цветов побежалости, или отсутствия вмятины [70]. При таком подходе важно оптимизировать этапы контроля, например, проводя одновременный контроль разными методами, допускающими параллельное выполнение.

#### Выводы

Показано, что НК сварного соединения, выполненного контактной точечной сваркой, отличается разнообразием применяемых методов, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Самым распространенным методом контроля на сегодня является ультразвуковой, что обусловлено большим количеством методик контроля, номенклатурой типов датчиков и их размеров, возможностью использовать различные типы волн и схемы прозвучивания, а также компактностью аппаратуры для проведения контроля. Перспективным является внедрение ЭМА технологий для контроля КТС.

Учитывая, что отдельные недостатки, присущие каждому из методов контроля, не позволяют надежно выявлять самый опасный дефект точечной сварки — непровар, показана перспективность использования одновременно нескольких бесконтактных методов, а также необходимость разработки оптимальных способов анализа результатов контроля для каждого отдельного метода.

- 1. Кочергин К. А. Контактная сварка. Л.: Машиностроение, 1987. 240 с.
- 2. *Чулошников П. Л.* Контактная сварка. М.: Машиностроение, 1977. 144 с.
- Климов А. С. Контактная сварка. Вопросы управления и повышении стабильности качества. — М.: Физматлит, 2011. — 216 с.
- Сварка. Резка. Контроль. Справ. В 2-х т. Т. 2 / Н. П. Алешин, Г. Г. Чернышов, А. И. Акулов и др. // Под общ. ред. Н. П. Алешина, Г. Г. Чернышова. — М.: Машиностроение, 2004. — 480 с.
- 5. Гуляев А. И. Технология и оборудование контактной сварки. М: Машиностроение, 1985. 254 с.
- Connie R., Warren P. Inspecting RSW electrodes and welds with laser-based imaging // Welding J. — 2007. — 86, № 2. — P. 38–45.
- Development of an automatic weld surface appearance inspection system using machine vision / Lin Sanbao, Fu Xibin, Fan Chenglei, et.al. // China weld. — 2009. — № 3. — P. 74–80.
- Rethmeier M., Brauser S., Weber G. Potential of optical strain field measurement for the characterization of the properties of resistance-spot-welded joints // Welding and Cutting. — 2011. — № 1. — P. 48–52.
- 9. Francis D., Tatam R. P., Groves R. M. Shearography technology and applications: a review // Measurement Sci. and Technology. 2010. 21, № 10. 29 p.
- Technology. 2010. 21, № 10. 29 р. *Findeis D., Gryzagoridis J., Asur E.* Phase unwrapping applied to portable digital shearography [Электрон. ресурс] // CD-Proc.: IV Pan American conf. for Non Destructive Testing: 22–26 Oct. 2007, Buenos Aires, Argentina.
- Методика, технология и аппаратура ширографического неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Олейник, И. В. Киянец // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2004. — № 3. — С. 25–28.
- Оперативна діагностика зварних точкових з'єднань методом електронної ширографії з використанням механічного та термічного навантаження / Л. М. Лобанов, В. А. Півторак, . В. Киянець та ін. // Неруйнівний конт-

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

роль та технічна діагностика: Мат. 7-ї Нац. наук.-техн. конф. і виставки, 20–23 лист. 2012. — Київ, 2012. — С. 378–382.

- Технология и оборудование контактной сварки: Уч. для машиностр. вузов / Б. Д. Орлов, А. А. Чакалев, Ю. В. Дмитриев и др. // Под общ. ред. Б. Д. Орлова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1986. — 352 с.
- Сварка и свариваемые материалы: В 3-х т. Т. П. Технология и оборудование. Справ. изд. / Под ред. В. М. Ямпольского. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1996. — 574 с.
- Дерун Е. Н. Вихретоковый контроль точечных сварных соединений. — Старая Русса: СПК (филиал) НовГу им. Ярослава Мудрого, 2010. — 142 с.
- Пат. 2029295 РФ, МПК6 G01N27/83. Способ магнитного контроля точечных сварных соединений / С. Ф. Мельников, В. П. Березиенко, И. В. Королев, В. Л. Искров. — Заявл. 19.07.1992; опубл. 20.02.1995. — 3 с.
- A magnetic sensor array for spot welding quality monitor / Wang Rui, Luo Zhen, Shan Ping et al. // China Welding. — 2010. — 19, № 3. — P. 70–73.
- A New Perspective on Magnetic Field Sensing / M. J. Caruso, T. Bratland, C. H. Smith, R. Schneider // Sensors Magazine. 1998. 15, № 12. Р. 34–46.
   Дубов А. А., Колокольников С. М. Проблемы контроля
- Дубов А. А., Колокольников С. М. Проблемы контроля качества сварки и их решение на основе метода магнитной памяти металла // Технология машиностроения. — 2005. — № 4. — С. 43–47.
- ГОСТ Р ИСО 24497-1–2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Ч. 1. Термины и определения. — Взамен ГОСТ Р 52081-2003; Введ. 01.12.2010. — М.: Стандартинформ, 2010. — 7 с.
- О проблемах применимости метода магнитной памяти металла при контроле напряженно-деформированного состояния металлоконструкций / М. Б. Аркулис, М. П. Барышников, Н. И. Мишенева, Ю. И. Савченко // Дефектоскопия. — 2009. — № 8. — С. 10–12.
   Куликов В. П., Болотов С. В. Магнитно-тепловой метод
- Куликов В. П., Болотов С. В. Магнитно-тепловой метод контроля сварных соединений, полученных контактной точечной сваркой // Свароч. пр-во. — 2003. — № 9. — С. 16–20.
- Магнитооптическая дефектоскопия изделий и соединений из ферромагнитных сталей / Ю. С. Агалиди, С.В. Левый, В.А. Троицкий, Ю. Н. Посыпайко // Неруйнівний контроль та технічна діагностика: Матеріали 6-ї Нац. наук.-техн. конф. і виставки, 9–12 червня 2009. — Київ, 2009. — С. 63–66.
- Пат. 2159426 РФ, МПК7 G01N27/82, G01N27/83. Способ магнитооптического контроля изделия / С. В. Левый, Ю. С. Агалиди. — Заявл. 25.10.1999; опубл. 20.11.2000. — 7 с.
- Банов М. Д. Технология и оборудование контактной сварки: уч. для студ. учр. сред. проф. образования. — 3-е изд., стер. — М.: Издат. центр «Академия», 2008. — 224 с.
   Пат. Германии 102006057802.3, МПК8 G01N 25/72
- Пат. Германии 102006057802.3, МПК8 G01N 25/72 (2006.01). Verfahren und Prufsystem zur zerstorungsfreien Prufung von Materialverbindungen, insbesondere von Widerstandsschweibverbindungen / А. G. Daimler, Beyer Roland, Bohmisch Mathias et al. — Заявл. 06.12.06; опубл. 18.10.07. — 18 с.
- Пат. Германии 102007050005.1, МПК8 G01N 25/72 (2006.01). Verfahren und Prufsystem zur zerstorungsfreien Prufung von Materialverbindungen, insbesondere von Widerstandsschweibverbindungen / Daimler AG, Greiner Glaudia. — Заявл. 17.10.07; опубл. 23.04.09. — 19 с.
- Analysis of effective nugget size by infrared thermography in spot weldment / J. H. Song, H. G. Noh, S. M. Akira et al. // International Journal of Automotive Technology. — 2004. — 5, № 1. — P. 55–59.
- Сакагами Т. Измерение термоупругих напряжений с помощью инфракрасной термографии // Ж-л япон. свароч. об-ва. — 2003. — 72, № 6. — С. 51–55.
- 30. *Термосенсорная* диагностика и управление качеством соединений при контактной сварке / П. П. Архипов, А. Ф. Керемжанов, Н. Г. Ефименко и др. // Сварщик. 2002. № 5(27). С. 50–51.

- Зуев В. М., Табакман Р. Л., Удралов Ю. И. Радиографический контроль сварных соединений. СПб.: Энергоатомиздат, 2001. 148 с.
- Меньшиков Г. А. Опыт и перспективы использования методов контроля точечной контактной сварки при производстве изделий ответственного назначения // Сварка и контроль-2004 / Матер. Всерос. с межд. участием науч.техн. конф., посвященной 150-летию со дня рождения Н. Г. Славянова: Теория сварки, 17–20 мая 2004. Пермь, 2004. С. 324–327.
   Григорченко С. А., Капустин В. И. Классификация де-
- 33. Григорченко С. А., Капустин В. И. Классификация дефектов при автоматизированном радиографическом контроле сварных соединений // Дефектоскопия. 2009. № 9. С. 73–87.
- Фомин А. А., Жизняков А. Л. Оценка качества сварных соединений по многомасштабному образу рентгенограмм // Тяжелое машиностроение. — 2010. — № 6. — С. 19–23.
- Fr. Stefan The evolution of weld inspection in the automotive industry // Welding J. — 2009. — 88, № 8. — P. 52–53.
- 36. Гугунов А. А., Кривов А. В., Хайруллин Т. В. Эффективность применения УЗ контроля качества соединений контактной точечной сварки кузовов автомобилей в ОАО АВТОВАЗ // Матер. Всерос. науч.-техн. конф.: Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства, 15–17 ноября 2006. Тольятти, 2006. С. 24–27.
- Исследование и внедрение технологии УЗК качества точечной сварки кузовов автомобилей LADA в ОАО «АВ-ТОВАЗ» / А. В. Новиков, Р. Р. Хакимьянов, В. В. Григорович, А. В. Семеренко // В мире неразруш. контроля. 2009. № 2(44). С. 66–69.
   Rivas S., Servent R., Belda J. Automated spot weld inspecti-
- Rivas S., Servent R., Belda J. Automated spot weld inspection in the automotive industry [Электрон. pecypc]. http://www.ndt.net/article/wcndt2004/html/automotive/408 \_rivas/408\_rivas.htm.
- Donald J. Spinella, John R. Brockenbrough, Joseph M. Fridy Trends in Aluminum Resistance Spot Welding for the Auto Industry // Welding J. — 2005. — 84, № 1. — P. 34– 40.
- Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Т. 3. Ультразвуковой контроль / Под ред В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 2004. — 864 с.
- Martin O., Lopez M., Martin F. Artificial neural networks for quality control by ultrasonic testing in resistance spot welding // J. of Materials Processing Technology. — 2007. — 183, № 2-3. — P. 226–233.
   Ham. CША 7516022B2; MIIK8 G06F 17/40, G06F 19/00,
- Пат. США 7516022B2; МПК8 G06F 17/40, G06F 19/00, G01B 17/00, G01B 21/32. Method and system for assessing quality of spot welds. / Lee Hsu-Tung, Maev Roman Gr., Maeva Elena Yu, Titov Serguei. — Заявл. 29.09.06; опубл. 07.04.09. — 27 с.
- Бигус Г. А., Травкин А. А. Неразрушающий контроль сварных соединений, выполненных контактной сваркой // Матер. 17-й Междунар. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики», 5–9 окт. 2009. — Ялта, 2009. — С. 122–124.
   Семеренко А. В. Ультразвуковой контроль качества то-
- 44. Семеренко А. В. Ультразвуковой контроль качества точечной сварки // В мире неразруш. контроля. 2003. № 2(20). С. 43–44.
  45. Бобовников И. Н., Семеренко А. В. Опыт применения УЗ
- 45. Бобовников И. Н., Семеренко А. В. Опыт применения УЗ методов оценки качества точечной сварки (на примере «Машиностроительного завода» г. Электросталь) / // Там же. — 2004. — № 2 (24). — С. 52–54.
- Vural M., Akkus A. The ultrasonic testing of the spot welded different steel sheets // J of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. — 2006. — 18, № 1-2. — P. 247–250.
- Doyum A. B., Sonat M. Ultrasonic Examination of Resistance Spot Welds [Электрон. pecypc]. — http://www.ndt.net/ article/dgzfp03/papers/p01/p01.htm.
- Werner Roye. Ultrasonic Testing of Spot Welds in the Automotive Industry [Электрон. ресурс]. — http://www.spotweldtesting.com/schweisspunktpruefung.de/english/sd\_298 en.pdf.
- Цапенко В. К., Куц Ю. В. Основи УЗ неруйнівного контролю: Підруч. Київ: НТУУ «КПІ», 2010. 448 с.

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

- Ториуми Н., Хиросэ Н. Оборудование для дефектоскопии точечных швов «Nugget Viewer» // Технологии сварки (Welding Technology). — 2010. — № 10. — С. 51–54.
   Пат. США US2005/0132809A1, МПК7 G01N 9/24. Меt-С. 51. ССША US2005/0132809A1, МПК7 G01N 9/24. Меt-
- Пат. США US2005/0132809A1, МПК7 G01N 9/24. Methods for ultrasonic inspection of spot and seam resistance welds in metallic sheets and a spot weld examination probe system (SWEPS) / Marvin F. Fleming, Jack P. Clark. Заявл. 12.01.2005; опубл. 23.01.2005. 19 с.
- 52. Пат. 47248 України, МПК (2009) В06В 3/00. Ультразвуковий концентратор / Р. М. Галаган, В. К. Цапенко, А. Г. Протасов, О. С. Василенко; № и2009 07366; заявл. 13.07.2009; опубл. 25.01.2010.
- 53. *Сварка* в машиностроении: Справ. В 4-х т. Т. 4 / Под ред. Ю. Н. Зорина. М.: Машиностроение, 1979. 512 с.
- Takada Hajime, Hirose Tomoyuki. An ultrasonic method for testing spot-welds // JFE Technical Report. — 2007. — № 10. — P. 26–30.
- Пат. США 7021143 В2, МПК8 G01N 29/26. Cylindricallyrotating ultrasonic phased array inspection method for resistance spot welds / Cameron J. Dasch. — Заявл. 11.12.2003; опубл. 04.04.2006. — 11 с.
- 56. Семеренко А. В., Пепеляев А. В. Использование фазированных решеток для УЗ контроля точечной сварки // Сварка и диагностика. — 2009. — № 6. — С. 49–53.
- 57. Бобров С. В. Методы и технология неразрушающего контроля качества точечной сварки // МЕGATECH: Новые технологии в промышленной диагностике и безопасности. 2012. № 3. С. 56–67.
- Малинка А. В. Изучение и прием УЗ колебаний под заданным углом при электромагнитно-акустическом методе // Дефектоскопия. — 1970. — № 5. — С. 16–20.
- Сучков Г. М. Современные возможности ЭМА дефектоскопии // Там же. — 2005. — № 12. — С. 24–39.
   Пат. США № 4449029, МПК8 В23К 11/24. Acoustic
- 60. Пат. США № 4449029, МПК8 В23К 11/24. Acoustic wave spot welder adaptive control / Herman A. Nied. Заявл. 09.05.1983; опубл. 15.05.1984 — 7 с.
- 61. *Vogt G.* Inline-process and quality control of spotweds of car bodies Ultrasonic sensors integrated in resistance welding

electrodes // 17th World conf. on nondestructive testing: conf. proc., 25–28 Oct. 2008. — Shanghai, China, 2008. — P. 1–6.

- Пат. 3824377 США: МПК7 Н 03k 21/34. Acoustic emission spot welding controller / Kenneth R. Notvest. — Заявл. 10.05.72; опубл. 16.07.74 — 9 с.
- 63. ASTM E751-07. Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring During Resistance Spot—Welding [Электрон. pecypc] // Annual Book of ASTM Standards. http://www.astm.org/Standards/E751.htm.
- Kek T., Polajnar I., Grum J. Analysis of AE during resistance spot welding // The 10th Intern. conf. of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing «Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering», Sept. 1–3, 2009. Ljubljana, Slovenia, 2009. P. 243–250.
- 65. Chaos analysis of acoustic emission signals in spot welding process / Luo Zhen, Wang Rui, Shan Ping, Dong An // China Welding. — 2009. — 18, № 1. — P. 73–78.
- Adaptive health monitoring concepts for spot—welded and weld—bonded structural joints / V. Giurgiutiu, Craig A. Rogers, Yuh Jin Chao et al. // ASME Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition, Nov. 16–21, 1997. — Dallas, TX, 1997. — P. 1–6.
- Алешин Н. П., Щербинский В. Г. Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий: Учеб. для ПТУ. — М.: Высш. шк., 1991. — 271 с.
   Каневский И. Н., Сальникова Е. Н. Неразрушающие ме-
- Каневский И. Н., Сальникова Е. Н. Неразрушающие методы контроля: Уч. пос. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. — 243 с.
- Шахматов М. В., Ерофеев В. В., Коваленко В. В. Работоспособность и неразрушающий контроль сварных соединений с дефектами. — Челябинск: ЦНТИ, 2000. — 227 с.
- Сварка и резка в промышленном строительстве. В 2 т. Т. 2 / Б. Д. Малышев, Е. К. Алексеев, А. Н. Блинов и др. / Под ред. Б. Д. Малышева. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1989. — 400 с.

This paper presents an overview of modern methods and tools for non-destructive testing of resistance spot welding: liquid-penetrant, optical, eddy current, magnetic, electrical, thermal, radiation and acoustic. We briefly discuss the advantages and disadvantages of the each method and ways of their development. Special attention is paid to analysis capabilities of ultrasonic method with different control techniques, sounding schemes and types of converters. It is shown that still an important issue is to increase the reliability of control of the unsafe defect of resistance spot welding — lack of fusion. Although these goals may use the majority of methods described in the article, but the existing limitations in each method does not allow us to guarantee reliable detection of this defect. So perspective is the use of multiple simultaneous non-contact methods for control of lack of fusion and development of the best ways to analyze the data for each method. Possible disadvantage of this approach is to increase the control time, but it can be minimized by developing the right strategy of the entire complex of measurement. Accordingly, recommendations for choice of methods for control of resistance spot welding and proposed an approach to creation of the automated control system using several methods simultaneously.

Keywords: nondestructive testing, resistance spot welding, ultrasound, reliability

Поступила в редакцию 20.09.2012



#### 33-я Международная ежегодная конференция и блиц-выставка «КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ» (СЛАВПОЛИКОМ)

27 - 31 мая 2013 г., санаторный комплекс «Ай-Даниль»,

Крым, Гурзуф, Даниловка

Приглашаются специалисты авиационной, ракетно-космической, металлургической, горнодобывающей, химической, газовой, нефте- и горноперерабатывающей промышленности, строительного, транспортного, инструментального и другого машиностроения, строительных, научно-исследовательских, проектных, конструкторских организаций.

УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ»

Тел./ факс: (+38 044) 573 - 30 - 40 моб. тел.: (+38 067) 708 - 93 - 95 E-mail: office@conference.kiev.ua, www.conference.kiev.ua

## ФАЗОВИЙ СПОСІБ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ

#### Ю. В. КУЦ, Ю. А. ОЛІЙНИК, О. Д. БЛИЗНЮК, О. В. МОНЧЕНКО

Національний авіаційний університет. 03680, Киев-58, просп. Космонавта Комарова, 1. Е-mail: ins@nau.edu.ua

Розглянуто використання в ультразвуковій товщинометрії фазоманіпульованих сигналів для прецизійного визначення часу затримки сигналів за їх фазовими характеристиками. Проведені модельні та експериментальні дослідження запропонованого способу товщинометрії довели можливість неспотвореної передачі стрибків фазової характеристики зондуючого фазоманіпульованого сигналу після його поширення в електроакустичному тракті ультразвукових товщиномірів та дозволили розробити методику обробки вимірюваних сигналів, за якою можна проводити прецизійне вимірювання часу затримки ультразвукового сигналу. Фазова характеристика сигналу визначалась на основі дискретного перетворення Гільберта. Експериментальні дослідження проведені на стенді, в складі якого використано програмований генератор сигналів довільної форми АНР-3122 та одноканальний одноплатний дефектоскоп Socomate USPC 3100 LA. Для тестуваня як об'єкт контролю використовувався стандартний зразок CO-2A (виготовлений згідно ГОСТ 17482–86). Затримка поширення ультразвукового сигналу в CO-2A становить т<sub>ОК</sub> = 18,9 мкс. В стенді використовувався суміщений п'єзоелектричний перетворювач типу Parametrics C-309 на базі композитної п'єзокераміки (частота 5 МГц, діаметр п'єзопластини 12,5 мм). Проведена оцінка точності вимірювання довела, що запропонований спосіб дає можливість прецизійного вимірювання товщини виробів з різних металевих і неметалевих матеріалів, з абсолютною похибкою вимірювання затримки, що не перевищує тривалості 1-2 періодів дискретизації аналого-цифрового перетворювача дефектоскопа. Запропонований спосіб визначення затримки поширення ультразвукових сигналів може бути використаний для високоточного вимірювання швидкості ультразвукових коливань у матеріалах під час дослідження їх фізико-механічних властивостей. Бібліогр. 4 назв, рис. 3.

Ключові слова: ультразвукова товщинометрія, фазоманіпульовані сигнали, фазові характеристики.

Однією з традиційних задач ультразвукового (УЗ) неруйнівного контролю є задача визначення товщини об'єктів та виробів, стінок балонів, які працюють під високим тиском, ємностей для зберігання агресивних рідин тощо [1].

Луна-імпульсний метод УЗ товщинометрії передбачає визначення затримки  $\tau$ , необхідної на поширення УЗ зондуючого радіоімпульсного сигналу через досліджуваний об'єкт контролю (ОК). За умови відомої швидкості *с* поширення УЗ хвилі в двох напрямках між поверхнею та дном ОК затримка  $\tau$  однозначно пов'язана з товщиною *h* OK:

$$h = \frac{c\tau}{2}.$$
 (1)

Як правило, значення т оцінюють за часовим положенням обвідних зондуючого і донного або двох донних УЗ сигналів, які визначаються за допомогою амплітудних детекторів [2].

Недоліком даного способу вимірювання часу затримки є наявність похибки, яка пов'язана з кінцевими тривалістю радіоімпульсного сигналу та швидкістю наростання/спаду його обвідної. В результаті дії випадкових чинників виміряне значення часу затримки може мати похибку, що сягає величини одного періоду коливань.

Для зменшення похибки вимірювання за цим способом скорочують тривалість та підвищують крутість фронту зондуючих радіоімпульсів, що потребує розширення смуги частот, що, як

© Ю. В. Куц, Ю. А. Олійник, О. Д. Близнюк, О. В. Монченко, 2013

наслідок, і, призводить до зниження чутливості товщиномірів.

Інший підхід до вимірювання полягає у використанні зондуючих сигналів з модифікованими характеристиками (фазовими чи амплітудними), які можуть стрибкоподібно змінювати свої значення внаслідок маніпуляції. Але реалізація такого підходу в УЗ товщинометрії (УЗТ) авторам невідома.

Метою статті є дослідження можливості використання в УЗТ фазоманіпульованих сигналів для прецизійного визначення часу затримки сигналів за іх фазовими характеристиками [3].

