

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.),
И. П. Белокур, Ю. К. Бондаренко,
В. Л. Венгринович, Э. Ф. Гарф,
А. А. Грузд, Ю. Б. Дробот,
Н. Н. Зацепин, В. И. Иванов,
О. М. Карпаш, В. В. Клюев,
Л. М. Лобанов, А. А. Лебедев,
В. К. Лебедев, Г. Г. Луценко,
Н. В. Новиков, Е. С. Переверзев,
П. П. Прохоренко, В. П. Радько,
В. Н. Учанин, А. А. Улитко,
А. И. Степаненко,
В. А. Стрижало, А. Я. Тетерко,
Т. М. Швец, И. Я. Шевченко

Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150,
ул.Боженко, 11

Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины
Тел.: (044) 271-23-90,
Факс: (044) 528-34-84, 529-26-23
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Научные редакторы

Н. Г. Белый, А. А. Грузд

Электронная верстка

Л. Н. Герасименко,
И. Р. Наумова, И. С. Баташева

Свидетельство
о государственной регистрации
КВ 4787 от 09.01.2001

Журнал входит в перечень
утвержденных ВАК Украины
изданий для публикации трудов
соискателей ученых степеней

При перепечатке материалов
ссылка на журнал обязательна

За содержание рекламных
материалов редакция журнала
ответственности не несет

Цена договорная

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

<i>НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А., ВОЛОШКЕВИЧ И. Г.</i> О волнах Рэлея в пластинах ограниченной толщины	3
<i>ФОМИЧЕВ С. К., МИНАКОВ С. Н., КОЧУБЕЙ В. В., ЯРЕМЕНКО М. А., МИХАЛКО С. В., ДАНИЛЬЧИК А. В., КАРПЕНКО П. О.</i> Пятиуровневая модульная система мониторинга механических напряжений в трубопроводах, сосудах под давлением, хранилищах, резервуарах магнитоанизотропным методом	9
<i>ДЯДИН В. П., ДАВЫДОВ Е. А., ЛИТВИНЕНКО А. Е.</i> Оценка внутреннего давления в низкотемпературной пластической сероводородной несплошности в зависимости от ее высоты и геометрических размеров	16
<i>ВИТРУК Ю. В., ЕРЕМЕНКО В. С.</i> Особенности применения преобразования Фурье для диагностики композиционных материалов методом свободных колебаний	24

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

<i>ТРОИЦКИЙ В. А., ПОСЫПАЙКО Ю. Н., ШЕВЧЕНКО И. Я., КАРАМЗИН В. И., КОСТЕНКО Г. Е., ЛАЗАРЕНКО А. И.</i> Неразрушающий контроль сварных соединений внутреннего резервуара изотермического хранилища жидкого аммиака в «Северодонецком объединении АЗОТ»	27
<i>УЧАНИН В. Н.</i> Вихретоковые мультитифференциальные преобразователи и их применение	34
<i>БЕЗЛЮДЬКО Г. Я., ВОЛОХОВ С. А., СОЛОМАХА Р. Н.</i> Изменение магнитного состояния металла стальной конструкции при механических воздействиях	42
<i>ПРОТАСОВ А. Г., ЮРЧЕНКО А. С.</i> Влияние параметров сотовой конструкции на выявляемость дефектов при контроле импедансным методом	48
<i>ДОЛИНСКИЙ В. М., ЧЕРЕМСКАЯ В. И., БЕРЕСТОВ Д. И., КРАВЕЦ М. В.</i> Оценка работоспособности сосудов с вмятинами и выпучинами	52

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

4-я конференция — «Организация неразрушающего контроля качества продукции в промышленности»	55
П'ята науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи»	56
Международные специализированные выставки	57
Учебно-методические плакаты по неразрушающему контролю	60

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

Технический комитет по стандартизации "Техническая диагностика и неразрушающий контроль" ТКУ-78



Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

TECHNICAL DIAGNOSTICS and NON-DESTRUCTIVE TESTING

№ 3, 2006

Founded in January, 1989

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

Publisher: *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.),
I. P. Belokur, Yu. K. Bondarenko,
V. L. Vengrinovich, E. F. Garf,
A. A. Gruzd, Yu. B. Drobot,
V. I. Ivanov, O. M. Karpash,
V. V. Klyuev, L. M. Lobanov,
A. A. Lebedev, V. K. Lebedev,
G. G. Lutsenko, N. V. Novikov,
E. S. Pereverzev,
P. P. Prokhorenko, V. P. Radko,
I. Ya. Shevchenko,
A. I. Stepanenko, V. A. Strizhalo,
A. Ya. Teterko, V. N. Uchanin,
A. F. Uliitko, T. M. Shvets,
N. N. Zatsepin,
A. V. Shimanovsky

Address:

The E. O. Paton Electric
Welding Institute
of the NAS of Ukraine,
11 Bozhenko str., 03680,
Kyiv, Ukraine
Tel.: (044) 271-23-90,
Fax: (044) 528-34-84, 529-26-23
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Scientific editors:

N. G. Bely, A. A. Gruzd

Electron galley:

I. R. Naumova, L. N. Gerasimenko,
I. S. Batasheva

State Registration Certificate
KV 4787 of 09.01.2001

All rights reserved.
This publication and
each of the articles
contained here in are
protected by copyright.
Permission to reproduce material
contained in this journal
must be obtained
in writing from the Publisher.

CONTENTS

TECHNICAL DIAGNOSTICS

- NEDOSEKA A. YA., NEDOSEKA S. A., VOLOSHKEVICH I. G.* On Ra-
leigh waves in plates of a limited thickness 3
*FOMICHEV S. K., MINAKOV S. N., KOCHUBEJ V. V., YAREMENKO
M. A., MIKHALKO S. V., DANILCHIK A. V., KARPENKO P. O.* Five-
level modular system of monitoring mechanical stresses in pipeli-
nes, pressure vessels, storages, and tanks by the magneto-anisot-
ropic method 9
DYADIN V. P., DAVYDOV E. A., LITVINENKO A. E. Evaluation of inter-
nal pressure in the low-temperature plastic hydrogen sulphide dis-
continuity, depending on its height and geometrical dimensions 16
VITRUK YU. V., EREMENKO V. S. Features of application of Fourier
transform for diagnostics of composite materials by the free vibrati-
on method 24

NON-DESTRUCTIVE TESTING

- TROITSKY V. A., POSYPAIKO YU. N., SHEVCHENKO I. YA., KARAM-
ZIN V. I., KOSTENKO G. E., LAZARENKO A. I.* Non-destructive tes-
ting of welded joints of the inner tank of liquid ammonia isothermal
storage in «Severodonetsk Objedinenie AZOT» 27
UCHANIN V. N. Eddy current multidifferential transducers and their
application 34
BEZLYUDKO G. YA., VOLOKHOV S. A., SOLOMAKHA R. N. Change
of the magnetic condition of a steel structure metal at mechanical
impact 42
PROTASOV A. G., YURCHENKO A. S. Influence of the honeycomb
structure parameters on defect detectability at testing by the impe-
dance method 48
*DOLINSKIY V. M., CHEREMSKAY V. I., BERESTOV D. I.,
KRAVETS M. V.* Evaluation of performance of vessels with
dents and bulges 52

NEWS AND INFORMATION

- 4th Conference «Organization of Non-Destructive Testing of Pro-
duct Quality in Industry» 55
5th Scientific-Technical Conference «Instrument making: status and
prospects» 56
International specialized exhibitions 57
Training-methodological posters on NDT 60

Concerning publication of articles, subscription and advertising, please, contact the editorial board



О ВОЛНАХ РЭЛЕЯ В ПЛАСТИНАХ ОГРАНИЧЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

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

Рассмотрены вопросы формирования и распространения в пластинах ограниченной толщины волн, перемещающихся со скоростью, меньшей C_2 . Такие волны используют при регистрации сигналов акустической эмиссии специальной аппаратурой с целью оценки состояния материалов конструкций при их эксплуатации. Показано, что в пластинах, как и в полупространстве, формируется и распространяется с такой скоростью одна волна, параметры которой зависят от толщины пластины и расположения источника излучения. Формирование волны происходит в пределах заданной толщины пластины, а ее спектр ограничивается по нижнему пределу суммирования пакета элементарных волн.

The paper deals with the issues of generation and propagation of waves traveling at a velocity below C_2 , in plates of a limited thickness. Such waves are used in recording of the acoustic emission signals by special hardware for evaluation of the condition of structure material in operation. It is shown that in plates, similar to half-spaces, one wave forms and propagates at such a velocity, its parameters depending on the plate thickness and radiation source location. The wave forms within the specified plate thickness, and its spectrum is limited by the lower limit of summation of the elementary wave packet.

Существование волн Рэлея доказано для полупространства. Для пластины это случай, когда ее толщина равна бесконечности. Однако на практике таких тел не существует. Все тела типа пластин ограничены с двух сторон, какой бы ни была их толщина. В связи с этим возникает вопрос о существовании волн Рэлея в тонких и толстых пластинах. Ниже мы покажем, что волны, двигающиеся со скоростями $C_\alpha < C_2$, состоят из пакета элементарных волн, сумма которых в конечном счете и образует. Физически процесс формирования волн Рэлея можно представить пакетом элементарных волн, которые практически затухают на нижней границе пластины. И уж тем более, пройдя еще раз через пластину при отражении от нижней поверхности, они имеют ничтожно малые амплитуды, которые не влияют на формирующиеся из элементарных волн волны Рэлея. Таким образом, если положить в основу формирования волн Рэлея в пластинах ограниченной толщины принцип суммирования только тех элементарных волн, которые затухают в пределах толщины пластины, то можно получить решение, имеющее практический смысл. Рассмотрим этот вопрос с указанных выше позиций.

Пусть в пластине толщиной δ на глубине z_0 возник сигнал акустической эмиссии (АЭ), вызванный появлением дефекта в виде микровзрыва в элементарном объеме V_0^* с симметричным во всех направлениях движением АЭ волны (рис. 1)*. Величину и характер распределения источника

АЭ представим в виде произведения δ_+ -функций. Тогда уравнения, описывающие распространение упругих волн в пластине, запишем в виде:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \varphi - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} &= \\ &= -\frac{1+\nu}{1-\nu} V_0^* \frac{\delta_+(r)}{2\pi r} \delta_+(z-z_0) \delta(t) \delta_+(\omega_0 - \alpha C_\alpha), \\ \nabla^2 \psi - \frac{1}{C_2^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где φ и ψ — функции из представления Ламэ, определяющие перемещения в пластине; t — время; ν — коэффициент Пуассона; C_1, C_2 — скорости распространения продольной и поперечной волн соответственно; $C_\alpha, \omega_0, \alpha$ — параметры элементарных волн (скорость, частота, волновое число);

$$\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Следует обратить внимание на то, что в первом уравнении системы (1) в правой части присутствует составляющая связи между частотой волны,

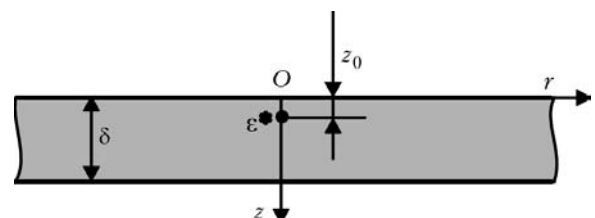


Рис. 1. Элемент пластины с источником АЭ излучения

* Величина изменения объема материала в результате возникновения дефекта может быть представлена сферой радиуса a_1 . Величина a_1 в первом приближении может быть принята равной 10^{-1} см. В этом случае $V_0^* = 4/3\pi a_1^3 = 4,2 \cdot 10^{-3}$ см³.



скоростью ее распространения и волновым числом.

Решим систему (1) в предположении, что тело ограничено с двух сторон и на границе выполнены условия:

$$\sigma_z = \tau_{rz} = 0 \text{ при } z = 0; \delta.$$

При этом начальные условия задачи определяются функцией $\delta_+(t)$, что указывает на то, что при $t = 0$ возник, а при $t = +0$ исчез источник излучения.