Постановка задачі. Проводиться вимірювання часу затримки фазоманіпульованого сигналу в електроакустичному тракті (ЕАТ) УЗТ лунаімпульсним методом за умови одностороннього доступу до ОК та застосування суміщеного п'єзоелектричного перетворювача.

Для вимірювання затримки використовується фазоманіпульований радіоімпульсний сигнал:

$$u_{3}(t) = \begin{cases} U \sin 2 \pi ft, & t \in [0, \tau_{1}], \\ -U \sin 2 \pi ft, & t \in [\tau_{1}, \tau_{i}], \\ 0, & t \notin [\tau_{i}, T_{n}], \end{cases}$$
(2)

де U — амплітуда сигналу; f — частота заповнення радіоімпульсу;  $\tau_1$  — момент маніпуляції фази;  $\tau_i$  — тривалість імпульсу;  $T_n$  — час спостереження сигналу.

Необхідно провести модельні та експериментальні дослідження поширення фазоманіпульованого сигналу в електроакустичному тракт УЗТ та НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

процесу визначення часу затримки сигналу за його фазовою характеристикою і оцінити точність запропонованого способу.

Розв'язок поставленої задачі виконаємо поетапно.

Моделювання процесу обробки сигналів УЗТ та визначення т. Моделювання проводилось у системі Matlab за наступною методикою.

- 1. Формування зондуючого сигналу виду (2).
- 2. Формування відбитого сигналу виду:

$$u_{\rm B}(t) = \begin{cases} KU\sin 2\pi f(t-\tau_3), & t \in [\tau_3, \tau_3 + \tau_1], \\ -K_{\rm T}U\sin 2\pi f(t-\tau_3), & t \in [\tau_3 + \tau_1, \tau_3 + \tau_i], \\ 0, & t \notin [\tau_3 + \tau_i, T_{\rm H}], \end{cases}$$

де  $K_{\rm T}$  — коефіцієнт ЕАТ;  $t_3$  — час затримки сигналу.

3. Визначення фазової характеристики вимірюваного сигналу  $u(t) = u_3(t) + u_B(t) (u_3(t) - 3атримка вимірюваного сигналу)$ 

$$\widetilde{\Phi}(t) = \operatorname{arctg} \frac{\widehat{u}(t)}{u(t)} + \mathbf{K} [u(t), \widehat{u}(t)],$$
(3)

де  $\hat{u}(t)$  — гільберт-образ сигналу u(t); **К** — оператор розгортання фазової характеристики сигна-

лу (ФХС) за межі інтервалу  $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$  [3, 4].

Визначення моментів стрибкопо́дібної зміни
 ФХС шляхом її диференціювання.

за 5. Селекція інформативних стрибків ФХС за обвідною сигналу u(t).

5.1. Визначення обвідної u(t):

$$A(t) = \sqrt{u^2(t) + u^2(t)}.$$
 (4)

5.2. Формування стробів з використанням медіанної фільтрації функції A(t).

5.3. Виділення інформативних стрибків ФХС.

6. Оцінка часу затримки сигналу за інформативними стрибками ФХС.

В проведеному модельному експерименті формувався радіоімпульсний фазоманіпульований сигнал тривалістю чотири періоди сигналу заповнення з наступними параметрами: U = 5 В; f = 5 МГц;  $\tau_1 = 2T$ ;  $\tau_i = 4T$ ;  $K_T = \frac{1}{7}$ ;  $\tau_3 = 12$  *T*, де  $T = \frac{1}{f}$  — період заповнення сигналу.

Змодельований сигнал u(t) зображено на рис. 1, *a*, результати розрахунків ФХС показані на рис. 1,  $\delta$ .

Визначимо моменти часу, які відповідають виконанню фазової маніпуляції за положенням у часі максимумів похідної  $\frac{\partial \tilde{\Phi}(t)}{\partial t}$  (рис. 1, *в*). Видно, що отримана функція має інформативні та неінформативні стрибки ФХС.

Додатково проведемо стробування за обвідною аналізованого сигналу A(t) (4) (рис. 1, *г*).



Рис. 1. Графіки модельного сигналу та його характеристики

Графік функції  $\frac{\partial \Phi(t)}{\partial t}$  з інформативними стриб-

ками наведено на рис. 1, д.

З графіків видно, що на інтервалах t∈(0,4; 0,405) мкс та t∈(2,805; 2,81) мкс фаза сигналу стрибкоподібно змінюється. Часове положення стрибків фази з високою точністю відповідає моментам приходу донного та відбитого імпульсів.

Таким чином, визначаючи часове положення стрибка фази відбитого сигналу відносно стрибка фази зондуючого сигналу можна оцінити час затримки УЗ сигналу в ОК.

Точність вимірювання визначається лише частотою дискретизації вимірюваного сигналу.

Граничні значення похибки визначення т<sub>2</sub> дорівнюють:

$$\Delta t_{\rm M} = \pm \frac{1}{f_{\rm A}},\tag{5}$$

де  $f_{\rm d}$  — частота дискретизації. Експериментальні дослідження процесу поширення фазоманіпульованого сигналу в ЕАТ УЗ товшиноміра. Експериментальні дослідження виконувались з метою підтвердження неспотвореної передачі стрибка фазової характеристики зондуючого сигналу в електроакустичному тракті УЗТ.

Визначимо умови проведення експериментальних досліджень:

для вимірювання товщини використовуються поздовжні хвилі;

частота заповнення зондуючого радіоімпульсу 5,0 МГц. Тривалість — чотири періоди;

товщина ОК набагато більша тривалості зондуючого імпульсу для унеможливлення накладань зондуючого та донного сигналів;

матеріал ОК не має дисперсії швидкості УЗ.

Структура експериментальної установки наведена на рис. 2.

Зондуючий сигнал формувався генератором 1 як фазоманіпульований радіоімпульсний сигнал виду (2) з наступними характеристиками: амплітуда сигналу U = 5 B; частота заповнення радіоімпульсу f = 5,0 МГц; момент маніпуляції фази  $\tau_1 = 0,4$  мкс; тривалість радіоімпульсу  $\tau_1 =$ = 0,8 мкс, період повторення радіоімпульсів  $T_{\rm n}$  =



Рис. 2. Структура експериментальної установки (позначення 1-5 див. у тексті)

= 1000 Гц. Використовувався програмований генератор сигналів довільної форми АНР-3122 (максимальна тактова частота до 80 МГц, максимальна кількість точок на канал — 131 000, максимальний розмах вихідної напруги ±10В при навантаженні 50 Ом).

Сигнал u(t) подавався на суміщений п'єзоелектричний перетворювач 2 (типу Parametrics C-309 на базі композитної п'єзокераміки; частота 5,0 МГц, діаметр п'єзопластини 12,5 мм) та вводився в ОК. Прийнятий після поширення в ОК УЗ сигнал перетворювався тим же перетворювачем в електричний і подавався на дефектоскоп 3 - одноканальний одноплатний дефектоскоп Socomate USPC 3100 LA (смуга пропускання приймача 0,35...30 МГц; динамічний діапазон: 105 дБ; АЦП з частотою дискретизації 100 МГц, 10 біт).

Останній формував вибірки зондуючого і відбитого сигналів з частотою дискретизації  $f_{\pi} = 100 \text{ M}$ Гц, передавав їх для аналізу та подальшої обробки в ПК (блок 4).

Обробку отриманих сигналів виконували за допомогою програмного забезпечення 5, розробленого в середовищі Matlab.

Для тестуваня ОК використовувався стандарзразок СО-2А (виготовлений тний ЗГІДНО ГОСТ 17482-86). Затримка поширення УЗ сигналу в CO-2A становить  $\tau_{ok} = 18,9$  мкс.

Результати обробки експериментальних даних зображені на рис. 3.

Обробка вимірюваного сигналу u(t) проводилась в інтервалі тривалістю 60 мкс між першим та четвертим відбитими (донними) сигналами включно (див. рис. 3, а) за визначеною на етапі моделювання методикою (див. методику моделювання п.п. 3-6).

Графік розрахованої фазової характеристики сигналу показано на рис. 3, б.

Значення похідної 
$$\frac{\partial \Phi(t)}{\partial t}$$
 показані на рис. 3, *в*.

Результати селекції інформативних стрибків  $\Phi XC$  за обвідною A(t) (рис. 3, г) аналізованого сигналу показані на рис. 3, д.

З отриманих графіків видно, що:

 стрибки ФХС фазоманіпульованого зондуючого радіосигналу без спотворення поширюються в ЕАТ УЗТ;

 положення стрибків ФХС аналізованого сигналу відповідають моментам приходу донних радіоімпульсів, що дозволяє оцінити час затримки τ<sub>3</sub> з високою точністю.

Для перевірки точності вимірювання та було проведене визначення часу затримки поширення вимірюваного сигналу в ОК між першим і другим, другим і третім та третім і четвертим донними сигналами т<sub>1-2</sub>, т<sub>2-3</sub>, т<sub>3-4</sub> відповідно:



Рис. 3. Графіки експериментального сигналу та його характеристики

 $\tau_{1-2} = 18,91$  мкс,  $\tau_{2-3} = 18,9$  мкс,  $\tau_{3-4} = 18,92$  мкс.

Для кожного отриманого результату була розрахована абсолютна похибка вимірювання:

$$\Delta \tau_{1-2} = \tau_{1-2} - \tau_{0K} = 0,01 \text{ MKC}; \ \Delta \tau_{2-3} = \tau_{2-3} - \tau_{0K} = 0; \\ \Delta \tau_{3-4} = \tau_{3-4} - \tau_{0K} = 0,02 \text{ MKC},$$

що не перевищує тривалості 1-2 періодів дискретизації АЦП дефектоскопа.

#### Висновки

Розглянуто фазовий спосіб УЗТ, який грунтується на використанні модифікованого за допомогою фазової маніпуляції зондуючого сигналу та подальшому аналізі фазових характеристик зондуючого та відбитого сигналів.

Проведені модельні та експериментальні дослідження запропонованого способу товщинометрії довели можливість неспотвореної передачі стрибків фазової характеристики зондуючого сигналу після його поширення в ЕАТ УЗТ та дозволили розробити методику обробки вимірюваних сигналів, за якою можна проводити прецизійне вимірювання часу затримки УЗ сигналу.

Проведена оцінка точності вимірювання довела, що запропонований спосіб дає можливість прецизійного вимірювання товщини виробів з різних металевих і неметалевих матеріалів.

Запропонований спосіб визначення затримки поширення УЗ сигналів може бути використаний для високоточного вимірювання швидкості УЗ коливань у досліджуваних матеріалах під час дослідження їх фізико-механічних властивостей.

- Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 240с.
- Неразрушающий контроль: В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практ. пособие / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; Под ред. В. В. Сухорукова. — М.: Высш. шк., 1991. — 283 с.
- Куц Ю. В., Л. М. Щербак. Статистична фазометрія. Тернопіль: Вид-во Терноп. технологіч. ун-ту, 2009. — 383 с.
- 4. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 540 с.

Application of phase-shift signals in ultrasonic thickness measurement for precise determination of signal delay time by their phase characteristics is considered. Conducted model and experimental studies of the proposed method of thickness measurement proved the possibility of undistorted transmission of phase characteristic jumps of a probing phase-shifted pulse after its propagation in the electroacoustic circuit of ultrasonic thickness measurement devices and permitted development of the procedure of measured signal processing that enable precise measurement of ultrasonic signal time delay. Phase characteristics of the signal were determined on the basis of discrete Hilbert transformation. Experimental investigations were conducted in a facility, which consisted of programmed generator ANR-3122 of signals of an arbitrary shape and single-channel single-board flaw detector Socomate USPC 3100 LA. A standard SO-2A sample (prepared in keeping with



GOST 1748286 standard) for used as an object of control in testing. Delay of ultrasonic signal propagation in SO-2A is equal to 18.9 s. A combined piezoelectric transducer of Parametrics C-309 type based on composite piezoeramics (5.0 Hz frequency, 12.5 mm diameter of piezoelectric crystal plates) was used in the facility. Conducted assessment of measurement accuracy proved that the proposed method enables precise measurement of thickness of products from various metallic and non-metallic materials with an absolute error of delay measurement not exceeding the duration of 1-2 periods of discretization of analog-digital converter of the flaw detector. Proposed method of determination of ultrasonic signal propagation delay can be applied for high-precision measurement of the velocity of ultrasonic oscillations in materials during investigation of their physico-mechanical properties.

Keywords: ultrasonic thickness measurement, phase-shift signals, phase characteristics

Надійшла до редакції 10.11.2012

## УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

НТК «Институт электросварки им. Е.О. Патона» НАН Украины приглашает Вас принять активное участие в выставке «Сварка. Родственные технологии - 2013», которая пройдет совместно с выставками «Неразрушающий контроль» и «Трубопроводный транспорт» 15 – 17 октября 2013 г. в выставочном центре «Киев ЭкспоПлаза» (г. Киев, ул. Салютная, 26).

В рамках мероприятий будут проведены научные семинары, представляющие большой интерес для специалистов различных отраслей.

Выставка «Сварка. Родственные технологии» проводится с 2003 года. За это время ее посетило более 45 000 представителей промышленных предприятий Украины, России, Беларуси, Казахстана, Узбекистана, Польши, Литвы, Латвии — руководители, главные инженеры, главные сварщики, снабженцы. Украинские и зарубежные предприятия предлагают на выставке все лучшее в области сварки, термической резки, нанесения покрытий, строительства трубопроводов различного назначения, промышленных защитных покрытий, приборов неразрушающего контроля, средств индивидуальной защиты, переработки индустриальных отходов.

Сегодня, как никогда, для выхода из создавшейся кризисной ситуации и возрождения экономики страны нужны новые прогрессивные технологии, современное оборудование, необходимое для создания товаров высокой конкурентоспособности уровня мировых стандартов.

Одним из основных путей достижения этой цели — участие в специализированных выставках, где можно увидеть и познать новое, продемонстрировать и в дальнейшем внедрить достижения, обменяться опытом, наладить новые деловые контакты, скооперироваться с партнерами для решения технических задач при производстве современной продукции. Перечисленные факторы не оставляют сомнения в необходимости участия в таких мероприятиях.

www.paton-expo.kiev.ua

УДК 620.19.21

## СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ART-2 И FUZZY-ART

#### В. С. ЕРЕМЕНКО, А. В. ПЕРЕЕДЕНКО

Национальный авиационный университет. 03680, Киев-58, просп. Космонавта Комарова, 1. E-mail: nau\_307@ukr.net

Решение задач безэталонной диагностики требует использования методов обработки данных, которые ориентированы на широкий набор объектов контроля, позволяют быстро и эффективно проводить диагностику, допускают адаптацию к изменениям условий проведения контроля и позволяют вносить изменения в программные модули без значительных изменений в основной структуре программного обеспечения. Статья посвящена исследованию и программной реализации модифицированных нейронных сетей ART-2 и Fuzzy-ART для решения задач классификации дефектов сотовых панелей. Разработанные нейронные сети используются в составе системы безэталонной диагностики изделий из композиционных материалов. Описано структуру и алгоритм работы разработанных нейронных сетей. Также представлены структура и основные модули разработанного программного обеспечения для работы с представленными нейронными сетями. Преимуществом описанной нейронной сети и системы в целом является гибкость ее архитектуры, высокое быстродействие и высокая достоверность обработки информации. Приведены результаты использования разработанной системы на основе сетей ART-2 и Fuzzy-ART для диагностики технического состояния сотовых панелей. Классификатор на основе описанных нейронных сетей во время обучения может автоматически изменять свои параметры, достигая наилучшей достоверности контроля при обнаружении и классификации подповерхностных дефектов в сотовых панелях, а также дефектов, которые расположены с обратной стороны панели, площадью от 2 см<sup>2</sup> при толщине композитной панели 12,8 мм. Надежность неразрушающего контроля с помощью указанного классификатора составляет 90...95 %. Применение нейронной сети Fuzzy-ART обеспечивает лучшие показатели достоверности контроля, чем применение сети ART-2. Библиогр. 9 назв., табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, нейронные сети, композиционные материалы, нейронные сети адаптивной резонансной теории

При многопараметровом контроле для обработки данных и построения решающих правил часто используются методы спектрального анализа и методы распознавания образов, в частности, разделяющие гиперплоскости. Однако применение данных методов характеризуется рядом недостатков. При спектральном анализе сложной задачей является выбор базиса для спектрального преобразования [1]. Для анализа сигнала необходимо учитывать большое количество спектральных составляющих, которые не всегда чувствительны к появлению дефектов материала, необходимо также учитывать составляющие высших частот, которые имеют малую энергию и сильно искажаются шумами. Дополнительные трудности возникают при разработке и реализации соответствующего математического обеспечения систем НК: необходимо использовать сложные методы обработки информационных сигналов (на основе критерия  $w^2$  или других статистических критериев), которые приводят к формированию избыточных и сложных решающих правил. Построение разделяющих гиперплоскостей в случае многомерных линейно-неразделимых пространств распределения диагностических признаков приводит к решению системы сложных нелинейных уравнений с большим количеством составляющих (количество уравнений системы определяется количеством информационных параметров, которые используются для анализа), что является достаточно сложным с вычислительной точки зрения и снижает эффективность работы информационно-измерительной системы или в некоторых случаях вообще является невозможным. Существующие системы НК не позволяют решать задачу кластерного анализа в автоматическом режиме, отсутствует возможность быстро вносить в память системы информацию о новом классе (объекта или дефекта), а также расширять собственную базу знаний без пересчета всех параметров системы.

Альтернативным методом обработки экспериментальных данных и построения правил принятия решений и классификации при многопараметровом контроле изделий из композиционных материалов является применение искусственных нейронных сетей. В задачах НК обученная нейронная сеть не только умеет распознавать (классифицировать) полученные во время контроля сигналы с датчиков, но и хранит важную информацию о закономерностях и взаимосвязях формы информационного сигнала и состояния объекта контроля, а также правильно классифицировать новые сигналы и возможные дефекты, которые не встречались во время обучения.

© В. С. Еременко, А. В. Перееденко, 2013

Проведенные исследования [2–5] основных архитектур нейронных сетей показали, что для решения задачи диагностики изделий лучшие показатели достоверности контроля можно получить при использовании нейронных сетей адаптивной резонансной теории (ART). Сети и алгоритмы ART [6–8] сохраняют пластичность, необходимую для изучения новых классов объектов и в то же время предотвращают изменение ранее сформированных в памяти сети классов. Также нейронные сети ART позволяют выполнять анализ формы полученных информационных сигналов без предварительной обработки входных данных и формирования набора диагностических признаков, что значительно расширяет область их применения. ART-сети могут использоваться для решения таких задач НК, как кластерный анализ, классификация дефектов объекта контроля, распознавания образов и т. п.

Сети ART представляют собой векторный классификатор. Входной вектор классифицируется в зависимости от того, на какой из ранее запомненных сетью эталонных образов он похож. Решение относительно классификации входного вектора сеть ART выражает в виде возбуждения одного из нейронов слоя распознавания. Если входной вектор не соответствует ни одному из запомненных образов, создается новая категория (выделяется новый нейрон и запоминается новый вектор), которая соответствует входному вектору. Если входной вектор похож на один из ранее запомненных векторов по определенному критерию подобия, эталонный вектор в памяти нейронной сети будет изменяться (учиться) под воздействием нового входного вектора таким образом, чтобы стать более похожим на данный входной вектор.

Сохраненный эталонный образ не будет изменяться, если текущий входной вектор не окажется похожим на него. Таким способом решается дилемма стабильности–пластичности. Новый образ может создавать дополнительные классификационные категории, однако новый входной образ не может заставить измениться или затереть существующую память. Алгоритм, по которому работают разработанные ART-сети, был описан в работах [3–5].

Диагностика дефектов в образцах сотовых панелей с искусственными дефектами при обработке сигналов нейронными сетями ART-2 и Fuzzy-ART происходит путем анализа изменения формы регистрируемых сигналов, формируя в памяти нейронной сети образ или образы информационных сигналов, которые характеризуют бездефектные участки и участки с различной степенью поврежденности объекта контроля, и сопоставляя регистрируемые сигналы со сформированными в памяти образами (эталонами).

Нейронная сеть ART-2 разработана для анализа непрерывных входных сигналов. В нейронной сети ART-2 присутствуют два слоя нейронов: слой сравнения  $F_1$ , который выполнен из трех подслоев с обратными связями, а также слой распознавания F<sub>2</sub>. С.Гроссберг и Г.Карпентер в работах [6,7] описали несколько возможных архитектур сети ART-2. Для исследований была использована архитектура сети, которая изображена на рис. 1, где белые стрелки отражают специфические операции в слоях  $F_1$  и  $F_2$  нейронной сети (основные уравнения преобразования описаны далее), черные стрелки отражают операции элементов управления сети (определение уровня расхождения между входным сигналом и найденным эталоном, конкурирующий поиск нейрона-победителя и подавление активных нейронов в слое распознавания), заштрихованные круги на рисунке отображают операцию поиска нормы вектора, направление стрелок указывает направление распространения сигнала между нейронами в сети ART-2.

Для исследований была разработана новая архитектура сети ART-2 [4]. Основные уравнения, которые описывают работу слоя сравнения  $F_1$  сети ART-2, приведены ниже:

$$p_{i} = u_{i} + \sum_{j} g(y_{j})v_{j,i}, \ q_{i} = \frac{p_{i}}{e + |p|}, \ u_{i} = \frac{z_{i}}{e + |z|},$$
$$z_{i} = f(t_{i}) + bf(q_{i}), \ s_{i} = x_{i} + au_{i}, \ t_{i} = \frac{s_{i}}{e + |s|},$$

где  $p_i$ ,  $q_i$ ,  $u_i$ ,  $z_i$ ,  $s_i$ ,  $t_i$  — выходы соответствующих групп нейронов, которые составляют слой сравнения  $F_1$  сети ART-2;  $|\bullet| - L_2$ -норма вектора в евклидовом пространстве;  $y_j$  — выход *j*-го нейрона слоя распознавания  $F_2$ ;  $v_{j,i}$  — элементы матрицы весовых коэффициентов V; a, b — коэффициенты, которые находятся экспериментальным путем; e— параметр, который характеризует отношение между временем работы нейронов слоев  $F_1$  и  $F_2$ , 0 < e <<1; f(x) — нелинейная сигнальная функция



Рис. 1. Использованная архитектура нейронной сети ART-2

активации нейронов, может быть непрерывно дифференцированной или кусочно-линейной:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2 \theta x^2}{x^2 + \theta^2} \operatorname{прu} 0 \le x < \theta, \\ x \operatorname{пpu} x \ge \theta, \end{cases} \quad f(x) = \begin{cases} 0 \operatorname{пpu} 0 \le x < \theta, \\ x \operatorname{пpu} x \ge \theta. \end{cases}$$

Основные уравнения, которые описывают работу слоя распознавания  $F_2$  сети ART-2, приведены ниже:

$$T_{j} = \sum_{i} p_{i} w_{i,j}, \ T_{k} = \max\{T_{j} : j = \overline{1,m}\},\$$
$$g(v_{k}) = \begin{cases} d \text{ при } T_{k} = \max(T_{j}), \\ j \\ 0 \text{ в другом случае}, \end{cases}$$

где  $w_{i,j}$  — элементы матрицы весовых коэффициентов W; d — коэффициент, который находится экспериментальным путем.