Применив cos-преобразование Фурье по времени t (с параметром ω_0) и преобразование Ханкеля по координате r (с параметром α), получим:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \bar{\Phi}}{\partial z^2} - \left(\alpha^2 - \frac{\omega_0^2}{C_1^2} \right) \bar{\Phi} = \\ & = -\frac{1+\nu}{1-\nu} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{V_0^*}{2\pi} \delta_+(z-z_0) \delta_+(\omega_0 - \alpha C_\alpha), \quad (2) \\ & \frac{\partial^2 \bar{\Psi}}{\partial z^2} - \left(\alpha^2 - \frac{\omega_0^2}{C_2^2} \right) \bar{\Psi} = 0. \end{aligned}$$

При $z = 0; \delta$ граничные условия примут вид

$$\begin{aligned} & \frac{1}{G} \bar{\tau}_{rz} = 2 \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial z} + \frac{\partial^2 \bar{\Phi}}{\partial z^2} + \alpha^2 \bar{\Psi} = 0, \quad (3) \\ & \frac{1}{G} \bar{\sigma}_z = \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) \bar{\Phi} - \alpha^2 \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial z} = 0. \end{aligned}$$

Решение граничной задачи (2), (3) будем искать в виде

$$\begin{aligned} \bar{\Phi} &= C \exp(z\beta_1) + \frac{P_1}{\beta_1} \exp(-|z-z_0|\beta_1), \\ \bar{\Psi} &= A \exp(-z\beta_2) + B \exp(z\beta_2), \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$P_1 = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0^*}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \delta_+(\omega_0 - \alpha C_\alpha);$$

$$\beta_1 = \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2/C_1^2}; \quad \beta_2 = \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2/C_2^2}.$$

Подставив (4) в (3), приходим к системе алгебраических уравнений для определения постоянных A, B, C и соотношения между ω_0, α и C_α :

$$\begin{aligned} A(\alpha^2 + \beta_2^2) + B(\alpha^2 + \beta_2^2) + C \cdot 2\beta_1 &= -2P_1 \exp(-z_0\beta_1), \\ A(\alpha^2 + \beta_2^2) \exp(-\delta\beta_2) + B(\alpha^2 + \beta_2^2) \exp(\delta\beta_2) + \\ + C \cdot 2\beta_1 \exp(\delta\beta_1) &= 2P_1 \exp[-(\delta - z_0)\beta_1], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A\alpha^2\beta_2 + B(-\alpha^2\beta_2) + C \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) &= \\ = -\frac{P_1}{\beta_1} \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) \exp(-z_0\beta_1), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A\alpha^2\beta_2 \exp(-\delta\beta_2) + B(-\alpha^2\beta_2) \exp(\delta\beta_2) + \\ + C \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) \exp(\delta\beta_1) &= \\ = -\frac{P_1}{\beta_1} \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) \exp[-(\delta - z_0)\beta_1], \end{aligned} \quad (5)$$

Решив систему первых трех уравнений (5) относительно A, B, C и проинтегрировав по ω_0 в пределах от 0 до бесконечности для выхода из cos-преобразования Фурье, получим:

$$A = \Delta_A/\Delta; \quad B = \Delta_B/\Delta; \quad C = \Delta_C/\Delta, \quad (5a)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta_A &= -2P_0\alpha^4 \text{ch}[-\alpha\gamma_1(\delta - z_0)] [4\gamma_1\gamma_2 - (1 + \gamma_2^2)^2]; \\ \Delta_B &= -2P_0\alpha^4 \text{ch}[-\alpha\gamma_1(\delta - z_0)] [4\gamma_1\gamma_2 + (1 + \gamma_2^2)^2]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_C &= \frac{P_0\alpha^5}{\gamma_1} (1 + \gamma_2^2)^3 \text{sh}(\alpha\gamma_2\delta) \exp(-\alpha\gamma_1 z_0) + \\ &+ 4P_0\alpha^5 \gamma_2 (1 + \gamma_2^2) \exp(-\alpha\gamma_1 z_0) \text{ch}(\alpha\gamma_2\delta) + \\ &+ 4P_0\alpha^5 \gamma_2 (1 + \gamma_2^2) \exp[-\alpha\gamma_1(\delta - z_0)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta &= -\alpha^6 (1 + \gamma_2^2)^3 \text{sh}(\alpha\gamma_2\delta) - 4\alpha^6 \gamma_1 \gamma_2 (1 + \gamma_2^2) \times \\ &\times \text{ch}(\alpha\gamma_2\delta) + 4\alpha^6 \gamma_1 \gamma_2 (1 + \gamma_2^2) \exp(\alpha\gamma_1\delta), \end{aligned}$$