Таким образом, на устройство сравнения будет поступать вектор  $p_i$ :

$$p_i = \begin{cases} u_i \text{ при неактивнихнейронах слоя } F_2, \\ u_i + dv_{k,i} \text{ при активном нейроне – победителе } k \end{cases}$$

Устройство сравнения активирует сигнал сброса, если не будет выполнено условие:

$$\frac{\rho}{e+|r|} \ge 1$$

где  $\rho$  — коэффициент чувствительности классификатора, выбирается в интервале [0,1]; r — вектор, который характеризует степень отличия входного вектору X и эталонного образа  $W_k$  в памяти сети:

$$r_i = \frac{u_i + cp_i}{e + |u| + |cp|}$$

где *с* — взвешивающий коэффициент, который выбирается из неравенства:

$$\frac{cd}{1-d} \le 1.$$

В случае правильной классификации входного вектора сигнал сброса не активируется, а весовые коэффициенты матриц *W* и *V* модифицируются следующим образом:

$$\begin{aligned} v_{j,i}^{new} &= v_{j,i}^{old} + \Delta v_{j,i}, \, \Delta v_{j,i} = g(y_j)[p_i - v_{j,i}] = d(p_i - v_{k,i}), \\ w_{i,j}^{new} &= w_{i,j}^{old} + \Delta w_{i,j}, \, \Delta w_{j,i} = g(y_j)[p_i - w_{i,j}] = d(p_i - w_{i,k}). \end{aligned}$$

где  $v_{j,i}^{old}$  и  $v_{j,i}^{new}$  — весовые коэффициенты матрицы *V* соответственно до и после модификации;  $w_{i,j}^{old}$  и  $w_{i,j}^{new}$  — весовые коэффициенты матрицы *W* соответственно до и после модификации.

В начале работы нейронной сети ART-2 и при формировании нового нейрона (в случае формирования нового класса) значения соответствующих весовых коэффициентов будут инициализироваться начальными значениями:

$$v_{j,i} = 0, w_{i,j} \le \frac{1}{(1-d)\sqrt{N}}, i = \overline{1,N}, j = \overline{1,m},$$

где N — размерность входного вектора X; m — количество нейронов в слое распознавания  $F_2$  (количество запомненных классов).

Нейронная сеть ART-2 нечувствительна к порядку предъявления входных векторов, имеет высокое быстродействие работы и высокую достоверность классификации образов. К тому же, ART-2 имеет свойство к самостоятельному исправлению ошибок классификации после определенного количества циклов повторного предъявления обучающей выборки [6].

С целью повышения эффективности работы сети ART-2 и достоверности классификации дефектов изделий из композиционных материалов было разработано и использовано новую архитектуру нейронной сети ART-2 [4], алгоритм ее работы и обучения. На рис. 2 изображена структурная схема разработанной сети ART-2, где выделены блоки, которые были изменены и дополнены по отношению к архитектуре классической сети.

Во-первых, в классической реализации сети ART-2 весовые коэффициенты матриц *W* и *V* имеют почти одинаковые по значению элементы, т. е. имеет место дублирование значений весовых коэффициентов. В разработанной сети ART-2 вместе с двумя матрицами весовых коэффициентов реализован алгоритм работы, когда используется одна матрица весовых коэффициентов, что, тем самым, уменьшает расходы памяти информационно-диагностической системы и снижает количество вычислительных операций (при выполнении модификации весовых коэффициентов во время обучения и адресации к элементам соответствующих матриц при расчетах). В разработанной сети будет иметь место следующее соотношение:

$$V = W^T$$
.

Для соответствующих расчетов в слое  $F_1$  примем:

$$v_{j,i} = w_{i,j}$$

Таким образом, уменьшаются вдвое расходы памяти и количество операций при модификации весовых коэффициентов во время обучения.

Во-вторых, в классической реализации сети ART-2 фактически определяется один критерий оценки принадлежности входного вектора к определенному классу. В разработанной новой архитектуре нейронной сети для вычисления двух критериев оценки принадлежности входного вектора к определенному классу были использованы две матрицы весовых коэффициентов, но значения их элементов модифицируются при обучении отличающимся от классической теории способом. В таком случае также был разработан новый ал-



Рис. 2. Структурная схема разработанной нейронной сети ART-2

горитм работы слоя распознавания  $F_2$ . В предложенной сети работа слоя распознавания описывается выражениями:

$$T_j = \sum_i x_i w_{i,j}, \ T_k = \max\{T_j : j = \overline{1,m}\},\$$
$$g(y_k) = \begin{cases} d \text{ при } T_k = \max_j (T_j) \\ 0 \text{ в другом случае} \end{cases}.$$

где  $w_{i,j}$  — элементы матрицы весовых коэффициентов W; x — элементы входного вектора X.

Функционирование слоя сравнения  $F_1$  остается без изменений по отношению к классической архитектуре сети ART-2. Модификация весовых коэффициентов во время обучения происходит следующим образом:

$$v_{j,i}^{new} = v_{j,i}^{old} + \Delta v_{j,i}, \Delta v_{j,i} = g(y_j)[u_i - v_{j,i}] = d(u_i - v_{k,i}),$$
  
 $w_{i,j}^{new} = w_{i,j}^{old} + \Delta w_{i,j}, \Delta w_{j,i} = g(y_j)[x_i - w_{i,j}] = d(x_i - w_{i,k}).$   
где  $v_{j,i}^{old}$  и  $v_{j,i}^{new}$  — весовые коэффициенты матрицы

V соответственно до и после модификации; w<sup>old</sup>

и  $w_{i,j}^{new}$  — весовые коэффициенты матрицы W соответственно до и после модификации.

Все другие вычисления выполняются согласно классическому алгоритму ART-2 [6, 7].

Нейронная сеть Fuzzy-ART [3,5,8] также способна решать задачи кластерного анализа и классификации образов. Данный тип нейронной сети позволяет ей динамически расширять собственную базу знаний о возможных типах дефектов контролируемых объектов в процессе работы. Структурная схема, алгоритм работы и особенности функционирования данной нейронной сети описаны в работах [3, 5]. Характерными отличиями нейронной сети Fuzzy-ART от ART-2 является использование нечетких логических операций и наличие в ней лишь одной матрицы весовых коэффициентов вместо двух.

Для экспериментальных исследований и выбора наиболее эффективных методов обработки данных и построения решающих правил при неразрушающем контроле композиционных материалов были использованы образцы сотовых панелей, которые были предоставлены ГП «АНТОНОВ» и

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, №1,2013

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

применяются при производстве самолетов моделей «АН», а именно:

– два образца (Об-1 и Об-2) сотовых композиционных панелей крыла самолетов типа Ан-70 (рис. 3, *a*, *б*) из материала ЭЛУР-П-0,1 на ВК 41 и сотовым заполнителем ПСП-1-2,5-45 толщиной 10 мм с искусственно заложенными дефектами типа отслоения обшивки от заполнителя с внутренней стороны обшивки (контроль данных дефектов проводили со стороны внешней бездефектной обшивки);

– один образец (Об-3) композиционной панели типа склейки листа алюминиевого сплава и герметика «виксинт», который используется на самолете АН-140 (рис. 3, в) с искусственно заложенными дефектами типа отслоения герметика.

Области контролируемых дефектов были разделены на точки с расстоянием между каждой точкой 2 мм. Сканирование проводилось с дискретным шагом по направлению, указанному на рис.3. Цифры на границах участков с дефектами означают номера точек сканирования, на которых начинается и заканчивается дефектный участок.

Авторами использовалась специальная система для выявления дефектов композиционных материалов методом низкоскоростного удара [9], а также соответствующее программное обеспечение, которое реализует различные методы обработки информационных сигналов (построение разделяющих гиперплоскостей, анализ спектральных плотностей информационных сигналов с помощью критерия Хи-квадрат, анализ формы сигналов с применением нейронных сетей и т. п.). Метод низкоскоростного удара основан на измерении параметров ударного воздействия на контролируемый объект. При воздействии на объект бойка с кинетической энергией А возникает импульс силы ударного взаимодействия, который характеризуется амплитудой, длительностью и формой. Система была испытана для выявления и диагностики дефектов в описанных образцах композиционных материалов.

Таким образом, диагностика дефектов в образцах сотовых панелей с искусственными дефектами при обработке сигналов, которые регистрируются разработанной системой, выполнялась тремя способами.

1. Анализируя изменения амплитуды и длительности регистрируемых сигналов по отдельности и в совокупности — группируя эти два параметра в общее пространство признаков и построив между различными состояниями (дефект– без дефекта) разделяющие гиперплоскости.

2. Путем статистической обработки регистрируемых сигналов, которая включает разложение информационных сигналов по ортогональным базисам Фурье и последующий анализ спектральных плотностей информационных сигналов с помощью распределения Хи-квадрат.

3. Анализируя изменение формы регистрируемых сигналов с применением нейронных сетей адаптивной резонансной теории (ART-2 и Fuzzy-ART) [3–5], так как изменение формы сигнала дает возможность с высокой достоверностью определять наличие дефекта сотовой панели и классифицировать его тип по степени поврежденности.

В процессе контроля сотовых панелей с применением нейронных сетей ART-2 и Fuzzy-ART на вход сети в случайном порядке подавался один из полученных сигналов. После этого он удалялся из выборки и на вход сети подавался новый сигнал из выборки. Данная процедура повторялась до тех пор, пока все сигналы в выборке не были предъявлены нейронной сети. Таким образом, сети ART-2 и Fuzzy-ART в процессе работы автоматически формировали собственную базу классов. Создав базу классов, для исследования достоверности формирования классов и результатов НК нейрон-



Рис. 3. Схема расположения дефектов на образцах Об-1 (*a*), Об-2 (*б*) и Об-3 (*в*). Цифры на границах участков с дефектами означают номера предельных точек сканирования. Сканирование проводилось с шагом 2 мм

— НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Достоверность контроля образцов сотовых панелей с применением разделяющих гиперплоскостей, критерия Хи-квадрат, а также нейронных сетей ART-2 и Fuzzy-ART

| Контролируемый | Тип участка, | Метод обработки входных данных |            |       |           |  |  |  |  |
|----------------|--------------|--------------------------------|------------|-------|-----------|--|--|--|--|
| образец        | дефект       | Гиперплоскость                 | Хи-квадрат | ART-2 | Fuzzy-ART |  |  |  |  |
|                | 1            | 93                             | 95         | 93    | 95        |  |  |  |  |
| Об-1           | 2            | 91                             | 95         | 95    | 95        |  |  |  |  |
|                | 3            | 50                             | 50         | 90    | 90        |  |  |  |  |
| 05.2           | 1            | 92                             | 94         | 93    | 95        |  |  |  |  |
| 00-2           | 2            | 50                             | 50         | 95    | 96        |  |  |  |  |
| _              | 1            | <50                            | <50        | 95    | 95        |  |  |  |  |
| Об-3           | 2            | <50                            | <50        | 80    | 95        |  |  |  |  |
|                | 3            | <50                            | <50        | 50    | 60        |  |  |  |  |

ной сети было предъявлено по 100 новых сигналов на каждый участок исследуемых образцов.

Достоверность контроля с применением указанных групп методов приведено в таблице. Исходя из полученных результатов было установлено, что решающее правило, построенное на основе разложения информационных сигналов по ортогональным базисам Фурье и анализа спектральных плотностей информационных сигналов с помощью распределения Хи-квадрат, а также на основе разделяющих гиперплоскостей, построенных в координатах амплитуда-длительность, не удалось обнаружить дефект 3 площадью 2 см<sup>2</sup> на образце Об-1 и дефект 2 площадью 2 см<sup>2</sup> на образце Об-2. При сканировании образца Об-3 наблюдаются всплески амплитуды на отсчетах, расположенных в районе наибольших дефектов (7-12) и (20-23) площадью 5 и 2 см<sup>2</sup> соответственно. Однако вследствие низкой информативности значений длительности информационных сигналов невозможно определить наличие дефектов 1-3 площадью 5, 2 и 1 см<sup>2</sup> в образце Об-3 путем применения для обработки сигналов групп методов 1 и 2. При этом при использовании амплитуды и длительности сигнала в качестве информативных признаков достоверность контроля образцов Об-1 и Об-2 при выявлении дефектов 1 и 2 площадью 5 см<sup>2</sup> в образце Об-1 и дефекта 1 площадью 5 см<sup>2</sup> в образце Об-2 составляет около 90 %, при использовании спектральных преобразований и последующей статистической обработки усредненных спектров достоверность контроля достигает 90...93 %.

Применение нейронных сетей ART-2 и Fuzzy-ART для обработки информационных сигналов, регистрируемых во время контроля образцов сотовых панелей позволило точно определить границы дефектных участков 1 и 2 площадью 5 и 2 см<sup>2</sup> соответственно на образце Об-1 и дефектного участка 1 площадью 5 см<sup>2</sup> на образце Об-2, а также, в отличие от групп методов 1 и 2, были определены границы дефектного участка 3 площадью 2 см<sup>2</sup> на образце Об-1 и дефектного участка 2 площадью 2 см<sup>2</sup> на образце Об-2. Нейронные сети ART-2 и Fuzzy-ART позволили определить границы дефектного участка 3 площадью 2 см<sup>2</sup> на образце Об-1 с погрешностью 6 мм (выявленные границы дефектного участка составили от 8-й до 11-й точки), а границы дефектного участка 2 площадью 2 см<sup>2</sup> на образце Об-2 были определены с погрешностью 4 мм (выявленные границы дефектного участка составили от 5-й до 10-й точки). Также с применением нейронных сетей ART-2 и Fuzzy-ART удалось определить границы дефектных участков 1 и 2 площадью 5 и 2 см<sup>2</sup> соответственно на образце Об-3. Границы дефектного участка 1 площадью 5 см<sup>2</sup> на образце Об-3 были определены с погрешностью в 2 мм (выявленные границы дефектного участка составили от 5-й до 13-й точки), а границы дефектного участка 2 площадью 2 см<sup>2</sup> на образце Об-3 были определены с погрешностью 6 мм сетью ART-2 (выявленные границы дефектного участка составили от 21-й до 23-й точки) и погрешностью 2 мм сетью Fuzzy-ART (выявленные границы дефектного участка составили от 19-й до 23-й точки). Следовательно, применение нейронных сетей ART-2 и Fuzzy-ART при контроле сотовых панелей с обратной стороны обшивки позволяет определять дефекты малых размеров (площадью 2 см<sup>2</sup>) и с высокой достоверностью (больше 95%) обнаруживать зависимость изменения параметров информационных сигналов от степени повреждения объекта контроля, который является сложным или невозможным с помощью большинства применяемых на сегодня методов диагностики.

#### Выводы

Применение нейронных сетей ART-2 и Fuzzy-ART обеспечивает высокую чувствительность к дефектам типа отслоения обшивки от заполнителя с внутренней стороны обшивки (образцы Об-1 и Об-2) и дефектов типа отслоения герметика (образец Об-3), хорошую помехоустойчивость, возможность работы с многомерными пространствами диагностических признаков, высокую достоверность контроля.

## К НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Установлено, что система НК композиционных материалов методом низкоскоростного удара с использованием нейронных сетей адаптивной резонансной теории (ART-2 и Fuzzy-ART) в качестве классификатора позволяет успешно обнаруживать подповерхностные дефекты сотовых композиционных панелей, а также дефекты, которые расположены с обратной стороны обшивки площадью больше 2 см<sup>2</sup> при толщине сотовой панели 8...12 мм. Достоверность контроля составляет около 95 %. Применение нейронной сети Fuzzy-ART для решения описанной задачи обеспечивает лучшие показатели достоверности контроля, чем применение сети ART-2.

- 1. *Єременко В. С., Переєденко А. В., Піколенко Є. О.* Ранжування інформативних ознак при неруйнівному контролі композиційних матеріалів // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ». — 2010. — № 57. — С. 159–164.
- 2. Переєденко А. В., Єременко В. С., Монченко О. В. Застосування нейромережевих технологій у системах неруйнівного контролю // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2012. — № 1. — С. 35–41.
- 3. Pereidenko A. V., Eremenko V. S., Rogankov V. O. System of standartless diagnostic of cell panels based on fuzzy-ART

neural network // «MRRS-2011»: Proc. of the Third Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium, 25–27 August 2011: proceedings. — Kyiv, 2011. — P. 181–183.

- Переєденко А. В., Єременко В. С., Монченко О. В. Застосування модифікованої архітектури нейронної мережі АRT-2 у складі системи неруйнівного контролю виробів із композиційних матеріалів // «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»: Матер. 19-ї Міжн. конф., 3–7 жовтня 2011р.: — Гурзуф, 2011. — С. 81–84.
- 5. Переєденко А. В., Єременко В. С., Шегедін П. А. Класифікатор стану виробів з композиційних матеріалів на основі нейронної мережі адаптивної резонансної теорії // Вісник Нац. авіац. ун-ту. — 2012. — № 1(50). — С. 92–100.
- Carpenter G. A., Grossberg S. ART 2: Stable self-organization of pattern recognition codes for analog input patterns // Applied Optics. — 1987. — № 26. — P. 4919–4930.
- 7. Carpenter G. A., Grossberg S., Rosen D. B. ART 2-A: An adaptive resonance algorithm for rapid category learning and recognition // Neural Networks. 1991. № 4. P. 493–504.
- 8. *Carpenter G. A., Grossberg S., Rosen D. B.* Fuzzy ART: Fast stable learning and categorization of analog patterns by an adaptive resonance system // Ibid. — 1991. — № 4. — P. 759–771.
- 9. Еременко В. С., Мокийчук В. М., Овсянкин А. М. Обнаружение ударных повреждений сотовых панелей методом низкоскоростного удара // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2007. — № 1. — С. 24–27.

Solution of the problems of standardless diagnostics of pipes requires application of data processing methods, which are oriented to a wide range of control objects, allows fast and effective diagnostics, are adapted to variation of testing conditions and permit modification of program modules without any significant changes in the main software structure. This paper is devoted to investigation and software realization of modified ART-2 and Fuzzy-ART neural networks to solve the problems of classification of defects in honeycomb panels. Developed neural networks are used in the system of standardless diagnostics of products from composite materials. Structure and operating algorithm of developed neural networks are also presented. The advantages of the developed neural network and system as a whole are its architecture flexibility, high performance and reliability of data processing. The paper gives the results of investigation of the developed system based on ART-2 and Fuzzy-ART networks for diagnostics of technical condition of honeycomb panels. The classifier based on the described neural networks can automatically change its settings during training, reaching the highest reliability of control at detection and classification of subsurface defects in honeycomb panels, as well as defects located on the back side of the panel of 2 cm<sup>2</sup> area at thickness of composite panel equal to 12.8 mm. Reliability of non-destructive testing with the specified classifier is equal to 90 - 95%.

Keywords: Nondestructive testing, neural networks, composite materials, neural networks of adaptive resonance theory

Поступила в редакцию 25.05.2012

## 21-я Международная ежегодная конференция и выставка

#### «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» начало октября 2013, Ялта

Организаторы

УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ», Украинское общество НК и ТД, Российское общество НК и ТД, Белорусская ассоциация НК и ТД, Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Днепропетровский нац. ун-т, НПП «Машиностроение»

#### Тематика конференции и выставки

•Общие вопросы неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД) •Теоретические вопросы взаимодействия физических полей с веществом контролируемых объектов •ТД и мониторинг состояния производственных объектов •Контроль напряженного состояния конструкций, изделий и сварных соединений • Опыт и перспективы НК на предприятиях горно-металлургического комплекса • НК и ТД в нефтегазовой отрасли и энергетике • Контроль и диагностика строительных конструкций • Вибрационные методы диагностики•Вопросы обучения, аттестации и сертификации специалистов, подразделений НК и ТД • Разработка и гармонизация стандартов в области НК и ТД • Метрологическое обеспечение средств НК • Состояние и развитие НК и ТД в Украине • Заседание Правления УО НКТД

Оргкомитет

02094, г.Киев, ул.Минина,3, к.47 тел./факс: (+38 044) 5733040 e-mail: office@conference.kiev.ua, www.conference.kiev.ua

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА АКУСТИКО-ЕМІСІЙНА ОЦІНКА ЗАРОДЖЕННЯ МІКРОТРІЩИН

#### В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, О. Г. СІМАКОВИЧ

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5. E-mail: skal@ipm.lviv.ua

Ранні стадії руйнування елементів конструкцій та виробів починаються з утворення і розвитку пластичної деформації, що призводить до руху і взаємодії дислокацій у твердому тілі, а за певних умов вони можуть групуватись і утворювати дислокаційні мікротріщини. Зародження та розвиток останніх є джерелом сигналів АЕ. Амплітуда сигналу пропорційна площі новоутвореної дислокаційної тріщини. Тому для того, щоб виявити появу дефекту методом АЕ, необхідно мати достатню величину утвореної мікротріщини для даного матеріалу, яка б дала амплітуду сигналу під час свого стрибкоподібного утворення, достатню для його реєстрування. За результатами попередніх досліджень авторів встановлено, що найімовірнішим механізмом зародження мікротріщини у твердому тілі є модель її утворення у загальмованій площині дислокаційного скупчення, оскільки тоді необхідно найменшу кількість дислокацій і найменші локальні напруження. Це зумовлено тим, що на початкових етапах дислокаційні ансамблі реагують тільки в своїх смугах ковзання, а за досягнення критичних значень починають об'єднуватись із сусідніми. Як показали наведені у праці результати досліджень, для зародження мікротріщини за згаданим механізмом необхідно 5-6 дислокаційних площин ковзання, які включають приблизно 75 рухомих дислокацій кожна. Амплітуда сигналів АЕ, що супроводжує утворення такого дефекту, становить 0,3...1,3 мВ за чутливості первинного п'єзоперетворювача 1,6-10 В/м, що відповідає еквівалентній площі новоутвореного дефекту розміром приблизно 100 мкм<sup>2</sup>. Для конструкційної гартованої сталі 45 похибка теоретичних розрахунків становить 6...10 %, а для стану поставки 8...15 %, що цілком задовольняє точність діагностичних обстежень реальних об'єктів контролю. Бібліогр. 8 назв, табл. 1, рис. 3

Ключові слова: акустична емісія, дислокація, дислокаційне скупчення, мікротріщина.

Зростання напружень у твердому тілі призводить до руху і взаємодії дислокацій, а за певних умов вони можуть групуватись і утворювати дислокаційні мікротріщини. Зародження та розвиток останніх є джерелом сигналів акустичної емісії (САЕ). Щоб виявити появу мікротріщини методом АЕ, необхідно мати величину утвореної дислокаційної мікротріщини у даному матеріалі і відповідний їй сигнал. В даній праці запропоновано алгоритм моделювання й кількісної оцінки зародження дислокаційної мікротріщини за сигналами АЕ. Їх суть полягає у такій послідовності дій:

 обгрунтуванні механізму зародження мікротріщини за структурними показниками даного матеріалу;

 – розрахунку мінімальної кількості дислокацій для зародження мікротріщини, згідно вибраної моделі її утворення і особливостей матеріалу, що випробовують;

 перевірці можливості виявлення дислокаційного мікротріщиноутворення за параметрами сигналів АЕ, провівши відповідний перерахунок;

 – оцінці амплітуди сигналів АЕ від утворення мікротріщини за вибраною моделлю і наявним матеріалом;

– порівнянні експериментальних даних з теоретичними результатами.

Обгрунтування методики досліджень. Базуючись на даних праць [1–3], найімовірнішим механізмом зародження мікротріщини є модель

тріщини у загальмованій площині скупчення. Таке її утворення проходить у два етапи: злиття дислокацій, що належать одному скупченню, в дефект і об'єднання цих дефектів. На першому етапі зародження окремих мікротріщин (до злиття мікротріщин кожної смуги в спільну тріщину) є незалежним. Тому для розрахунку окремої смуги можна використовувати механізми, характерні для однієї групи дислокацій (наприклад, Зінера–Стро).

Для зародження мікротріщин шляхом об'єднання дислокацій, ураховуючи теплові флуктуації, умова утворення мікротріщин [2]:

$$n\tau \approx \alpha(T)D,\tag{1}$$

де n — кількість дислокацій, що утворили тріщину;  $\tau$  — напруження, яке діє на дислокаційну групу;  $D = G/2\pi k$  — модуль пружності дислокації (для гвинтової k = 1; для крайової k = 1 - v, v — коефіцієнт Пуасона);  $\alpha(T)$  — температурний коефіцієнт, що полегшує зародження мікротріщин; G — модуль зсуву.

Як відомо [4, 5], важливу роль у вивченні дислокаційних процесів відіграють методики, побудовані на застосуванні явища АЕ. Згідно методики АЕ-виявлення дефектів у сталях за навантаження до рівня напружень 500 МПа за чутливості первинного перетворювача до переміщення поверхні 10<sup>-13</sup> м і відстані до джерела 0,1 м може виявляти новоутворені поверхні площею близько 100 мкм<sup>2</sup>. Автори праць відзначають, що в лабораторних умовах поріг виявлення істотно збільшується і

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, №1,2013

тоді найменше переміщення поверхні об'єкта контролю, яке впевнено фіксує первинний перетворювач AE, становить  $10^{-15}...10^{-14}$ м.

Сучасні вимірювальні АЕ-засоби реєструють рух одиничних дислокацій, руйнування карбідів у сталях розміром менш ніж 1 мкм, відшарування чи руйнування включень сульфідів і силіцидів, утворення та злиття мікропор, мікротріщин тощо. Дислокаційне утворення мікротріщин може бути



зумовлене також такими механізмами, як міжкристалітне руйнування, скол і зсув.

Мінімальну кількість дислокацій, яка потрібна для утворення мікротріщин, що фіксується ПАЕ, можна визначити за співвідношенням [2]:

$$S_{\min} = 2h_{\min}L, \qquad (2)$$

де  $S_{\min}$  — площа мікротріщини;  $h_{\min}$  — її ширина; L — довжина.

Звідси

$$h_{\min} = S_{\min}/2L = bn^2/2,$$
 (3)

де *b* — вектор Бюргерса. Із залежності (3) отримаємо:

$$n = \sqrt{\frac{S_{\min}}{bL}}.$$
 (4)

Необхідно зазначити, що кількість смуг, по яких ковзають дислокації, лежить в межах 7...10 [3].

Результати вимірювань та їх інтерпретування. Експерименти проводили шляхом розтягання циліндричних зразків, які виготовлені зі сталі 45 у стані поставки та гартованої. Їх розміри наведені на рис. 1.

Відбір і обробку сигналів АЕ проводили за допомогою вимірювальної системи SKOP-8 [5]. Під час навантаження зразка одночасно реєстрували сигнали АЕ, а також його видовження. За отриманими даними будували діаграми розтягу (рис. 2), які суміщували із синхронно

*Рис. 1.* Циліндричний зразок: *а* — розміри зразка; *б* — загальний вигляд записаними акустограмами (рис. 3). до і після випробувань



Рис. 2. Діаграма розтягу гладкого циліндричного зразка зі сталі 45: *а* — гартована; *б* — стан поставки



Рис. 3. Типова часова залежність зміни напружень у перерізі циліндричного зразка та амплітуд (*A*) сигналів АЕ на виході первинного перетворювача (обведено локальні піки САЕ, які гіпотетично приймали за моменти утворення мікротріщин): *а* — сталь 45 гартована; *б* — стан поставки



Значення напружень в перерізі зразків і максимум сигналів АЕ, що відповідають локальним пікам, зведені у таблицю.

Проведемо аналіз отриманих результатів досліджень. Приймемо для сталі 45  $b = 3 \cdot 10^{-10}$  м;  $L = 10^{-6}$  м;  $S_{\min} = 10^{-10}$  м<sup>2</sup> [2, 6], тоді, згідно (4), отримаємо  $n_{\min} \approx 550$ . Тому середня кількість рухомих дислокацій в кожній смузі має знаходитись в межах 55...80.

Для того, щоб обчислити мінімальну кількість рухомих дислокацій в одній смузі, необхідну для утворення мікротріщин у сталі 45, приймемо  $\alpha(T) = 0.25; D = 30$  МПа;  $\tau = 10$  МПа [2, 7]. Тоді для утворення однієї мікротріщини отримаємо:

$$n \approx \alpha(T)D/\tau \approx 75.$$
 (5)

Отож, якщо в одній площині ковзання сформується така кількість рухомих дислокацій, то отримаємо утворення мікротріщин, що узгоджується з теоретичними викладками, приведеними вище. На цій підставі можна вважати, що за даною моделлю утворення мікротріщин в загальмованій площині скупчення може бути виявлене методом AE.

Порівняємо тепер отримані результати вимірювань із розрахунковими викладками. Наведені у таблиці сигнали AE на ранніх стадіях деформування мають амплітуди на виході первинного перетворювача в межах 0,3...1,4 мВ. Якщо взяти до уваги коефіцієнт його чутливості  $\eta = 1,6\cdot10^9$  В/т, то отримаємо, що переміщення під його контактною поверхнею становлять  $(0,2...0,9)\cdot10^{-12}$  м. Виходячи із залежності  $u^* = A/\eta$ , як було показано вище, величина переміщень є достатньою для виявленого прийому пружних хвиль AE, що супроводжують мікротріщиноутворення.

Додатково, наближено перевіримо отриманий результат за відомою залежністю для переміщення поверхні від площі новоутвореної тріщини відриву у просторі [8]:

$$u_{\max} = \delta \frac{\sigma_0 S}{\pi \rho R c_1^2},\tag{6}$$

де  $\sigma_0$  — напруження відриву; r — радіус дископодібної тріщини, еквівалентної за площею до реальної;  $\rho$  — густина матеріалу;  $c_1$  — швидкість поширення пружних хвиль у матеріалі; R відстань від тріщини до точки встановлення первинного перетворювача AE;  $\delta = 0,452$ .

Покладемо р = 7800 кг/м<sup>2</sup>;  $\sigma_0 = 560$  МПа;  $c_1 = 5930$  м/с; R = 0,025 м;  $S = 10^{-10}$  м<sup>2</sup> і отримаємо  $u_{\text{max}} \approx 1,19 \cdot 10^{-12}$  м. Бачимо також, що переміщення під первинним перетворювачем більше  $u_{\text{max}} > 10^{-14}$  м і може бути зареєстрованим в лабораторних умовах АЕ-вимірювань.

Залежність максимальних амплітуд САЕ від напружень у зразку

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕ

| <i>t</i> , c          | σ, МПа              | А, мкВ  | А* (розрахункове),<br>мкВ | Похибка б, % |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------------------|---------------------|---------|---------------------------|--------------|--|--|--|--|--|--|--|
|                       | Гартована сталь 45  |         |                           |              |  |  |  |  |  |  |  |
| 189,65                | 179,92              | 644,46  | 613,64                    | 5,02         |  |  |  |  |  |  |  |
| 354,83 346,00 1100,95 |                     | 1180,06 | 6,70                      |              |  |  |  |  |  |  |  |
|                       | Стан поставки       |         |                           |              |  |  |  |  |  |  |  |
| 25,95                 | 98,60               | 393,83  | 343,04                    | 14,81        |  |  |  |  |  |  |  |
| 94,33                 | 94,33 253,53 786,37 |         | 882,11                    | 12,89        |  |  |  |  |  |  |  |
| 145,85                | 394,39              | 1199,40 | 1372,17                   | 12,59        |  |  |  |  |  |  |  |

Як видно з таблиці, похибка δ між розрахунковими і експериментальними даними може сягати до 15 %. Це зумовлено, в першу чергу, прийнятою середньою кількістю дислокацій у смузі. Для реальних кристалів їх кількість, кількість смуг ковзання, локальні напруження, що зумовлюють рух дислокацій, розміри кристалу і низка інших параметрів не є сталими. Проте слід зауважити, що експериментальні результати є того ж порядку, що і розрахункові, а тому можна вважати, що зареєстровані на ранній стадії деформування сигнали АЕ супроводжують зародження і розвиток мікротріщин.

#### Висновки

Механізм утворення мікротріщини в загальмованій смузі скупчення дислокацій є найімовірнішим, оскільки потребує найменшої кількості дислокацій і найменших локальних напружень. Важливою його характеристикою є те, що на початкових етапах дислокаційні ансамблі реагують тільки в своїх смугах ковзання, а за досягнення критичних значень починають об'єднуватись із сусідніми.

Як показали результати досліджень, для зародження мікротріщини необхідно п'ять-шість дислокаційних площин ковзання, які включають приблизно 75 рухомих дислокацій кожна. Амплітуда сигналів АЕ, що супроводжує утворення такого дефекту, становить 0,3...1,3 мВ за чутливості первинного п'єзоперетворювача 1,6·10<sup>9</sup> В/м, що відповідає еквівалентній площі новоутвореного дефекту розміром приблизно 100 мкм<sup>2</sup>. Для конструкційної сталі 45 похибка становить 6...10 %, а для стану поставки 8...15 %, що цілком задовольняє точність діагностичних обстежень реальних об'єктів контролю.

- Владимиров В. И., Ханнанов Ш. Х. Актуальные задачи теории зарождения дислокационных трещин // Физика металов и материаловедение. — 1970. — 30. — С. 490–510.
- Владимиров В. И. Физическая природа разрушения металлов. — М.: Металлургия, 1984. — 280 с.
- Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов: пер. с англ. / Под ред. Б. Я. Любова. — М.: Мир, 1972. — 408 с.
- Eitzen D. G., Wadley H. N. G. Acoustic Emission: Establishing the Fundamentals // J. Res. Nat. Bur. Stand. 1984. — 89, № 1. — P. 75–100.
- 5. *Назарчук 3. Т., Скальський В. Р.* Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн.

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

посібник: у 3 т. — Т. 1.: Теоретичні основи методу акустичної емісії. — Київ: Наук. думка, 2009. — 287 с.

 Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. — Київ: Наук. думка, 1991. — 416 с.  Скальський В. Р., Андрейків О. Є. Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії. — Львів: Вид. центр Львів. нац. ун-ту ім. І. Франка, 2006. — 330 с.

Early stages of fracture of structural elements and products begin from formation and development of plastic deformation that leads to movement and interaction of dislocations in the solid body, and under certain conditions dislocations can bunch and form dislocation microcracks. Initiation and development of the latter is the source of AE signals. Signal amplitude is proportional to the area of newly formed dislocation crack. Therefore, in order to detect defect initiation by acoustic emission (AE) method, it is necessary to have a sufficient size of the formed microcrack for the given material that would generate signal amplitude during its jumplike formation, sufficient for signal recording. Results of earlier investigations by the authors revealed that the most probable mechanism of microcrack initiation in a solid is the model of its formation in a braked plane of dislocation clustering, as this requires the smallest number of dislocations and lowest local stresses. It is due to the fact that at the initial stages the dislocation assemblies react only in their slip bands, and having reached critical values they start to coalesce with the neighbouring ones. As shown by investigation results given in the work, initiation of microcracks by the above-mentioned mechanism requires 5 to 6 dislocation slip planes, which include approximately 75 mobile dislocations each. Amplitude of AE signals that accompanies formation of such a defect, is equal to 0.3 - 1.3 mV at primary piezoelectric transducer sensitivity of  $1.6 \cdot 10^9$  V/m that corresponds to equivalent area of a newly formed defect of approximately  $100 \ \mu m^2$ . For quenched structural steel 45 the error of theoretical calculations is equal to 6 - 10%, and for as-delivered condition it is 8-15% that completely satisfies the accuracy of diagnostic examinations of actual control objects.

Keywords: acoustic emission, dislocation, dislocation cluster, microcrack

Надійшла до редакції 10.11.2012

## КАЛЕНДАРЬ КОНФЕРЕНЦИЙ И ВЫСТАВОК В 2013 г. (неразрушающий контроль, дефектоскопия, сварка)

| Время<br>проведения | Место проведения                 | Название выставки/конференции   |
|---------------------|----------------------------------|---|
| 26–28 марта         | Москва, СК «Олимпийский»         | Международная выставка «NDT RUSSIA – Нераз-<br>рушающий контроль и техническая диагностика в<br>промышленности», а также новый проект компании<br>ПРИМЭКСПО «TechTest – Испытания материалов и<br>механизмов» |
| 24-26 апреля        | Москва                           | Международная выставка «Экспо Контроль 2013»  |
| 14–16 мая           | Киев, Пуща-Водица                | Конференция «Неразрушающий контроль 2013»   |
| 20-22 мая           | Афины, Греция                    | $15^{\rm th}$ International Conference on NDT of HSNT (IC-MINDT-2013 )  |
| 3–7 июня            | Крым, Ялта                       | 1-я Международная научно-техническая конференция<br>«Инженерия поверхности и реновация изделий»   |
| 4-6 сентября        | Санкт-Петербург                  | Международная выставка «Дефектоскопия»  |
| 26-28 сентября      | Крым, Ялта                       | 13-я Международная конференция «Качество, Стан-<br>дартизация. Контроль: Теория и практика»   |
| Начало октября      | Крым, Ялта                       | 21-я Международная конференция и блиц-выставка «Методы и средства неразрушающего контроля и тех-<br>нической диагностики»   |
| 8-10 октября        | Москва, КВЦ «Сокольники»         | Международная выставка «Weldex/Poccварка»   |
| 15-17 октября       | Киев, ЭкспоПлаза                 | Выставка «Сварка и родственные технологии»  |
| ноябрь              | Munbai (Bombay), India           | 14 <sup>th</sup> Asia-Pasific Conference on Non-Destructive Testing (APCNDT2013)  |
| 23-25 ноября        | Киев                             | 12-й Международный промышленный форум-2013.<br>Секция «Неразрушающий контроль»  |
| 25-26 ноября        | Киев, ИЭС им. Е. О. Патона       | Международная конференция «Сварка и родственные технологии — настоящее и будущее»   |
| 3-5 декабря         | Екатеринбург, Уральские выставки | Выставка «Сварка. Контроль и диагностика»   |

<sup>7.</sup> *Фридель Ж.* Дислокации. — М.: Мир, 1967. — 660 с.

УДК 621.19.20

## ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ РЕНТГЕНОТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ АППАРАТОВ

## н. г. белый $^{\rm l},$ в. н. бухенский $^{\rm l},$ с. р. михайлов $^{\rm 2},$ н. в. слободян $^{\rm 2},$ д. с. шило $^{\rm 2}$

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton kiev.ua <sup>2</sup>НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, Киев, Пр-т Победы, 37. E-mail: fel@kpi.ua

Предложена методика расчета относительной чувствительности контроля рентгенотелевизионных систем на основе рентгеновских экранов и ПЗС-камер при работе с импульсными рентгеновскими аппаратами. Для визуализации изображений, формируемых импульсным рентгеновским излучением, используется режим регулируемой длительности накопления изображений в ПЗС-камере. Предложенная методика основана на расчете зависимостей яркостного и порогового контрастов изображений канавок и проволок от глубины канавки и диаметра проволоки соответственно для канавочных и проволочных эталонов чувствительности с учетом пространственной фильтрации изображений в системе. Относительная чувствительность контроля рентгенотелевизионной системы определяется в точке пересечения зависимостей яркостного и порогового контрастов изображений канавок и проволок от глубины канавки и диаметра проволоки. Для определения энергетического спектра плотности потока квантов излучения импульсной рентгеновской трубки используются линейные аппроксимации временных зависимостей анодного напряжения и анодного тока на протяжении импульса рентгеновского излучения. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований цифровой рентгенотелевизионной системы на основе рентгеновского монокристаллического экрана CsI(TI) и ПЗС-камеры, работающей в режиме регулируемой длительности накопления изображений на матрице, с импульсным рентгеновским аппаратом на основе рентгеновской трубки ИМА2-150Д. Выполнено сравнение рассчитанных и экспериментальных значений относительной чувствительности контроля рентгенотелевизионной системы. Библиогр. 14 назв., табл. 1, рис. 1.

Ключевые слова: рентгенотелевизионная система, относительная чувствительность контроля, импульсный рентгеновский аппарат, рентгеновский монокристаллический экран, ПЗС-матрица

Рентгенотелевизионные системы (РТВС) эффективно применяются для неразрушающего контроля (НК) качества материалов и изделий в промышленности. Такие системы имеют преимущества как перед пленочной, так и беспленочной цифровой рентгенографией на основе фосфорных запоминающих пластин в отношении производительности и стоимости контроля. В отличие от рентгенографии РТВС позволяют также контролировать объекты в статике и в динамике. Наиболее перспективными являются РТВС с рентгеновскими экранами и ПЗС-камерами, имеющие ряд преимуществ перед другими РТВС: возможность смены рентгеновского экрана, что позволяет изменять размер рабочего поля и другие параметры РТВС; простота конструкции; низкая стоимость; высокие рентгенотехнические характеристики. Такие РТВС эффективно применяются для НК объектов стационарными рентгеновскими аппаратами, обеспечивая относительную чувствительность контроля 1,5...2,0 % в широком диапазоне толщины стали. Дальнейшее улучшение относительной чувствительности контроля РТВС и расширения диапазона контролируемых толщин объектов возможно за счет перевода ПЗС-камер в режим регулируемой длительности накопления изображений [1, 2].

Однако использование режима регулируемой длительности накопления изображений в ПЗС-камере позволяет также использовать для просвечивания малогабаритные импульсные рентгеновские аппараты [3] с устранением низкочастотных мерцаний изображений и создавать мобильные РТВС для контроля объектов в полевых условиях и труднодоступных местах. В связи с этим актуальными являются теоретические и экспериментальные исследования РТВС, работающих в режиме регулируемой длительности накопления изображений в ПЗС-камере, с импульсными рентгеновскими аппаратами.

Исследования РТВС проводили с помощью импульсного рентгеновского аппарата Мира-2Д [4] на основе рентгеновской трубки ИМА2-150Д. В составе РТВС — высокочувствительная ПЗС-камера и рентгеновский монокристаллический экран CsI(Tl). В ПЗС-камере используется высокочувствительная ПЗС-матрица EXview HAD ICX-429ALL фирмы SONY [5] с микролинзовым массивом. Размер диагонали матрицы ICX-429ALL — 8 мм (формат 1/2"), количество светочувствительных элементов 752×582, размеры светочувствительного элемента матрицы по горизонтали и по вертикали равны соответственно  $L_{py} = 8,6$  и  $L_{pz} =$ = 8,3 мкм. Камера оборудована линзовым объек-

© Н. Г. Белый, В. Н. Бухенский, С. Р. Михайлов, Н. В. Слободян, Д. С. Шило, 2013

### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

тивом Computar с относительным отверстием 1:1 с переменным фокусным расстоянием. ПЗС-камера имеет возможность работы в режиме регулируемой длительности накопления изображений на матрице (количество кадров накопления до 2048). В состав РТВС входит портативный компьютер, который используется для управления РТВС, а также для записи и обработки рентгенотелевизионных изображений. Исследования проводили при просвечивании стальных образцов различной толщины, относительная чувствительность контроля рассчитывалась и измерялась по канавочным и проволочным эталонам чувствительности [6].

Относительная чувствительность контроля РТВС определяет наименьший в направлении просвечивания относительный размер дефекта исследуемого объекта, выявляемый данной системой. При использовании канавочного эталона относительная чувствительность определяется по формуле  $K_k = h_{\min}/(H_{kz} + h_{can}) \cdot 100$  %, где  $h_{\min}$  глубина наименьшей выявленной канавки;  $H_{kz}$  толщина контролируемого объекта;  $h_{\rm can}$  — толщина канавочного эталона. Для случая использования проволочного эталона относительная чувствительность определяется по формуле:  $K_d$  =  $= (d/H_{kz}) \cdot 100$  %, где d — диаметр наименьшей выявленной проволоки.

Для теоретических исследований использовали методику расчета относительной чувствительности РТВС на основе ПЗС-камер и рентгеновских экранов [1, 2], методику моделирования теневого рентгеновского изображения контролируемого объекта на входе РТВС [7], а также методику моделирования импульсных рентгеновских аппаратов [8–10].

Как показано в работе [1], дефект определенного размера в направлении просвечивания может быть с некоторой вероятностью обнаружен, если его яркостный контраст  $k_B$  больше или равен пороговому контрасту  $k_{\rm por}$ . Поэтому для определения минимального размера дефекта, который может быть обнаружен системой, необходимо построить зависимости яркостного и порогового контрастов от размера дефекта и найти их точку пересечения.

Для определения  $k_B$  и  $k_{por}$  применили следующие формулы:

$$k_B = K_S M(v), \tag{1}$$

$$k_{\rm por} = \sqrt{\frac{\Psi^2_{\rm por}}{(T_i/T_{EX}) (\Omega/A_{CCD})}} M^2(\nu) K_N^2 + k_\nu^2.$$
<sup>(2)</sup>

Здесь M(v) — пространственно-частотная характеристика (ПЧХ) рентгеноэлектрического преобразователя; v — пространственная частота, которая соответствует поперечным размерам дефекта;  $\Psi_{\rm por}$  — пороговое отношение сигнал/шум;  $T_i$  время интегрирования зрительным анализатором;  $T_{EX}$  — длительность кадра накопления;  $\Omega$  — площадь дефекта, приведенная к поверхности ПЗСматрицы;  $A_{CCD}$  — площадь светочувствительного элемента ПЗС-матрицы;  $k_v$  — пороговый контраст зрительного анализатора;  $K_S$  — зарядовый контраст изображения, определяемый как отношение количества накопленных в элементарной ячейке ПЗС-матрицы электронов, которые соответствуют разностному сигналу от дефекта в просвечиваемом объекте  $Q_{\rm S}(H_1, \Delta H_1)/q$  (т. е. полезного сигнала) и сигнала от бездефектного участка объекта  $Q_{\Phi}(H_1)/q$  (фонового сигнала):

$$K_S = \frac{Q_S/q}{Q_{\Phi}/q},\tag{3}$$

где  $K_N$  — относительная средняя флуктуация в расчете на площадь светочувствительного элемента ПЗС-матрицы за время накопления, определяемая как

$$K_N = \frac{1}{\sqrt{Q_{\oplus}/q}}.$$
(4)

Выражения для  $Q_{S}(H_{1}, \Delta H_{1})/q$  и  $Q_{\Phi}(H_{1})/q$  определяются следующим образом:

$$\frac{Q_{S}(H_{1},\Delta H_{1})}{q} = K_{\text{opt}} N_{k} T_{EX} A_{CCD} \frac{C_{ef}}{hc} \frac{\int_{-\infty}^{\lambda_{1}} \varphi_{nS}(\lambda) F(\lambda) \lambda d\lambda}{\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_{nS}(\lambda) d\lambda} \times$$

E<sub>max</sub>

х

$$\int_{0} \tilde{E}_{\max}(E) \exp[-\mu_{1}(E)H_{1}][1 - \exp(-\mu_{1}(E)\Delta H_{1})] \times 0$$

$$[1 - \exp(-\mu_S(E)H_S)]EdE, \qquad (5)$$

$$Q_{\phi}(H_1)_q^{\frac{1}{2}} = K_{\text{opt}} N_k T_{EX} A_{CCD} \frac{C_{ef}}{hc} B(E_{\text{max}}) \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_{nS}(\lambda) F(\lambda) \lambda d\lambda}{\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_{nS}(\lambda) d\lambda} \times$$

$$E_{\max}$$
(6)  
× $\int N(E_{\max}, E) \exp(-\mu_1(E)H_1)[1-\exp(-\mu_S(E)H_S)]EdE,$   
0

где  $N^{\sim}(E_{\max}, E)$  — энергетический спектр плотности потока рентгеновских квантов для импульсного рентгеновского аппарата;  $H_1$  — толщина просвечиваемого образца, см;  $\Delta H_1$  — глубина (высота) локального дефекта, см; E — энергия квантов рентгеновского излучения, кэВ;  $E_{\max}$  — максимальная энергия квантов, кэВ (численно равная напряжению на аноде рентгеновской трубки  $U_A$ , кВ);

 $H_{S}$  — толщина рентгеновского экрана, см;  $\mu_{1}(E)$  — линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения материала контролируемого образца, см<sup>-1</sup>;  $\mu_S(E)$  — линейный коэффициент истинного поглощения материала монокристаллического экрана, см<sup>-1</sup>;  $B(E_{\text{max}})$  — фактор накопления, который зависит от ускоряющего напряжения рентгеновской трубки, материала объекта и его толщины; К<sub>орт</sub> — коэффициент передачи оптической системы; N<sub>k</sub> — количество кадров накопления;  $T_{EX}$  — длительность кадра накопления, с;  $C_{ef}$  – конверсионная эффективность рентгеновского монокристаллического сцинтилляционного экрана; λ — длина волны оптического излучения, см;  $F(\lambda)$  — зависимость квантовой эффективности ПЗС-матрицы от длины волны оптического излучения;  $\phi_{n,s}(\lambda)$  — нормированная спектральная характеристика излучения монокристаллического экрана;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — ограничивают диапазон длин волн, в котором произведение характеристик  $\phi_{nS}(\lambda)$  и  $F(\lambda)$  не равно нулю; h — постоянная Планка; с — скорость света.

Для определения энергетического спектра плотности потока рентгеновских квантов импульсного рентгеновского аппарата  $\widetilde{N}(E_{\max},E)$  использовали модель импульсных рентгеновских аппаратов [8–10].

Модель учитывает как фактор импульсного функционирования таких аппаратов (переменное напряжение на аноде и переменный анодный ток на протяжении длительности импульса τ), так и особенности их конструкции (импульсные трубки с трансмиссионными и рефлекторными анодами). Для расчетов использовали упрощенную форму временных зависимостей напряжения и тока, которая отображает соответствующие реальные зависимости, характерные для трубок с взрывной эмиссией, а именно: на временном отрезке от 0 до т<sub>1</sub> ускоряющее напряжение постоянное, а ток линейно возрастает, а от  $\tau_1$  до  $\tau_2$  — напряжение и ток линейно спадают до нулевого значения. В соответствии с моделью распределение квантов излучения импульсного РА по энергиям в среднем за период следования импульсов  $\tau N(E_{max}, E)$  определяется с помощью уравнений:

$$\widetilde{N}(E_{\max}E) = [D_1(E_{\max}E) + D_2(E_{\max}E)]/\tau, \quad (7)$$

$$D_{1}(E_{\max}, E) = \int_{0}^{\tau_{1}} N_{E}(E_{\max}, E) I_{\max}(E_{\max}) \frac{t}{\tau_{1}} dt, \quad (8)$$

где

$$D_{2}(E_{\max}, E) = \int N_{E} \left( E_{\max} \frac{t}{\tau_{2} - \tau_{1}}, E \right) I_{\max}(E_{\max}) \frac{t}{\tau_{2} - \tau_{1}} dt, \quad (9)$$

$$I_{\max}(E_{\max}) = 1, 12 \cdot 10^{6} (C/d_{AK})^{1/2} E_{\max}^{3/4}, \quad (10)$$

$$N_E(E_{\max},E) = \frac{k_1 Z(E_{\max}-E)}{r_s^2 E} \times \exp[-\mu_m(E)y(E,E_{\max}) - \mu_0(E)H_0], \qquad (11)$$

где для трубок с трансмиссионным анодом

$$y(E, E_{\max}) = \Delta - \frac{E_{\max}^2 - E^2}{\rho_m C_{TB}(E_{\max})};$$
 (12)

*E*<sub>max</sub> — максимальная энергия квантов рентгеновского излучения, кэВ; Е — энергия квантов рентгеновского излучения, кэВ; *t* — время, c;  $\tau_2$  длительность импульсов; т — период их следования; I<sub>max</sub> — амплитуда импульса тока, А; С емкость конденсатора, который разряжается на импульсную рентгеновскую трубку,  $\Phi$ ;  $d_{AK}$  — расстояние между анодом и катодом трубки, см;  $k_1 = 1,1 \cdot 10^{12}$ квант/А с·кэВ; Z — атомный номер материала анода;  $r_s$  — расстояние от рентгенов-ской трубки, см;  $H_0$  — толщина выходного окна рентгеновской трубки, см;  $\mu_m(E)$ ,  $\mu_0(E)$  — линейные коэффициенты ослабления рентгеновского излучения соответственно материала анода и окна рентгеновской трубки, см<sup>-1</sup>;  $\rho_m$  — плотность ма-териала анода, г/см<sup>3</sup>;  $C_{\text{TB}}(E_{\text{max}})$  — константа Томсона-Видингтона; D — толщина трансмиссионного анода, см.

Уравнением (10) выражено соотношение амплитуд импульсов тока и анодного напряжения (соответствует значению  $(E_{\rm max})$ ), характерное для трубок со взрывной эмиссией. Уравнение (11) определяет  $N_E(E_{\rm max}, E)$  — мгновенное распределение квантов излучения импульсного рентгеновского аппарата по энергиям на единицу тока. Уравнение (12) учитывает геометрический фактор: длину пути  $y(E, E_{\rm max})$ , который проходят в толще анода кванты с разной энергией от места их зарождения до выхода, определяет самопоглощение тормозного рентгеновского излучения материала анода.

Расчет проводили для импульсной рентгеновской трубки ИМА2-150Д с трансмиссионным вольфрамовым анодом толщиной 0,02 мм. Распределение квантов излучения импульсного рентгеновского аппарата было усреднено за период следования импульсов, который для аппарата МИ-РА-2Д составляет 0,1 с [4]. Расстояние от анода рентгеновской трубки до рентгеновского экрана как при расчетах, так и при экспериментальных исследованиях, составляло  $r_s = 35$  см.

Для используемой оптической системы коэффициент передачи  $K_{opt} \approx 0,075$ ;  $A_{CCD} = L_{py} \times L_{pz} =$ = 0,71·10<sup>-10</sup> м<sup>2</sup>; конверсионная эффективность рентгеновского монокристаллического экрана CsI(Tl)  $C_{ef} = 0,06$  [11]. Нормированная спектральная зависимость излучения экрана CsI(Tl)  $\varphi_{nS}(\lambda)$ приводится в [11]. Справочные данные по энер-

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

гетической зависимости массовых коэффициентов ослабления для вольфрама (материала анода рентгеновской трубки), бериллия (материала выходного окна рентгеновской трубки), железа (материала контролируемых объектов) и массовых коэффициентов истинного поглощения для цезия и йода (элементов, из которых состоит материал рентгеновского монокристаллического экрана) взяты из работы [12]. При этом массовый коэффициент истинного поглощения CsI(Tl) рассчитывался по формуле для сложных соединений путем сложения произведений массовых долей каждого элемента соединения и его массового коэффициента истинного поглощения. Линейные коэффициенты ослабления и истинного поглощения  $\mu_m(E), \mu_0(E), \mu_1(E)$  и  $\mu_S(E)$  получали умножением массовых коэффициентов на плотность соответ-Фактор ствующих материалов. накопления  $B(E_{\rm max})$ , который учитывается при вычислении фонового сигнала, в соответствии с данными работы [7] определялся по формуле  $B(H_1, E_{\text{max}}) = 1 + 0.013 (E_{\text{max}} H_1)^{0.8}$ . Толщина объекта для случая использования проволочных эталонов равна толщине контролируемого образца:  $H_1 = H_{kz}$ , а размер дефекта — диаметру эталонной проволоки:  $\Delta H_1 = d$ . Для случая использования канавочного эталона толщина объекта равна сумме толщин контролируемого образца и эталона:  $H_1$  =  $= H_{kz} + h_e$ , а размер дефекта — глубине канавки, значение которой берется с противоположным знаком:  $\Delta H_1 = -h_k$ .

Площадь дефекта, приведенная к поверхности ПЗС-матрицы  $\Omega = d^2/\delta^2$ , где d — диаметр проволочного эталона. Длительность одного кадра накопления  $T_{EX} = 40$  мс. Время интегрирования зрительным анализатором  $T_i = 0,1c$ , пороговый контраст  $k_v = 2$  %, пороговое отношение сигнал/шум  $\psi_{\rm por} = 3$  [13, 14].

На рисунке представлены полученные с помощью описанной модели графики зависимостей контраста выходного сигнала матрицы и порогового контраста от размера дефекта для ускоряющего напряжения 150 кВ. При этом на шкале толщин отмечены размеры, соответствующие эталонам ГОСТ 7512–82 [6].

Из графиков видно, что контраст выходного сигнала ПЗС-матрицы  $k_B$  линейно возрастает с

увеличением размера дефекта (глубины канавки и диаметра проволоки). Угол наклона  $k_{R}$  тем меньше, чем больше толщина контролируемого образца и чем выше ускоряющее напряжение импульсного рентгеновского аппарата. Значение порогового контраста  $k_{\text{nor}}$  тем выше, чем меньше общее количество квантов, которое создает изображение, поэтому увеличение количества кадров накопления ведет к уменьшению k<sub>por</sub>. Для канавочних эталонов, у которых поперечные размеры канавок (ширина b) одинаковые, соответствующие зависимости порогового контраста имеют вид линий, параллельных оси абсцисс. Для проволочных эталонов, у которых толщина проволоки равняется ее поперечному размеру (диаметру d), форма зависимостей более сложная и пороговый конт-



Зависимости контраста выходного сигнала ПЗС-матрицы  $k_{\rm B}$  (сплошные линии) и порогового контраста  $k_{\rm por}$  (штриховые) от размера дефекта  $\Delta H_1$  — соответственно для канавочного эталона Fe-1 (*a*) и проволочных эталонов Fe-2, Fe-3 (*б*) при различном количестве кадров накопления: кривая  $I - k_{\rm B}$  при  $H_{kz} = 10$  мм;  $2 - k_{\rm B}$  при  $H_{kz} = 14$  мм. Кривые, номер которых отмечен штрихом, обозначают  $k_{\rm por}$ , соответствующий  $k_{\rm B}$  с таким же номером:  $1' - N_k = 375$ ;  $1'' - N_k = 450$ ;  $2' - N_k = 450$ 

Экспериментальные и рассчитанные значения относительной чувствительности контроля РТВС (ускоряющее напряжение рентгеновской трубки U<sub>A</sub> = 150 кВ)

| 1.                         | A     | ,                              |                                |                               |   |                                |                                |  |
|----------------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|--|
|                            |       | k                              | Санавочный этало               | Н                             | Проволочный эталон                      |                                |                                |  |
| <i>H<sub>kz</sub></i> , мм | $N_k$ | Номер канавки<br>и тип эталона | <i>К<sub>k</sub></i> , % эксп. | <i>К<sub>k</sub>,</i> % расч. | Номер проволо-<br>ки и тип этало-<br>на | <i>К<sub>d</sub></i> , % эксп. | <i>К<sub>d</sub></i> , % расч. |  |
| 10                         | 375   | 4Fe-1                          | 2,5                            | 1,7                           | 6Fe-3                                   | 4                              | 3,2                            |  |
| 10                         | 450   | 4Fe-1(5 Fe-1)                  | 2,5(1,7)                       | 1,7                           | 6Fe-3                                   | 4                              | 3,2                            |  |
| 14                         | 450   | 4Fe-1                          | 1,8                            | 1,8                           | 6Fe-3                                   | 2,9                            | 2,3                            |  |

раст уменьшается с увеличением диаметра проволоки. Отмеченные свойства характеристик  $k_B$  и  $k_{por}$  согласуются с известными принципами формирования рентгеновского изображения [7].

Значение относительной чувствительности рассчитывается по наименьшей глубине канавки канавочного эталона или наименьшему диаметру проволочного эталона, для которых выполняется критерий (1) (т. е. ближайшее со стороны больших размеров значение глубины или диаметра эталона относительно точки пересечения соответствующих кривых на рисунке).

В таблице приведены значения относительной чувствительности контроля РТВС по канавочным эталонам  $K_k$  и проволочным эталонам  $K_d$ , которые были получены экспериментально. Рядом с экспериментальными приведены значения чувствительности, рассчитанные путем моделирования и полученные из приведенных графиков.

В таблице указаны толщина контролируемого стального объекта  $H_{kz}$  и количество кадров накопления ПЗС-камеры  $N_k$ , а также номера наименьшей по глубине канавки и наименьшей по диаметру проволоки, выявляемые системой, с обозначением типов соответствующих эталонов (Fe-1 или Fe-3).

Сравнение рассчитанных и экспериментальных значений чувствительности свидетельствует об удовлетворительном согласовании значений, полученных с помощью предложенной модели, с экспериментальными. Из приведенных графиков видно, что увеличение количества кадров накопления позволяет повысить чувствительность системы. Кроме того, предложенная модель является универсальной и может быть использована при расчетах относительной чувствительности систем с импульсными аппаратами других моделей, имеющих другие параметры и характеристики.

#### Выводы

Использование режима регулируемой длительности накопления изображений в ПЗС-камерах позволяет устранить низкочастотные мерцания изображений при использовании для просвечивания малогабаритных импульсных рентгеновских аппаратов и создавать мобильные рентгенотелевизионные системы для контроля объектов в полевых условиях и труднодоступных местах.

В предложенной математической модели учтены все основные этапы преобразования сигналов в рентгенотелевизионных системах и она позволяет рассчитывать относительную чувствительность РТВС на основе импульсных рентгеновских аппаратов при использовании режима регулированной длительности накопления. Рассчитанные с помощью модели значения чувствительности хорошо согласуются с соответствующими экспериментальными.

Рентгенотелевизионные системы на основе ПЗС-камер, работающих в режиме регулированной длительности накопления изображений, и импульсных рентгеновских аппаратов с рентгеновской трубкой ИМА2-150Д, обеспечивают чувствительность контроля стальных объектов толщиной до 14 мм 1,8 % по канавочным и 2,9 % по проволочным эталонам.

Увеличение количества кадров накопления в ПЗС-камерах импульсных РТВС позволяет достичь чувствительности контроля, не уступающей чувствительности РТВС на основе рентгеновских аппаратов непрерывного действия.

- 1. Относительная чувствительность рентгенотелевизионных систем на основе высокочувствительных ПЗС-камер и рентгеновских монокристалических экранов / Н. Г. Белый, С. В. Денбновецкий, А. В. Лещишин и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2007. — № 2. — С. 34–40.
- Высокочувствительные рентгенотелевизионные системы на основе рентгеновских экранов и ПЗС-камер с накоплением изображений / В. А. Троицкий, Н. Г. Белый, В. Н. Бухенский и др. // Там же. — 2009. — № 3. — С. 41–46.
- Вавилов С. П., Горбунов В. И. Импульсное рентгеновское излучение в дефектоскопии. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 80 с.
- Комяк Н. И., Пеликс Е. А. Портативные импульсные рентгеновские аппараты серии МИРА // Электронная техника. Серия 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. — 1979. — Вып. 4. — С. 9–11.
- 5. *Diagonal* 8 mm (Type 1/2) CCD Image Sensor for CCIR B/W Video Cameras ICX429ALL. //www.sony.net.
- ГОСТ 7512–82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 30 с.
- 7. *Михайлов С. Р.* Моделирование теневого рентгеновского изображения контролируемого объекта в рентгеноскопических системах неразрушающего контроля // Электроника и связь. — 2002. — № 16. — С. 59–70.
- Слободян Н. В. Особенности моделирования характеристик излучения импульсных рентгеновских аппаратов // Там же. — 2004. — № 21. — С. 80–82.
- Слободян Н. В. Моделювання та порівняння характеристик випромінювання імпульсних рентгенівських апаратів різних типів // Там же. 2006. Тематич. выпуск «Проблемы электроники». Ч. 2. С. 33–36.
- Denbnovetsky S. V., Slobodyan N. V. Simulation of radiation characteristics of pulse X-ray devices for non-destructive testing the semiconductor materials // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. — 2006. — 9, № 1. — P. 68–72.
- Абрамов А. И., Казанский Ю. А., Матусевич Е. С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. М.: Энергоатомиздат, 1985. — 488 с.
- Сторм Э., Исраль Х. Сечения взаимодействия гаммаизлучения (для энергий 0,001...100 МэВ и элементов с 1 по 100). Справочник / Пер. с англ. — М.: Атомиздат, 1973. — 256 с.
- 13. Гурвич А. М. Физические основы радиационного контроля и диагностики. М.: Энергоатомиздат, 1989. 168 с.
- 14. *Роуз А.* Зрение человека и электронное зрение / Пер. с англ. М.: Мир, 1977. 216 с.

A procedure is proposed for calculation of relative testing sensitivity of X-ray TV systems based on X-ray shields and CCD-cameras at operation with pulsed X-ray units. The mode of adjustable duration of image accumulation in CCD-camera

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ—

is used for visualization of images formed by pulsed X-ray radiation. Proposed procedure is based on calculation of dependencies of brightness and threshold contrasts of images of grooves and wires on groove depth and wire diameter for grooved and wire sensitivity standards, respectively; allowing for spatial filtration of images in the system. Relative testing sensitivity of X-ray TV system is determined in the points of intersection of dependencies of brightness and threshold contrasts of groove and wire images on groove depth and wire diameter. Linear approximations of time dependencies of anode voltage and anode current during X-ray radiation pulse are used to determine the energy spectrum of quantum flux density of pulsed X-ray tube radiation. The paper gives the results of theoretical and experimental studies of X-ray TV system based on X-ray CsI(T1) single-crystal screen and CCD camera operating in the mode of adjusted duration of image accumulation on the matrix, with pulsed X-ray unit based on IMA2-150D X-ray tube. Comparison of calculated and experimental values of relative sensitivity of testing by X-ray TV system is performed.

Keywords: X-Ray TV system, relative testing sensitivity, pulsed X-ray system, X-Ray single-crystal screen, CCD-matrix

Поступила в редакцию 30.11.2012

### ЦІЛЬОВА КОМПЛЕКСНА ПРОГРАМА НАН УКРАїНИ «ПРОБЛЕМИ РЕСУРСУ і БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦії КОНСТРУКЦІЙ, СПОРУД ТА МАШИН»

#### Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2010–2012 рр. Науковий керівник — академік Б. Є. Патон

До збірника ввійшли статті, які підготовлені за результатами цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин», отриманими впродовж 2010–2012 рр., до реалізації якої було залучено 26 інститутів НАН України. Мета програми — розробка методологічних основ прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, створення методів, технічних засобів і технологій для оцінки технічного стану та подовження термінів експлуатації техногенно та екологічно небезпечних об'єктів. Для наукових співробітників, інженерів, студентів старших курсів, зайнятих розробкою та експлуатацією конструкцій, споруд та машин.

**Розділ 1.** Розробка методологічних основ оцінки технічного стану та обгрунтування безпечного терміну експлуатації конструктивних елементів об'єктів підвищеної небезпеки на території України.

**Розділ 2.** Розробка методів і нових технічних засобів неруйнівного контролю та діагностики стану матеріалів і виробів тривалої експлуатації.

Розділ 3. Розробка методів захисту від корозії елементів конструкцій об'єктів тривалої експлуатації.

Раздел 4. Разработка эффективных методов оценки и продления ресурса объектов атомной энергетики.

Розділ 5. Підвищення надійності та подовження ресурсу енергетичного обладнання і систем.

Розділ 6. Створення систем моніторингу технічного стану трубопроводів і об'єктів газо- та нафтопереробної промисловості.

Розділ 7. Підвищення надійності та подовження ресурсу мостів, будівельних, промислових і транспортних конструкцій.

Розділ 8. Розробка технологій ремонту та відновлення елементів конструкцій об'єктів підвищеної небезпеки з метою продовження терміну їх експлуатації.

Розділ 9. Підготовка нормативних документів і науково-технічних посібників з питань оцінки ресурсу об'єктів тривалої експлуатації.



## ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЦЕЛЬНОКАТАНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕСАХ

#### А.В. КОШУЛЯН, В.П. МАЛАЙЧУК, А.В. МОЗГОВОЙ, А.П. ТИМОЩЕНКО, Л.В. ЧУПРИНА

Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара. 49050, г. Днепропетровск, просп. Гагарина, 72. E-mail: rea.ftf@dnu.dp.ua

Представлены результаты исследований остаточных напряжений новых цельнокатаных железнодорожных колес на основании экспериментальных измерений ультразвуковым контактным методом с помощью прибора Debbie. Проведен анализ случайных погрешностей, связанных с неконтролируемыми условиями выполнения измерений. Установлено, что среднеквадратическое отклонение случайной погрешности составляет около 3,5 МПа при измерении чистовых колес. Показано, что для исследованных колес характерна флуктуация остаточных напряжений по окружности обода, которая не может быть объяснена случайной ошибкой измерений. Это обусловливает уникальность колес: у каждого колеса своя оценка параметров статистических закономерностей. В качестве показателей, содержащих информацию об остаточных напряжениях колес, предложено использовать среднее значение измерений по всем точкам, равномерно расположенных по окружности обода, и значение среднеквадратического отклонения измерений по этим точкам. Замечено, что разброс средних значений измерений в группе однотипных колес значительно превышает разброс, вызванный флуктуациями отдельных колес: 18,9 и 7,1 МПа по величине среднеквадратического отклонения. Представлены результаты корреляционного анализа измерений остаточных напряжений, выполненных ультразвуковым методом и разрушающим методом, путем измерения сходимости обода после его радиальной разрезки, а также методом голографической интерферометрии. Результаты настоящего исследования могут быть использованы для создания методики неразрушающего контроля остаточных напряжений железнодорожных колес ультразвуковым методом. Библиогр. 15 назв., рис. 6, табл. 1.

Ключевые слова: железнодорожное колесо, остаточные напряжения, ультразвуковой метод

Эксплуатационная надежность железнодорожных колес зависит от многих факторов, из которых одним из наиболее существенных является величина сжимающих остаточных напряжений (OH), препятствующая возникновению и развитию трещин, выходящих на поверхность обода.

В настоящее время ОН в соответствии с ГОСТ 10791 контролируются разрушающим способом посредством огневой радиальной разрезки и измерением величины схождения после остывания колеса. Разрезка проводится в произвольно выбранном месте и по результатам, полученным на одном колесе, принимается решение по всей партии колес [1].

Стандартом ГОСТ Р 54093 для измерения ОН предлагаются тензометрический (разрушающий), рентгеновский и ультразвуковой (УЗ) (неразрушающие) методы контроля [2]. Ведущими зарубежными фирмами-производителями колес и их потребителями проведены соответствующие исследования и применительно к неразрушающему УЗ контролю определены критериальные показатели уровня ОН. Стандартом EN 13262 указаны требования для допустимых ОН в новых цельнокатаных колесах — они, во-первых, должны быть сжимающими в области, прилегающей к поверхности катания, во-вторых, находиться в диапазоне -80... –150 МПа и, в-третьих, уменьшаясь по модулю, переходить через нуль на глубине между 35 и 50 мм. В качестве методов контроля ОН предлагаются тензометрический (разрушающий) и УЗ (неразрушающий) методы [3].

Впервые УЗ метод измерения напряжений в колесах был опробован в 1973 г. [4]. Примерно до 1990 г. большое количество отдельных исследователей и многочисленные группы по всему миру совершенствовали измерительную технику и разработали различные подходы измерения напряжений в образцах и готовых изделиях [5].

Положительные результаты, подтвердившие возможность измерений ОН УЗ методом, получены как зарубежными, так и отечественными исследователями. Совместный проект федерального управления железных дорог (США) с польской академией наук и рядом других организаций по оценке ОН в колесах показал хорошую достоверность результатов измерений ОН при помощи контактных и бесконтактных УЗ методов наряду с разрушающими испытаниями и значениями напряжений, полученных моделированием методом конечных элементов [6]. Различные способы измерения ОН опробованы также российскими исследователями и приведены в работе [7] — для контактного УЗ метода, в [8] — для бесконтактного, [9] — для рентгеновского и [10] — для тензометрического. Эти исследования основывались на не-

В работе принимали участие Н. А. Богун, А. М. Нестеренко, А. Н. Петренко, Ю. В. Сохач, Д. К. Тесленко, А. Г. Фесенко © А. В. Кошулян, В. П. Малайчук, А. В. Мозговой, А. П. Тимощенко, Л. В. Чуприна, 2013

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

большом массиве измерений, что не позволяет сделать выводы и рекомендации о технологии приемочного (сдаточного) неразрушающего контроля ОН на заводе-изготовителе.

Отечественными исследователями первые результаты анализа ОН в цельнокатаных колесах, по измерениям УЗ методом, приведены в работах [11,12]. Как продолжение этих исследований в данной работе основные результаты получены путем статистической обработки измерений ОН УЗ контактным методом более 200 колес и сравнения результатов с разрушающими испытаниями.

Физические основы измерений. УЗ метод измерения ОН основывается на акустоупругом эффекте: линейной зависимости скорости упругих волн от механических напряжений.

Анизотропия скорости УЗ в объеме металла связана с ОН [13]. При этом на анизотропию скорости УЗ, кроме ОН, оказывает влияние структура материала — текстура, которая включает предпочтительную ориентацию зерна и расположение неметаллических включений [14].

Для железнодорожных колес принимается, что сжимающие напряжения действуют вдоль окружности обода, радиальные ОН малы, а влияние текстуры на анизотропию скорости УЗ происходит в радиальном направлении [3]. ОН в этом случае рассчитывается по формуле:

$$B = \frac{V_h - V_r}{(V_h + V_r)/2} = \frac{t_r - t_h}{(t_r - t_h)/2} = B_0 + C_A \sigma_h, \quad (1)$$

где  $V_h$ ,  $V_r$ ,  $t_h$ ,  $t_r$  — скорость и время прохождения поперечных УЗ волн, поляризованных в окружном (*h*) и радиальном (*r*) направлениях.

Преимуществом данного метода измерений является то, что результат не зависит от толщины обода и его температуры [14]. Если известны константы  $B_0$  и  $C_A$ , то по измерению разности времени прохождения УЗ волн можно рассчитать величину ОН. Калибровочные константы можно определить путем проведения соответствующих экспериментальных исследований. В данной работе измерения проводили прибором Debbie, который может применяться для неавтоматизированной оценки напряженного состояния как новых колес, так и колес, бывших в эксплуатации [5]. Калибровочные константы, использованные при этом, были экспериментально определены на образцах из отечественных колес в лаборатории проф. Юлина Депутата.

Схема измерений ОН. Измерения ОН осуществлялись в m точках, равномерно расположенных по ободу каждого колеса и по n измерений в каждой точке (рис. 1, a). Расположения преобразователя при измерении в каждой точке условно показано на рис. 1,  $\delta$ .

Массив измерений каждого *j*-го колеса представляет собой матрицу  $X_j$ , dim $X = m \times n$ , каждый элемент которой обозначен через  $x_j(i,k), i \in [1,m]$ ,  $k \in [1,n]$ .

Обработка результатов измерений ОН. Предварительное изучение измерений ОН показали, что их следует рассматривать как случайные величины со своими вероятностными закономерностями. Если в *i*-й точке обода колеса выполнить серию измерений, то результат в этой точке можно охарактеризовать средним значением и среднеквадратическим отклонением  $\sigma^*(i)$ . Результаты измерений ОН в одной и той же точке для случая, когда серия из 30-ти измерений получена без изменения положения датчика, МПа: x = -106,  $\sigma^* =$ = 1,0 и для случая, когда после каждого выполненного измерения датчик повторно переустанавливался на ту же позицию, МПа: x = -113,  $\sigma^* = 2,5$ .

Как видно, при измерениях с переустановкой датчика дисперсия случайной ошибки увеличивается в шесть раз, однако, кроме этого, также изменяется и среднее значение измерений на контролируемом участке. Чтобы уменьшить влияние положения датчика, контактной жидкости и других неконтролируемых случайных условий на результат измерений, в каждой точке колеса после серии из *n*-измерений датчик переустанавливали.



Рис. 1. Расположение точек измерения по ободу колеса (а) и положение преобразователя на позиции измерений (б)

Экспериментально исследовалось влияние шероховатости поверхности обода (рис. 2, *a*) и угла расположения датчика (рис. 2, *б*) на показания прибора в одной и той же точке измерений. Установлено, что при уменьшении шероховатости с 5,5 *Ra* до 1 *Ra* среднеквадратическое значение случайной ошибки изменяется от 13 до 5 МПа, причем с минимумом около 3 МПа в районе 2 *Ra*. Шероховатость изменяли путем шлифовки поверхности обода чернового колеса с последующим ее замером прибором TR100. При изменении угла поворота в пределах  $\pm 10^{\circ}$  среднее значение в точке меняется на 20...30 %.

По матрице измерений каждого колеса вычислялись среднее значение измерений в *i*-й точке  $x_j(i)$ , отклонение *k*-го измерения от этого среднего  $\Delta x_{0j}(i,k) = x_j(i,k) - x_j(i)$  и его средний квадрат  $\Delta x_{0j}^2(i)$ . Величина  $x_j(i)$  является оценкой остаточного напряжения в *i*-й точке, а показатель  $\sigma^* = \sqrt{\Delta x_{0j}^2(i)}$  — среднеквадратическим значением случайной ошибки измерений в этой точке. На рис. 3 для некоторых колес показаны графики средних значений, рассчитанных по пяти замерам ОН в каждой точке по окружности обода. График на рис. 3, *а* построен по 25-ти точкам, равномерно расположенных по окружности, а на рис. 3, *б* — по 95-ти точкам.

Отметим, что характер подобных кривых может быть разным для различных колес: от медленно меняющихся симметричных или асимметричных, напоминающих окружность или эллипс, как на рис. 3, a, до шумоподобных, флуктуирующих вокруг среднего значения измерений X, как на рис. 3,  $\delta$ .

Матрица значений разбросов  $\Delta x_{0j}$  содержит информацию о характере случайных ошибок измерений *j*-го колеса. Вектор величин  $\Delta H_j(i) = \overline{x_j}(i) - \overline{X_j}$ — это разброс средних значений в точках относительно среднего значения всех измерений  $\overline{X}$ . Его средний квадрат  $\Delta \overline{H}_j^2$  — это дисперсия значений  $\overline{x_j}(i)$ . Величины  $\overline{X}$  и  $\sqrt{\Delta \overline{H}^2}$  могут быть выбраны в качестве интегральных показателей ОН колеса, измеренного УЗ методом. В свою очередь разброс  $\Delta x_{pj}(i,k) = x_j(i,k) - \overline{X_j}$  характеризует как флуктуацию измерений ОН по окружности обода, так и случайную ошибку и для него установлена зависимость:

$$\overline{\Delta x_{pj}^2} = \Delta \overline{H_j^2} + \Delta \overline{x_{0j}^2}.$$
 (2)





Рис. 2. Влияние шероховатости поверхности (а) и угла поворота датчика (б) на величину ОН



*Рис. 3.* Графики средних значений измерений ОН по окружности обода колес: *a* — 42307-99 (*m* = 25, *n* = 5); *б* — 21376-061 (*m* = 95, *n* = 5)

## 人 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

На рис. 4 для группы 100 колес из стали R7, измеренных минимум в 25-ти точках по ободу и по пяти измерений в каждой точке, представлены гистограммы ошибок измерений  $\Delta x_{0j}(i,k)$ , флуктуаций  $\Delta H_j(i)$  и разброса  $\Delta x_{pj}(i,k)$ . Их выборочные значения  $\sigma^*[\Delta x_{0j}] = 3,5$  МПа,  $\sigma^*[\Delta H_j] = 7,1$  МПа,  $\sigma^*[\Delta x_{nj}] = 7,8$  МПа.

Следует отметить, что наличие флуктуаций (рис. 3) не зависит от случайных ошибок измерений. В связи с этим, по мнению авторов, требуется доработка стандарта EN 13262, что необходимо для учета неравномерности по окружности обода OH, и использование этого показателя наряду со средним значением OH как еще одного критерия качества.

Средние значения  $X_j$  множества колес также являются случайными величинами. На рис. 5 представлена гистограмма измерений  $x_j(i,k)$  той же группы из 100 колес и гистограмма средних значений этих измерений  $\overline{X_j}$ . Как видно, среднее значение всех измерени<u>й</u> группы и их средних одинаково и составляет  $\overline{X_j} = 75$  МПа.

Как показано на рис. 5, все исследованные колеса удовлетворяют требованию части D3 положения 1 стандарта EN 13262 — все измеренные OH сжимающие (отрицательные), однако только для 40 % колес среднее значение OH  $\overline{X_j}$  находится в диапазоне [-150...-80] МПа (на гистограммах показано штриховой линией), что не соответствует положению 3.5.2. этого нормативного документа.

Среднеквадратический разброс средних  $\overline{X}_{j}$  равен 18,9 МПа, что значительно больше, чем разброс измерений в колесе, который составляет 7,8 МПа. Таким образом, колеса можно отнести к объектам контроля с двумя случайными параметрами  $\overline{X}_{i}$  и  $\Delta x_{ip}^{2}$ .

Сравнительный анализ напряжений по результатам их разрушающего и неразрушающего контроля. ОН тридцати колес различных типов оценивали с помощью прибора Debbie, а также в соответствии с ГОСТ 10791 методом измерения сходимости обода после его радиальной  $\Gamma(\Delta x_0)$ 



*Рис. 4.* Гистограммы разброса: *а* — случайных ошибок; *б* — значений ОН в точках; *в* — измерений относительно средних значений ОН





ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, №1,2013

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

| Способ     | Номер точки |      |      |      |      |      |      |      | Среднее значение  | Среднеквалратическое отклонение  |
|------------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|-------------------|----------------------------------|
| измерения  | 1           | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | среднее зна тепне | среднеквадрати теское отклонение |
| Debbie     | -90         | -115 | -102 | -118 | -117 | -105 | -117 | -115 | -110,0            | 9,9                              |
| Голография | -73         | -88  | -110 | -122 | -78  | -103 | -87  | -93  | -94,3             | 16,5                             |

ОН колеса № 32547-154, измеренные при помощи прибора Debbie и методом голографической интерферометрии



Рис. 6. Регрессионная зависимость величины расходимости обода после радиальной разрезки в соответствии с ГОСТ 10791 от ОН, измеряемого прибором Debbie

разрезки. На рис. 6 по экспериментальным данным построен график зависимости расходимости обода после резки d от среднего значения напряжения X, измеряемого прибором Debbie.

Коэффициент корреляции между измерениями сходимости и напряжений составляет 0,73, что указывает на возможность использования прибора Debbie для НК каждого колеса.

Для колеса 32547-154 ОН измеряли при помощи прибора Debbie, а также методом голографической интерферометрии. Для создания и последующей регистрации перемещений поверхности сверлились отверстия диаметром 5 мм на такую же глубину. Результаты измерений приведены в таблице.

Как видно из таблицы, для ОН, измеренных методом голографической интерферометрии, также характерны флуктуации по окружности обода, в данном случае ОН изменяются от –122 до –73 МПа. Отличия между измерениями вызваны, по всей видимости, тем, что значения ОН определяли расчетным способом с использованием табличных, а не фактических значений модулей упругости.

#### Выводы

Проведен статистический анализ измерений прибором Debbie OH более 200 цельнокатаных колес (всего около 20 тыс. измерений) различных типов и марок стали. Установлено, что среднеквадратическое значение случайной ошибки измерений составляет 3,5 МПа для чистовых колес и 7,2 МПа для черновых.

Было обнаружено, что для ОН колеса характерны флуктуации по окружности обода, не связанные со случайными ошибками. Это обусловливает уникальность колес: у каждого колеса своя оценка параметров статистических закономерностей. В качестве показателей, содержащих информацию об OH колес, предложено использовать среднее значение всех измерений и среднеквадратическое отклонение средних значений измерений в точках.

По результатам статистического анализа установлено, что среднеквадратический разброс средних значений измерений ОН в группе однотипных колес значительно больше, чем разброс измерений в единственном колесе. Таким образом, колеса отличаются друг от друга в большей мере средней величиной измеряемых ОН и в меньшей мере величиной разброса, обусловленного флуктуациями ОН по окружности обода.

Установлено, что ОН всех серийно изготавливаемых колес сжимающие. При этом только для 40 % из них средние значения измерений по ободу находятся в интервале –150...–80 МПа, указанном стандартом EN 13262.

Исследована корреляционная связь между величинами ОН, измеренных прибором Debbie (МПа), и сходимостью обода после разрезки (мм). Выборочное значение коэффициента корреляции равно 0,73. При этом сходимость обода изменялась от -2,5 до 5,0 мм, а ОН этих колес соответственно от -38,6 до -150 МПа.

- ГОСТ 10791–2012. Колеса цельнокатаные технические условия; [межгосударственный стандарт]. — М.: Стандартинформ, 2006. — 28 с.
- ГОСТ Р 54093–2010. Колеса железнодорожного подвижного состава // Методы определения остаточных напряжений. М.: Стандартинформ, 2011. 16 с.
- DIN EN 13262. Railway applications Wheelsets and bogies // Wheels — Product requirements/ [English version of DIN EN 13262:2006] — CEN, 2006.
- Experiences in applications of ultrasonic measurements for railroad industry — DEBRO UMS / A. Bartosiewez, A. Brokowski, J Deputat, K. Mizerski. — Nowosolipsowska 1, 02-385, Warsaw.
- Hauk. V. Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods — Institute of Material Sciences and Engineering; Amsterdam: Elsevier Science, 1997; ISBN-13: 978-0444824769.
- Stone D., Garcia G., Burnett S. An Evaluation of residual stress in cast steel railroad wheels using electromagnetic acoustic transducers (EMATs) // Railroad wheel residual stress detection program, final report/ [U.S. Department of Transport, Federal Railroad Administration] — The National Technical Information Service, Virginia. — 1998.
- Камышев А. В., Никитина Н. Е., Смирнов В. А. Измерение остаточных напряжений в ободьях железнодорожных колес методом акустоупругости // Дефектоскопия. — 2010. — 3. — С. 50–54.
- Оценка остаточных напряжений в ободьях вагонных колес электромагнитно-акустическим методом / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак и др. // Там же. — 2011. — № 8. — С. 16–28.
- 9. Шиткин С. Л. Исследование рентгеновским методом влияния остаточных напряжений в цельнокатаных ва-

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

гонных колесах на повышение их качества: Автореф. дис... канд. техн. наук. — М., 2007. — 23 с.

- Узлов И. Г., Бабаченко А. И. Исследование напряженного состояния железнодорожных колес повышенной прочности // Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. — 2005. — № 11. — С. 166–169.
- Неразрушающий контроль остаточных напряжений железнодорожных колес / А. В. Кошулян, В. П. Малайчук, А. В. Мозговой и др. // Матер. XVI Междунар. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». — Ялта, 2008. — С. 232–237.
- 12. Оценка влияния параметров термической обработки на величину и распределение остаточных напряжений в железнодорожных колесах / А. В. Кошулян, А. В. Мозго-

вой, А. П. Тимощенко, Л. В. Чуприна // Матер. XVI Междунар. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». — Ялта, 2008. — С. 222–228.
13. Вишняков Я. Д., Пискарев В. Д. Управление остаточны-

- Вишняков Я. Д., Пискарев В. Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. — М.: Металлургия, 1989. — 240 с.
- Hirao M., Ogi H. EMATs for Science and Industry // Osaka University, Japan Boston/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publishers, 2003. ISBN-13: 978-1402074943.
   Jemec V., Grum J., Bozicko S. Ultrasonic measurement of
- Jemec V., Grum J., Bozicko S. Ultrasonic measurement of hoop stress in the Rim of monoblock railroad wheel // Ceska spolecnost pro nedestruktivni zkouseni — Defektoskopie 2008 [materialu 38 mezinarodni konference]. — Brno, 2008.

The paper presents the results of investigations of residual stresses in new whole-rolled railway wheels based on experimental measurements by an ultrasonic contact method with Debbie system. Analysis of random errors associated with uncontrolled conditions of taking the measurements is performed. It is established that the mean-root-square deviation of the random error is equal to about 3.5 MPa at measurement of finished wheels. It is found that the studied wheels are characterized by fluctuation of residual stresses around the rim circumference that cannot be attributed to random error of measurement. This is due to uniqueness of the wheels: each wheel has its own evaluation of statistical regularity parameters. It is proposed to use the mean value of measurements on all the points equidistant around the rim circumference and value of mean-root-square deviation of measurement values in a group of similar wheels is much higher than the scatter caused by fluctuations of individual wheels: 18.9 and 7.1 MPa by value of mean-root-square deviation. The paper presents the results of correlation analysis of residual stress measurements, made by ultrasonic technique and destructive technique by measurement of rim convergence after its radial cutting up, as well as by the method of holographic interferometry. Results of this study can be used to develop a procedure of non-destructive testing of residual stresses of railway wheels by ultrasonic testing.

Keywords: Railway steel, residual stresses, ultrasonic method

Поступила в редакцию 03.08.2012



#### Конференция «Неразрушающий контроль 2013»

14 – 16 мая 2013 г.

Киев

Ассоциация ОКО проводит конференцию «Неразрушающий контроль 2013». Конференция будет проходить в живописнейшем районе города Киева Пуща-Водица при поддержке и участии «Ультракон-Сервис», «Промприлад», УкрНИИНК.

В рамках конференции будет проходить специализированная выставка, посвященная 20-летию «Ультракон-Сервис».

#### В программе конференции планируется заседание секций:

- Атомная энергетика
- Авиация
- Железнодорожный транспорт
- Машиностроение и металлургия
- Сертификация персонала в области неразрушающего контроля

На секционных заседаниях будут рассмотрены вопросы разработки и применения новейших средств неразрушающего контроля, методов неразрушающего контроля, а также новых технологий и методик.

Тел.: (044) 531-37-27, 531-37-26 E-mail: ndt@ln.ua

## ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ СОСУДОВ С ОВАЛЬНОСТЬЮ

#### В. М. ДОЛИНСКИЙ, В. Н. СТОГНИЙ, В. И. ЧЕРЕМСКАЯ

ПАО «УКРНИИХИММАШ», 610126, г. Харьков, ул. Маршала Конева, 21. E-mail: div5@himmash.com.ua

Рассмотрены методы, позволяющие оценить остаточную работоспособность конструкции по условиям прочности. Показано, что овальность не более 1%, предусмотренная в нормативном документе НПАОП 0.00-1.07-94 («Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением») — является явно завышенной нормой недопустимой дефектности, что приводит к отбраковке работоспособных объектов. Хотя данные расчетов по рассмотренным методам не совпадают, достаточно близкие и обоснованные результаты дают расчеты по ГОСТ Р52857.11—2007. «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчетов на прочность. Метод расчета на прочность обечаек и днищ с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек» и СОУ-011:2010. «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчетов на прочность. Метод расчета овальных сосудов с вмятинами. УКРНИИХИММАШ», которые можно рекомендовать для использования в практических расчетах при прогнозе остаточной работоспособности промышленных объектов. Библиогр. 7 назв., рис. 2.

Ключевые слова: остаточная работоспособность конструкций, овальность обечаек, дефектность

Овальность — дефект сосудов и трубопроводов, который в различных нормативных документах оценивается по разному. В соответствии с Правилами по устройству и эксплуатации сосудов, работающих под давлением [1], предельные значения овальности в зависимости от категории сосудов не должны превышать 1...1,5 %. Такое условие можно считать уместным при изготовлении сосудов, поскольку это требование ужесточает технологическую дисциплину производства и обеспечивает качественную сборку и надежность конструкции. При эксплуатации решающим условием работоспособности объекта являются условия его статической и циклической прочности. Существуют нормативные документы [2-4], позволяющие выполнить оценку прочности овального сосуда. В задачу настоящей работы входит сравнительный анализ указанных методик по критерию статической прочности, а также оценка циклической прочности овальных обечаек.

Критерий статической прочности имеет вид: 1. По РД [2]

 $\delta \leq (K^2 - G^2)/(2K\gamma G)$ , где  $K = 10^{-2} [\gamma + (\gamma^2 + 10^4)^{1/2}].$  (1) 

2. IIO TOCT P [3]  
$$\delta \leq (1/\gamma)[(1/G) - (1/3)](1+3,64G\eta\gamma^2).$$
(2)

3. По СОУ [4]

$$(1+0,5\delta)/(1-0,5\delta)^2 \le 2\gamma[\varepsilon] + [(1+0,5\delta^{(1)})/(1-0,5\delta^{(1)})^2](3)$$

где  $\delta^{(1)} = \{-\gamma + [\gamma^2 - 0.25(G^2/[n_T]^2 - 1)]^{1/2}\}/(0.25G/[n_T]).$ 

Здесь  $\delta$  — овальность;  $\delta = 2(D_{\text{max}} - D_{\text{min}})/(D_{\text{max}} + D_{\text{min}}); D_{\text{max}}, D_{\text{min}}$  — максимальные и минимальные значения диаметра; G — степень нагруженности конструкции;  $G = \sigma/[\sigma]; \sigma$  — напряжения в оболочке с овальностью  $\delta = 0; [\sigma]$  допускаемые напряжения; у — относительный радиус обечайки,  $\gamma = D/(2S)$ ; D, S — средний диаметр и толщина стенки обечайки;  $\eta = [\sigma]/E; E$  — модуль Юнга;  $[\varepsilon]$  — допускаемые деформации;  $[n_{\tau}]$  — запас прочности по пределу текучести.

Приведенные зависимости позволяют получить допускаемые значения параметров в функции от степени нагруженности в интервале  $0.2 \le G \le 1$ , относительного радиуса в интервале  $10 \le \gamma \le 500$ , а также от отношения характеристик материала η, минимальное значение которого в соответствии с ГОСТ Р [5] составляет  $\eta = 6 \cdot 10^{-4}$ . Значение допускаемой деформации принято равным  $[\varepsilon] = 0.01 = 1$  %, что значительно меньше допускаемых деформаций по ДСТУ [6].

Максимальные значения амплитуды циклических напряжений  $\sigma_A^{\max}$  могут быть определены в соответствии с СОУ [4]

$$\sigma_A^{\max} = (0,25E\delta/\gamma) (1,5+0,25\delta)/(1-0,5\delta)^2, \quad (4)$$

что позволяет оценить допускаемое число циклов нагружений [7].

На рис. 1 представлены значения нагруженности и овальности для ряда промышленных сосудов, а также даны результаты расчетов, которые позволяют сделать следующие заключения.

1. Значения допускаемых овальностей возрастают с понижением степени нагруженности и с повышением относительного радиуса. Исключение представляют результаты по РД [2], где допускаемые овальности с ростом относительного радиуса уменьшаются.

2. Во всех случаях значения допускаемой овальности превышают 6,6 % за исключением расчетов по РД [2], по которому овальность при нагруженности G = 1 в точности равна 1 %. Расчеты по РД [2] базируются на двух допущениях: допускаемая овальность при G = 1 в любом слу-

© В. М. Долинский, В. Н. Стогний, В. И. Черемская, 2013

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, №1,2013



Рис. 1. Допускаемые значения овальности цилиндрической обечайки при  $\gamma = 30$  — сплошные линии; при  $\gamma = 100$  — пунктирные; 1, 4 — по РД [2]; 2, 5 — по ГОСТ Р [3]; 3, 6 — по СОУ [4]. Сосуды с овальными обечайками: № 1 — емкость бутана Е-9/1, ПАО «Укртатнафта» ( $\gamma = 160, \delta = 2,5 \%, G = 0,801$ ); № 2 — емкость пропана А-5, ПАО «Укртатнафта», ( $\gamma = 72, \delta = 1,1\%; G = 0,72$ ); № 3 — выпарной аппарат, ПО «Химпром» ( $\gamma = 128, \delta = 1,86 \%, G = 0,48$ ); № 4 — ресивер воздуха, ПО «Краситель» ( $\gamma = 99,0, \delta = 2,16\%, G = 0,540$ ); № 5 — омылитель, ПО «Краситель» ( $\gamma = 60, \delta = 1,4 \%, G = 0,33$ )

чае составляет 1 %; возникновение пластических шарниров на осях овальной обечайки приводит к росту овальности (рис. 2) при дальнейшем росте давления. Многочисленные эксперименты показали ошибочность указанных допущений. Под действием внутреннего давления обечайка рихтуется и исходная овальность  $\delta$  уменьшается до овальности  $\delta^{(1)}$ . Сделанные замечания подтверждаются опытом промышленной эксплуатации сосудов, которые по РД [2] «не проходят», а по ГОСТ Р [3] и СОУ [4] удовлетворяют условию прочности.

3. Условия статической прочности овальных обечаек практически обеспечены, поскольку овальность всегда меньше допускаемой  $\delta < 6,6 \%$ , так как столь большие значения овальности не позволяют обеспечить стыковку обечаек с днищами. При этом расчет по СОУ [4] обнаруживает завышенные запасы прочности, принятые в ГОСТ Р [3].

4. Допускаемое количество циклов нагружений овальных обечаек превышает 10<sup>5</sup>.



Рис. 2. Деформация овальной обечайки под действием внутреннего давления: 1 — ненагруженная обечайка с овальностью  $\delta$ ; 2 — обечайка под давлением P (рихтуется до овальности  $\delta^{(1)}$ ); 3 — обечайка с овальностью  $\delta = 0$ 

Таким образом, существующие значения овальности обечаек не лимитируются условиями прочности корпусов. Этот вывод распространяется на сосуды, изготовленные из углеродистых и низколегированных сталей, определяющей нагрузкой у которых является внутреннее давление. Рекомендации не распространяются на вакуумные сосуды, колонны под действием ветровой и сейсмической нагрузок, гибы трубопроводов. В этих случаях требуется проводить специальные расчеты, учитывающие возможность увеличения овальности при соответствующих нагрузках.

- 1. ДНАОП 0.00-1.07–94. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.
- РД 26-6-87. Сосуды и аппараты стальные. Методы расчета на прочность с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек.
- ГОСТ P52887.11–2007. Нормы и методы расчета на прочность. Метод расчета на прочность обечаек и днищ с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек.
- СОУ ОАО «УкрНИИхиммаш» 011:2010. Сосуды. Аппараты. Трубопроводы. Нормы и методы расчета на прочность. Оценка работоспособности объектов с вмятинами, выпучинами, овальностью и смещением кромок сварных соединений.
- 5. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
- ДСТУ 4003–2000. Сосуды и аппараты. Выбор параметров упрочняющей обработки.
- ГОСТ 25859–83. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках.

Methods allowing evaluation of residual serviceability of the structure in terms of strength are considered. It is shown that not more than 1% envisaged in normative document NPAOP 0.00-1.07-94 (Rules of design and safe service of pressure vessels") is an obviously conservative norm of inadmissible defect level that leads to rejection of serviceable objects. Although the data of calculations by the considered methods do not coincide, calculations to GOST R52857.11-2007. "Vessels and apparatuses. Norms and methods of strength analysis. Method of strength analysis of shells and bottoms allowing for displacement of welded joints edges, angularity and nonroundness of shells" and SOU-011:2010. "Vessels and apparatuses. Norms and methods of strength analysis. Method of calculation of oval vessels with dents. UkrNIIKHIMASH" yield quite close and substantiated results, which can be recommended for application in practical calculations at prediction of residual serviceability of industrial facilities. 7 References, 2 Figures.

Keywords: residual serviceability of a structure, shell ovality, defect level

Поступила в редакцию 24.10.2012

## 20-я Юбилейная международная конференция «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»

(1-5 октября 2012 г. пос. Гурзуф, Крым, Украина)

Ежегодно, в течении 20 лет в начале осени специалисты по неразрушающему контролю из Украины, России, Белоруссии, стран ближнего и дальнего зарубежья собираются в Крыму на Международной конференции и выставке «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики».

Организаторами конференции являются Украинский информационный центр «НАУКА. ТЕХ-НИКА. ТЕХНОЛОГИЯ» (Киев) и ООО НПП «Машиностроение» (Днепропетровск) при содействии Национальных обществ неразрушающего контроля и технической диагностики Украины, России и Белоруссии, а также Днепропетровского национального университета и Института электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины (Киев).

Поддержку конференции оказали МЧТПП «Онико» (генеральный спонсор), ООО НПП «Машиностроение» и ООО «Интрон-СЭТ» (спонсоры), журналы: «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», «Сварщик», «В мире неразрушающего контроля», бюллетень УО НКТД «НК-Информ», сборник ВАК Украины «Системные технологии», сайт УО НКТД: www.usndt.com.ua.

В работе юбилейной конференции приняли участие 150 специалистов: из Украины (119), России (18), Беларуси (1), Болгарии (4), Латвии (2), Литвы (3), Румынии (4), в т.ч. 48 участников конференции представляли промышленные предприятия, 51 – институты АН Украины, вузы, НИИ и КБ, 41 – научно-производственные фирмы, 11 – экспертные и диагностические центры.

Конференцию открыл заместитель председателя правления УО НКТД А.В. Мозговой, в своём докладе отметивший основные итоги конференции, которая за 20 лет, начав с небольшого семинара, проведенного Украинским домом научно-технической пропаганды и Украинским НИИ технологии машиностроения, стала известна не только украинским специалистам, но и получила международное признание.

От имени Болгарского общества неразрушающего контроля участников конференции приветствовал его президент профессор *М.Миховски*.

Всего на конференцию было представлено шесть пленарных, 60 секционных и 32 стендовых докладов, рассмотренных на пленарном заседании, двух секциях, пяти семинарах и круглом столе.

На пленарном заседании были заслушаны следующие доклады: В.А. Троицкий, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. О деятельности украинского общества НКТД и современных тенденциях развития технологий и средств неразрушающего контроля;

*М. Миховски, Й. Мирчев, Ал. Алексиев.* 50 Лет болгарскому обществу неразрушающего контроля;

Назарчук З.Т., Учанін В.М., Рибачук В. Г. ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України. Неруйнівний контроль об'єктів тривалої експлуатації в дослідженнях ФМІ;

Бабак В.П., Назаренко А.О. Институт технической теплофизики АН Украины, Киев. Контроль и автоматизация регулирования теплопотребления;

Неклюдов И.М., Ожигов Л.С., Воеводин В.Н. ННЦ ХФТИ, Харьков. Разработка и внедрение на энергоблоках АЭС современных методов диагностики и контроля металла оборудования и трубопроводов;

Будадин О.Н., ОАО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», Россия. Современные методы и средства неразрушающего контроля сложных конструкций.

На секциях №1 «Диагностика состояния промышленных объектов» и № 2 «Современные методы и средства НК в промышленности» было представлено 12 и 31 доклад соответственно, посвящённых последним результатам исследований и разработок по широкому спектру проблем НК, диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса конструкций; определению физико-механических характеристик материалов, подготовке и сертификации специалистов НК, разработке новых и совершенствованию существующих нормативных документов НКТД и другим актуальным вопросам.

В рамках конференции состоялись также семинар «Неразрушающий контроль элементов подвижного состава железнодорожного транспорта Украины», на котором выступили:

Крюков Д.А., Центр технического аудита Укрзализныци, Киев. Основные направления научно-технической деятельности ГП «Государственный научно-исследовательский центр железнодорожного транспорта Украины»;

*Мягков Б.А.*, ОАО «ВНИИЖТ», Москва. Перспективные методы неразрушающего контроля;

Плохотнюк В.В., ПАО «Кременчугский сталелитейный завод», Кременчуг. Проблемы неразрушающего контроля крупногабаритного литья тележек грузовых вагонов;

#### 🕨 ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

Бородавченко А.В., ГП «Укрспецвагон», пгт. Панютино, Лозовая. Неразрушающий контроль на ГП «Укрспецвагон»;

Хмиль Н.В, Бормотин А.А., ПАО «Днепровский металлургический комбинат», Днепродзержинск; Крюков Д.А, Центр технического аудита Укрзализныци, Киев; Яковец О.И., ПАО «Днепроспецсталь», Запорожье. Предложения по организации системы неразрушающего контроля качества и измерений параметров продукции.

На семинаре были рассмотрены наиболее актуальные вопросы неразрушающего контроля и технической диагностики железнодорожной тематики, в результате чего сформулированы следующие выводы.

1. Не определены методы НК литых деталей тележек грузовых вагонов, дающие полный и достоверный результат при контроле новых и эксплуатируемых изделий. Используемые при плановых ремонтах тележек феррозондовый и магнитопорошковый методы позволяют обнаруживать подповерхностные дефекты и дефекты, выходящие на поверхность. Использование методики акустико-эмиссионного контроля боковых рам и надрессорных балок тележки модели 18-100, проработавших более 30-ти лет на изделиях, проработавших менее 5-ти лет приводит к спорным результатам.

2. Необходимо, с привлечением УО НКТД, ускорить введение трехуровневой сертификации украинских специалистов НК, работающих на железнодорожном транспорте.

3. Продолжить в соответствии с требованиями международных стандартов работы по разработке и внедрению методов, средств и методик контроля остаточных напряжений в железнодорожных колёсах и осях.

Большой интерес участников конференции вызвали доклады, заслушанные в рамках семинара «Контроль технического состояния металла энергооборудования тепловых электростанций в процессе эксплуатации и после наработки паркового ресурса»:

Дмитриев С.Г. Задачи, поставленные перед Лабораториями металлов и сварки (ЛМиС) обособленных предприятий дирекции по генерации электроэнергии (ДТЭК), методы их выполнения и вопросы по новым НТД и технологиям проведения технической диагностики, входному контролю, эксплуатационному контролю и контролю металла энергооборудования после наработки паркового ресурса;

Бабак В.П. НК и диагностика объектов теплоэнергетики с использованием тепловых методов;

*Троицкий В.А.* О планах, мероприятиях и формах сотрудничества ДТЭК с УО НКТД и ИЭС им. Е.О. Патона в области технологий и методик контроля, разработки НТД, участия в конференциях и семинарах, выставках проводимых УО НКТД;

*Дубов А.А.* Обеспечение надежности энергооборудования с использованием метода магнитной памяти металла;

*Недодай С.А.* Опыт эксплуатации измерителя концентрации напряжений на основе МПМ в обнаружении дефектов на пароохладителе перепускной системы НД и трубах НРЧ котла на Зуевской ТЭС;

Мирошников В.В. Разработки Восточноукраинского национального университета им. В.И. Даля по входному контролю труб вихретоковым методом;

*Самойленко А.Ю.* О необходимости ужесточения входного контроля труб, поставляемых для поверхностей нагрева котлов и трубопроводов ТЭС;

Верцанова Е.В. Портативная материалографическая подготовка образцов и исследование материалов в полевых условиях.

В рамках семинара был проведен круглый стол «Роль лаборатории металлов ТЭС в безопасной, безаварийной и надёжной работе энергооборудования».

В результате обсуждения заслушанных докладов участниками были сделаны следующие выводы и предложения:

 – согласиться с мнением ведущих специалистов о необходимости пересмотра действующего в Украине нормативного документа СОУ-Н МПЕ 40.1.17.302:2005 «Ультразвуковий контроль зварних з'єднань елементів котлів, трубопроводів і посудин»;

 инициировать работы по разработке УО НКТД нового НД, включив в него вопросы применения передовых технологий ультразвукового контроля – TOFD, фазированных решеток, дальнодействующего УЗ контроля протяженных объектов направленными волнами и др;

 УО НКТД подготовить программу внедрения новых методов неразрушающего контроля для исследования технологических трубопроводов тепловых электростанций;

 – подготовить вопросы по НК и ТД к Украинскому обществу неразрушающего контроля и технической диагностики;

- ускорить модернизацию оборудования ЛМиС;

 – повысить требования к подрядным организациям, выполняющим контроль металла энергооборудования на ТЭС;

 – одобрить проведение дальнейшего исследования метода магнитной памяти на Зуевской ТЭС, распространить положительный опыт на другие ОП ДТЭК;

 начать разработку украинского нормативного документа о контроле основного металла и сварных соединений на ТЭС Украины с использованием метода магнитной памяти, что позволит повысить достоверность контроля оборудования, исчерпавшего свой ресурс, уменьшить объём работ по зачистке контролируемого металла;

## ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ















Фоторепортаж с конференции

# Портативная система для оперативного рентгеноскопического контроля

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины создан экспериментально-промышленный образец портативной рентгенотелевизионной системы (РТ) с использованием монокристаллического экрана Csl(Tl) и телевизионной камеры на основе высокочувствительной ПЗС-матрицы, благодаря чему появилась реальная возможность для применения рентгеноскопического контроля в полевых условиях с цифровой обработкой результатов контроля без промежуточных носителей информации (типа пленок, полупроводниковых пластин и т.д.).



#### Основные преимуществасистемы:

- высокая производительность и мобильность;
- высокое разрешение и стабильность изображения;
- низкая стоимость контроля;
- возможность контроля движущихся объектов;
- высокоэффективная цифровая обработка изображения;
- возможность архивирования изображений;
- небольшие габариты



Установка аппаратуры на объекте



Наблюдение R-изображения на экране ноутбука

Данная рентгенотелевизионная система обеспечивает чувствительность радиационного контроля около 1,5-2 %, что соответствует чувствительности пленочных систем. Использование данного оборудования снижает почти в 10 раз стоимость рентгеновского контроля металлоконструкций, в том числе трубопроводов.

Контакты: Тел. (044) 200-46-66, Факс (044) 205-31-66, E-mail: ndt@paton.kiev.ua  – рекомендовать ДТЭК рассмотреть накопленный Институтом технической теплофизики НАН Украины опыт, разработанные приборы и методики теплового контроля энергетического оборудования;

 – рекомендовать ДТЭК рассмотреть работы ФМИ им. Г.В. Карпенко НАНУ по созданию действующего комплекса компьютерной диагностической системы;

выполнить работы по тестированию приборов и вихретокового метода контроля труб на Луганской ТЭС (при положительных результатах распространить опыт на другие ОП ДТЭК);

 ускорить работы по наладке акустико-эмиссионного комплекса по контролю металла трубопроводов ГПП на Киевской ТЭС-6, разработанного МДП «Индпром» под руководством отдела технической диагностики ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины.

На семинаре «Об опыте сертификации специалистов НК в соответствии с требованиями международных и национальных стандартов» были представлены доклады:

*А.Г. Юнацкий*, Ассоциация «Укрэксперт», Киев. Об опыте сертификации специалистов НК в соответствии с требованиями международных, национальных стандартов и нормативно-правовых актов по охране труда;

*М. Миховски, Ал. Алексиев, Й. Мирчев,* Болгария. Расширение областей обучения и сертификации персонала по неразрушающему контролю в Болгарии. Обучение в области атомной энергетики и авиации;

Білокур І.П., Гордонна Ю.О., Національний авіаційний університет, Київ. Аналіз мотивації досягнення мети персоналом;

Цечаль В.А., Гарбар О.А., ТК «Спецмонтаж», Киев. Оценка качества сварных соединений объектов, подведомственных Госгорпромнадзору Украины, трубопроводов и металлоконструкций по результатам неразрушающего контроля в соответствии с требованиями нормативно-технических документов.

В ходе обсуждения докладов на семинаре участниками были подняты вопросы о необходимости:

 срочного решения при непосредственном участии УО НКТД вопроса о внедрении нового стандарта ISO 9712:2012 «Неразрушающий контроль. Квалификация и сертификация персонала НК» в Украине;

 обращения к Госгорпромнадзору Украины использовать результаты, полученные В.А. Цечалем по систематизации НТД по контролю объектов повышенной опасности для создания с привлечением УО НКТД соответствующего ведомственного документа.

Был также проведен семинар «Неразрушающий контроль — необходимое звено в системе управления качеством продукции по стандарту ISO 9001».

Отличительной особенностью рассматриваемого в ходе проведения семинара подхода является широкое применение для решения поставленной задачи методов и средств неразрушающего контроля.

И впервые состоялся семинар «Prilimenary experience on NDT of INNOPIPES project partners», на котором выступили участники европейского проекта из Украины, России, Латвии и Румынии.

Тезисы докладов опубликованы в сборнике материалов конференции (электронный вариант), ознакомиться с которым можно в секретариате УО НКТД и в УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ».

На выставке, традиционно сопровождающей конференцию, приняли участие известные фирмы: МЧТПП «Онико», ООО «Промприбор», Ассоциация «ОКО», НПФ «Ультракон», НПФ «Диагностические приборы», НПП «ИНТРОН-СЭТ», НПФ «Ультракон-сервис», ООО «Шерл», Lap GmbH Laser, ЗАО «Аэрокосмоэкология», ФГУП «ВИАМ», ИП «СЖС–Украина», ЗАО «Синтез ЛТД», ПК «ЭТЦ Солар-1», Olympus Moscow, ООО «Энергодиагностика», Spellman High Voltage Electronics Corp., ООО НПО «Дискрет», ООО «Мелитэк-Украина», ЧП «Девайсиз Груп Украина», МПФ «Малад», ОАО «ВНИИЖТ», Международная ассоциация «СВАР-KA», компания General Electric (GE Rus, LLC) и др., представившие участникам конференции современые средства НК и ТД.

Как всегда, желающие имели возможность испытать работу приборов на образцах, ознакомиться с новинками специальной научно-технической литературы.

В рамках конференции состоялось заседание правления Украинского общества НКТД, на котором были заслушаны отчёты о работе правления в 2012 г. и принята программа работы на ближайший период.

Успешному проведению конференции способствовали неповторимая крымская природа, яркое солнце, тёплое Чёрное море, шум волн, прекрасные условия работы и проживания в санатории Ай-Даниль, возможность пообщаться с коллегами вдали от городского шума и суеты.

Ждем вас на 21-й конференции в 2013 г.

А.В.Мозговой, А.Л.Шекеро, З. Ю.Главацкая

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ПРОБЛЕМЫ РЕСУРСА И БЕЗОПАСНОСТ И ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ, СООРУЖЕНИЙ И МАШИН»

<u>22 января 2013 г.</u> в Киеве в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины состоялась научно-техническая конференция, посвященная рассмотрению результатов работ по проектам целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» («Ресурс»), выполненным в 2010–2012 гг.

В работе конференции приняли участие около 200 ученых и специалистов в области сварки и смежных процессов, представляющих научно-исследовательские академические и отраслевые институты и предприятия Украины.

Открыл конференцию заместитель руководителя программы «Ресурс» академик НАН Украины, д-р техн. наук, проф. Л. М. Лобанов. Он рассказал, что нынешняя программа «Ресурс» состояла из девяти разделов, в состав которых входило 97 проектов, в ней участвовало 26 институтов семи отделений НАН Украины. Общие результаты по программе «Ресурс» ранее докладывались и обсуждались на заседании Президиума НАН Украины. На данной конференции были заслушаны доклады руководителей отдельных разделов программы о результатах выполнения проектов.

Раздел 1 «Разработка методологических основ оценки технического состояния и обоснование безопасного срока эксплуатации конструктивных элементов объектов повышенной опасности на территории Украины» (руководитель раздела — академик НАН Украины В. И. Махненко, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины) включал шесть проектов. Известно, что безопасность эксплуатации современных ответственных конструкций длительного времени эксплуатации (трубопроводный транспорт, мосты, газо- и нефтехранилища, корпуса атомных реакторов и т. д.) обеспечивается соответствующими мерами как на стадии



проектирования, так и эксплуатации. Особое значение на второй стадии имеет периодическая плановая оценка остаточного ресурса безопасной эксплуатации таких конструкций. Решению этой важной проблемы и были посвящены проекты этого раздела.

О проектах раздела 2 «Разработка методов и

новых технических устройств неразрушающего контроля и диагностики состояния материалов и объектов длительной эксплуатации» доложил его руководитель академик НАН Украины 3. Т. Назарчук (ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины). В рамках этого раздела выполнено 13 проектов, связанных с разработкой и внедрением методик и технических устройств неразрушающего контроля, диагностики состояния и оценки ресурса объектов длительной эксплуатации на транспорте, в энергетике, нефтехимической промышленности, машиностроении, коммунальном хозяйстве и строительстве. В нем принимали участие пять институтов НАН Украины. Особое внимание было уделено их практическому применению, т. е. внедрению в промышленность.

Проекты раздела 3 были посвящены разработке методов защиты от коррозии элементов конструкций объектов длительной эксплуатации. О результатах этих проектов рассказал заместитель руководителя раздела д-р техн. наук М. С. Хома (ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины). Проблема защиты от коррозии элементов различных конструкций является приоритетной для базовых отраслей промышленности Украины. В стране эксплуатируется более 35 млн т металлических строительных конструкций, введенных в эксплуатацию в 1960-1980 гг. Коррозионное разрушение является одним из основных видов повреждения этих конструкций. По приблизительным оценкам потери от коррозии составляют около 10...15 % всего выплавляемого в стране металла. Особую опасность представляет коррозионно-механическое изнашивание, которое достаточно часто приводит к аварийному выходу из строя трубопроводов, химического и энергетического оборудования и т. д.

В рамках этой программы была решена проблема высокотемпературной коррозии теплообменных поверхностей котлов ТЭЦ за счет нанесения электродуговых покрытий нового типа. Важное народно-хозяйственное значение имеют исследования, направленные на увеличение ресурса железобетонных конструкций промышленных и гражданских сооружений. В одном из проектов раздела разработан новый полиуретановый грунт с высокой адгезией для защиты от коррозии сварных соединений магистральных трубопроводов.

Раздел 4 «Разработка эффективных методов оценки и продления ресурса объектов атомной энергетики» включал 16 проектов. Об основных достижениях, полученных при выполнении этих

#### ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ



проектов, доложил заместитель руководителя раздела чл.-кор. НАН Украины В. Н. Воеводин (ННЦ «Харьковский физико-технический институт»). Итоги работ этого раздела отражают прогресс в мониторинге изменений в материалах и конструкциях энергоблоков АЭС, в развитии методов контроля за процессами старения материалов и переходу к управлению этими процессами. Материаловедческие, технологические и регламентные разработки были направлены на продление ресурса эксплуатации оборудования АЭС, прогнозирования его остаточного ресурса.

В ходе выполнения одного из проектов было показано, что внутрикорпусные устройства ядерных реакторов типа ВВЭР, изготовленные из стали 10Х18Н10Т, подвержены радиационному распуханию, которое является важным фактором, ограничивающим ресурс работы реакторной установки. Полученные данные позволят уточнить создаваемую модель прогнозирования радиационного распухания деталей реактора при эксплуатации с превышением проектного ресурса. Важной задачей является увеличение ресурса эксплуатации твэлов реакторов. Процесс коррозионного разрушения под напряжением циркониевых оболочек твэлов связан с образованием на их внутренней поверхности трещин. Разработана методика, которая позволяет определить значения трещиностойкости циркониевых труб твэлов и обосновать срок их службы. В связи с завершением проектных сроков эксплуатации реакторов ВВЭР в Украине и с учетом более длительных проектных сроков эксплуатации реакторов подобного типа в зарубежных странах принято решение о продлении сроков эксплуатации этих реакторов и в Украине с обязательным мониторингом всех систем, обеспечивающих их безопасность.

В разделе 5 было представлено 13 проектов, которые были посвящены повышению надежности и продлению ресурса энергетического оборудования и систем. В докладе руководителя раздела академика НАН Украины А. А. Долинского были рассмотрены основные достижения по каждому из проектов. В частности, разработана технология и оборудование для увеличения ресурса паровых котлов мощностью до 20 МВт с улучше-



нием теплотехнических и экологических показателей. Интересные результаты получены при выполнении проекта, направленного на разработку путей снижения коррозионного и эрозионного разрушений энергетического оборудования за счет усовершенствования методов подготовки питательной воды.

О семи проектах раздела 6 «Создание систем мониторинга технического состояния трубопроводов и объектов газо- и нефтеперерабатывающей промышленности» рассказал руководитель раздела чл.-кор. НАН Украины А. Я. Красовский (Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины). В ходе выполнения проектов раздела проведена оценка технического состояния и анализ рисков магистральных газопроводов «Уренгой-Помары-Ужгород» и «Прогресс» с целью декларирования их безопасности и продления сроков эксплуатации, разработана методика расчета вероятности коррозионного растрескивания под напряжением участков магистральных трубопроводов, предложена технология формирования клеесварных и металлополимерных муфт с целью повышения работоспособности и продления ресурса действующих трубопроводов.

Раздел 7 «Повышение надежности и продление ресурса мостов, строительных, промышленных и транспортных конструкций» включал 17 научнотехнических проектов. Результаты этих проектов представлял руководитель раздела академик НАН Украины Л. М. Лобанов (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины). Проекты раздела были направлены на разработку методов оценки и средств увеличения длительности безопасной эксплуатации железнодорожных и автодорожных мостов,



#### ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

строительных металлических и железобетонных конструкций, подвижного состава железных дорог и электротранспорта, оборудования металлургических заводов, объектов коммунального хозяйства, агротехники.

Интересные результаты были получены при выполнении проекта, направленного на повышение ресурса медных плит кристаллизаторов МНЛЗ. Разработан процесс нанесения никелевых покрытий на медные панели кристаллизаторов методом наплавки трением с перемешиванием. Исследован также процесс нанесения на эти панели покрытий из никеля, молибдена и хастеллоя методом сварки взрывом. Ряд проектов был направлен на повышение ресурса железнодорожного транспорта, в том числе, рельсового пути, вагонных колес, мостов, грузовых вагонов. Для оптимизации сварочных работ в строительной отрасли разработано мобильное оборудование и технология прессовой стыковой сварки арматуры непосредственно на строительной площадке. С помощью этого оборудования была произведена сварка арматуры диаметром 32 мм при строительстве подъездной эстакады терминала Б аэропорта Борисполь.

Руководитель раздела 8 академик НАН Украины К. А. Ющенко (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины) представил результаты проектов, выполненных в рамках раздела «Разработка технологий ремонта и восстановление элементов конструкций объектов повышенной опасности с целью продления их эксплуатации». Большинство проектов этого раздела было направлено на увеличение ресурса эксплуатации деталей ответственных конструкций за счет применения различных способов наплавки и нанесения покрытий. Ряд проектов был посвящен решению проблемы увеличения долговечности лопаток и других деталей авиационных газотурбинных двигателей. Перспективные результаты получены при выполнении работ по наплавке износостойких биметаллических листов. Из таких листов можно изготавливать различные футеровочные элементы, которые используются для увеличения долговечности различных машин и механизмов в горнорудной и металлургической промышленности.

Два проекта раздела были посвящены разработке расчетных методов оценки усталостной долговечности деталей в процессе эксплуатации и последующего восстановления различными методами, в том числе, наплавкой.

Шесть проектов раздела 9 «Подготовка нормативных документов и научно-технических пособий по вопросам оценки ресурса объектов длительной эксплуатации» условно можно разделить на два подраздела: научно-технические пособия и нормативные документы для инженерной практики. О результатах, полученных в ходе выполнения этих проектов, рассказал руководитель этого раздела программы академик НАН Украины В. В. Панасюк (ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины). За отчетный период было подготовлено два научно-технических пособия: «Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень» и «Концентрація напружень у твердих тілах з вирізами», а также несколько нормативных документов, в том числе, об оценке работоспособности высокопрочных сталей для цельнокатаных железнодорожных колес, а также о реализации ремонтных технологий восстановления работоспособности поврежденных поверхностей железнодорожных колес.

В обсуждении результатов выполнения программы «Ресурс» выступили д-р техн. наук В. Н. Гордеев («Укрстальконструкция»), д-р техн. наук П. И. Кривошеев (ГосНИИ строительных конструкций), д-р техн. наук А. И. Лантух-Лященко (Национальный транспортный университет).

С заключительным словом на конференции выступил вице-президент НАН Украины, академик НАН Украины А. Г. Наумовец. Он отметил высокий научный и практический уровень большинства проектов программы. Украина имеет большой промышленный потенциал, доставшийся ей в «наследство» от Советского Союза. К сожалению, многие промышленные, строительные, транспортные, энергетические объекты исчерпали, или находятся на грани исчерпания своего ресурса и нашим ученым и производственникам необходимо заниматься разработкой мер по продлению их безопасной эксплуатации. Учитывая эти обстоятельства, на Президиуме НАН Украины было принято решение продолжить работы по программе «Ресурс». Предложено также уделить большее внимание выполнению комплексных проектов, направленных на решение важных народно-хозяйственных проблем, необходимо также, чтобы проекты заканчивались практической реализацией. Для проектов подобного уровня допускается увеличение сроков их выполнения до пяти лет.

По результатам работы конференции было принято решение, в котором были отражены основные достижения при выполнении третьего этапа программы «Ресурс» и поставлены задачи на новый период.

Участники конференции имели возможность ознакомиться со сборником научных статей, который был подготовлен по результатам целевой комплексной программы «Ресурс», а также с журнальной и книжной продукцией ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

И. А. Рябцев

## Первая всеукраинская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные тенденции развития приборостроения»

Кафедрой «Приборы» Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля при поддержке Луганского областного отделения Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики 19–20 ноября 2012 г. проведена Первая всеукраинская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные тенденции развития приборостроения».

В конференции приняли участие представители украинских вузов Киева, Харькова, Винницы, Ивано-Франковска, Черкасс, Донецка, Житомира, Симферополя, Львова, Ровно, Алчевска и др.

Тематика докладов охватывала широкий спектр вопросов приборостроения:

 неразрушающий контроль материалов и изделий (магнитный, ультразвуковой, электромагнитноакустический, тепловой, оптический и другие);

 техническая диагностика и мониторинг объектов действующих промышленных предприятий и отдельных технологических процессов (уровня жидкости, расхода газа, реологических свойств жидкостей, повреждений изоляции подземных трубопроводов, сварных швов магистральных трубопроводов, утечки из трубопроводов и т.д.);

 приборы экологического мониторинга параметров окружающей среды (рудничной атмосферы, кислотности почвы, гидрологических параметров речных русел, очищения сточных вод, концентрации планктона в поверхностных водах, биодиагностика и т.д.);

 медико-диагностические и терапевтические приборы и комплексы (электрокардиографы, глюкометры, аппараты ИВЛ, биомедицинская фотометрия, магнитотерапевтическая аппаратура, тонометрия, ульразвуковая диагностика, ЯМРтомография и т.д.);

 моделирование процессов в технических, биомедицинских системах и системах эколо-



Участники конференции

гического мониторинга (LABVIEW, COMSOL MULTIPHYSICS 4.2 и др.);

вопросы технологии приборостроения, связанные с повышением точности и надежности изготовления деталей и узлов приборов (точность нежестких валов, точность обработки корпусных деталей, контроль процесса обработки) и другие.

Всего на конференции было представлено 166 тезисов докладов, в подготовке которых приняли участие 120 студентов, 40 аспирантов и 40 молодых ученых, что свидетельствует о заинтересованности участников и о развитии данного направления в технике.

Большинство докладов носили прикладной характер и подтверждены лабораторными исследованиями, а часть результатов проведенных работ готовы к практическому исполнению и находятся на стадии практической реализации (внедрения) на ряде промышленных предприятий.

Почетными грамотами за лучшие доклады на-граждены:

*– Носова Я.В.* Применение виртуальных тренажеров при подготовке современных биомединженеров (ХНУРЭ);

 Бахов В.А. Поглощения квантового излучения в оптоэлектронных приборах плёночного типа (Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского);

 – Славков В.Н. Фотографічний спосіб моделювання теплових полів об'єктів (НТУ «ХПИ»);

 Соломичев Р.И. Комплексне врахування впливу компонент рудничної атмосфери при розрахунку нижньої концентраційної межі вибуховості вугільного пилу (Дон НТУ);

 – Редько А.А. Використання робастного оцінювання параметрів регресій в прогнозуванні ступеня пошкодження стільникових панелей (НАУ);

*– Турчин Н.В.* Определение параметров выявляемого дефекта с помощью магнитного метода контроля (ВНУ им. В. Даля).

Участники конференции ознакомились с историей и памятными местами г. Луганска, имеющего более 200-летнюю историю.

По результатам конференции сформирован электронный сборник тезисов докладов, а лучшие доклады приняты для опубликования в сборнике научных трудов ВНУ им. В. Даля.

Учитывая проявленный интерес участников и высокий уровень докладов, принято решение о проведении конференции один раз в два года.

В.В. Мирошников

## В Українському товаристві НК і ТД

Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики, Центр сертифікації та Технічний комітет гостандартизації ТК-78 активізували зусилля, спрямовані на запровадження в Україні гармонізованих міжнародних та європейських стандартів, зокрема тих, що підпадають під дію Директив Європейського парламенту:

◆розроблено та подано на експертизу в УкрНДНЦ першу редакцію ДСТУ EN ISO 9712:2012 «Кваліфікація і сертифікація персоналу з неруйнівного контролю»;

◆ розроблено стандарт Українського товариства з неруйнівного контролю та технічної діагности, що встановлює вимоги до позавідомчої сертифікації фахівців НК – СТТУ УТНКТД 01-2013 «Система сертифікації персоналу з НК. Основні положення». Ведеться підготовка до впровадження в якості стандартів УТ НКТД низки стандартів з методів НК, що будуть гармонізовані з відповідними міжнародними.

Центр сертифікації при УТ НКТД здійснює сертифікацію фахівців НК згідно з вимогами міжнародної системи незалежної сертифікації з наступних методів НК:

◆ ультразвуковий контроль ◆ радіаційний контроль ◆ магнітний контроль ◆ капілярний контроль ◆ вихрострумовий контроль ◆ контроль герметичності (за винятком гідравлічних випробувань) ◆ вібродіагностичний контроль ◆ тепловий контроль
 ◆ акустико-емісійний контроль ◆ контроль напружено-деформованого стану ◆ візуальний контроль

Проводяться консультації та семінари за новітніми методами НК:

национальне атентство і акредитації україни змарональниї окана акредитації АТЕСТАТ АКРЕДИТАЦІЇ

♦ метод фазованих антенних решіток (ФАР)

◆ дифракційно-часовий метод ультразвукового контролю (TOFD) ◆ метод направлений ультразвукових хвиль (метод довгих хвиль) ◆ цифрова радіографія та радіографія в режимі реального часу ◆ нейтронна радіографія.

Фахівці товариства з НК та ТД ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України пропонують Вам наступні послуги:

• консультації з питань НК виробів, металоконструкцій, споруд, обладнання та устаткування 🔶 проведення НК виробів, металоконструкцій, споруд, обладнання та устаткування та видача висновку • високоякісна підготовка фахівців НК за одним або кількома методами • проведення сертифікації персоналу на 1-, 2- та 3-й кваліфікаційні рівні • консультації з питань організації роботи випробувальної лабораторії 🔶 консультації з питань дозвільної системи України для відкриття лаборатії НК на об'єктах підвищеної небезпеки • розробка технічної документації Вашої лабораторії 🔶 створення системи якості та розробка процедурних документів Вашої лабораторії 🔶 аналіз документації та обстеження Вашої лабораторії з метою підтвердження її компетентності з метою подальшої акредитації або отримання дозволу • допомогу у виборі та придбанні необхідного обладнання • рекомендації щодо створення фонду нормативної документації з технічного контролю ♦ допоможуть Вам розробити технології, методики чи процедури в галузі НК та ТД.

> IE3 ім. Є.О. Патона НАН України E-mail: office@paton.kiev.ua

Access of the memory 2013 pays access of the memory 2014 pays

2888 perch



ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, №1, 2013

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

#### журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Международный научно-технический и производственный журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» издается Институтом электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины ежеквартально с 1989 г. на русском языке, ISSN 0235-3474, подписной индекс 74475.

Полный перевод на английский язык журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» издается под названием «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» с 2010 г. в Великобритании издательством Cambridge International Science Publishing, ISSN 0955-3835.

В журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» публикуются статьи по всем аспектам технической диагностики и всем методам неразрушающего контроля оборудования, сооружений и механизмов. Все научно-технические и производственные статьи рецензируются.

Публикация статей в журнале бесплатная, гонорар не выплачивается.

1. Стандартный объем статьи 8–10 страниц текста, (включая таблицы, библиографический список, реферат, 5–6 рисунков (объем обзорной статьи может быть увеличен до 12–14 страниц). Текст печатается через 1,5 интервала шрифтом Times New Roman, 12 кегль.

Материал должен быть изложен кратко, без повторений данных, приведенных в таблицах и рисунках, в тексте. На литературу, таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте.

Рисунки не следует перегружать второстепенными данными. Физические единицы и обозначения необходимо давать в Международной системе единиц СИ.

Публикацию статьи ускорит представление ее в электронном виде по электронной почте в формате Word for Windows. Иллюстрации представляются в отдельных файлах в формате \*.tif (300 dpi) для растровой и \*.cdr (600 dpi) для векторной графики.

2. В статье должно быть не более 5 авторов (других, принимавших участие в работе, можно указать в сноске). В сведениях об авторах следует указывать место работы и адрес, должность, ученую степень, электронный адрес и телефон. Кроме того, следует указать почтовый адрес организации на русском и английском языках (лучше взять с официального сайта) и адрес электронной почты организации одного из авторов.

**3**. Статья должна быть дополнена рефератом и ключевыми словами (от 7 до 10). Реферат (объем 1400-1600 знаков с одним пробелом между словами) должен достаточно полно раскрывать содержание статьи. В нем должны быть отражены цели и задачи, методы, результаты, область применения, выводы.

**4**. Каждая статья должна быть снабжена библиографическим списком, включающим не менее 8-10 ссылок (собственные работы авторов должны составлять не более четверти списка; ссылки на источники от 2000 г. обязательны).

Цитируемая в статье литература должна быть оформлена в следующем порядке:

– для книг: фамилия, инициалы автора(ов), полное название, город, издательство, год издания, общее количество страниц;

 – для журнальных статей: фамилия, инициалы автора(ов), название статьи, журнал, год издания, номер, том, номер или выпуск, страницы; иностранные издания приводятся на языке оригинала;

– для статей в сборнике — название статьи, авторы, название сборника, номер выпуска (или тома), место издания, издательство (или издающая организация), страницы начала и конца статьи; для интернет-ссылок: название ресурса, режим доступа.

5. Рукопись статьи должна быть подписана всеми авторами (или одним автором от имени авторского коллектива). К рукописи прилагается лицензионный договор по передаче авторских прав редакции журнала на публикацию статьи. Форма договора на сайте www.paton.kiev.ua или может быть выслана редакцией по электронной почте (по запросу). Несоответствие материалов указанным требованиям (пп. 1-5) может служить поводом для отказа в публикации.

**6**. Авторы статьи получают без оплаты по одному экземпляру сответствующего номера журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» (по запросу).

Редакция журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»: тел.: (38044) 205-23-90, 200-82-77 тел./факс: (38044) 200-54-84, 200-82-77 E-mail: journal@paton.kiev.ua; www.patonpublishinghouse.com; www.rucont.ru

## **ПОДПИСКА** — 2014

#### на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

| Укра         | ина      | Poc          | сия       | Страны дальнего зарубежья |             |  |  |  |  |  |
|--------------|----------|--------------|-----------|---------------------------|-------------|--|--|--|--|--|
| на полугодие | на год   | на полугодие | на год    | на полугодие              | на год      |  |  |  |  |  |
| 160 грн.     | 320 грн. | 900 руб.     | 1800 руб. | 30 дол. США               | 60 дол. США |  |  |  |  |  |
| _            |          |              |           |                           |             |  |  |  |  |  |

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Подписку на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств «Пресса». «Идея», «Саммит», «Прессцентр», «Информнаука», «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).





Подписка на электронную версию журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» на сайте: http://www.rucont.ru.

По подписке доступны выпуски журнала, начиная с 2009 г. в формате \*.pdf. Подписка возможна на отдельные выпуски и на весь архив, включающий все выпуски за 2009-2012 гг. и на выпуски 2013 г.

#### РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

#### Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

• Первая страница обложки (190×190 мм)

• Вторая, третья и четвертая

страницы обложки (200×290 мм) • Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200×290 мм)

- Вклейка А4 (200×290 мм)
- Разворот АЗ (400×290 мм)
- 0,5 A4 (185×130 мм)
- 0,25 A4 (90×130 мм)

#### Технические требования к рекламным материалам

• Размер журнала после обрези 200×290 мм

#### Контакты:

Тел./факс: (38044) 205-23-90; 200-54-84 E-mail: journal@paton.kiev.ua

• В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации Все файлы в формате ІВМ РС

- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0

 Изображения в формате TIFF, цветовая модель СМҮК, разрешение 300 dpi

#### Стоимость рекламы и оплата

• Цена договорная

• По вопросам стоимости размещения рекламы, свободной площади и сроков публикации просьба обращаться в редакцию

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу

• Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок

- Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади
- Публикуется только профильная реклама (сварка и родственные технологии)

• Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24 + 4 цв. вклейки. © Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2013

03142, г. Киев, просп. Академика Вернадского, 34/1.

Печать ООО «Фирма «Эссе».

Подписано к печати 06.03.2013. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, №1,2013