$$\gamma_1 = \sqrt{1 - \frac{C_\alpha^2}{C_1^2}}; \quad \gamma_2 = \sqrt{1 - \frac{C_\alpha^2}{C_2^2}};$$

$$P_0 = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0^*}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{2\pi}}.$$

Четвертое уравнение системы (5) обеспечивает выполнение четвертого граничного условия и определяет отношение между волновыми числами α , скоростями движения элементарных волн C_α и их частотными характеристиками ω_0 . Это так называемое спектральное уравнение пластины или уравнение существования тех или иных волн.

Выполнив обратное преобразование по ω_0 в четвертом уравнении системы (5), получим следующее спектральное уравнение:



$$\begin{aligned}
 & -\frac{\alpha^2}{2} (1 + \gamma_2^2) C \exp(\alpha \delta \gamma_1) + \\
 & + \alpha^3 \gamma_2 [A \exp(-\alpha \delta \gamma_2) - B \exp(\alpha \delta \gamma_2)] - \\
 & - \frac{P_0 \alpha}{2 \gamma_1} (1 + \gamma_2^2) \exp[-\alpha(\delta - z_0) \gamma_1] = 0.
 \end{aligned}$$

После подстановки значений коэффициентов A, B, C для отыскания зависимости между α и C_α/C_2 получим уравнение:

$$\begin{aligned}
 & \frac{2\gamma_2}{\Delta_1} \operatorname{ch}[\alpha \gamma_1(\delta - z_0)] \{[(1 + \gamma_2^2)^2 - 4\gamma_1 \gamma_2] \exp(-\alpha \gamma_2 \delta) + \\
 & + [(1 + \gamma_2^2)^2 + 4\gamma_1 \gamma_2] \exp(\alpha \gamma_2 \delta)\} - \\
 & - \frac{1}{2\Delta_1} \left\{ \frac{1}{\gamma_1} (1 + \gamma_2^2)^4 \exp[\alpha \gamma_1(\delta - z_0)] \operatorname{sh}(\alpha \gamma_2 \delta) + \right. \\
 & + 4\gamma_2(1 + \gamma_2^2)^2 \exp[\alpha \gamma_1(\delta - z_0)] \operatorname{ch}(\alpha \gamma_2 \delta) + \\
 & + 4\gamma_2(1 + \gamma_2^2)^2 \exp(\alpha \gamma_1 z_0)\} - \\
 & - \frac{1}{2\gamma_1} (1 + \gamma_2^2) \exp[-\alpha \gamma_1(\delta - z_0)] = 0, \quad (6)
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 \Delta_1 = & -(1 + \gamma_2^2)^3 \operatorname{sh}(\alpha \gamma_2 \delta) - \\
 & - 4\gamma_1 \gamma_2 (1 + \gamma_2^2) [\operatorname{ch}(\alpha \gamma_2 \delta) - \exp(\alpha \gamma_1 \delta)].
 \end{aligned}$$

Расчет корней уравнения (6) был выполнен численным способом с использованием вычислительной техники. Результаты расчета представлены на рис. 2. Из графика следует, что в физических телах, ограниченных с двух сторон плоскостями, в отличие от полупространства, формирующаяся волна в пластине толщиной, например, 1 см состоит из пакета элементарных волн, двигающихся с переменными от $0,09C_2$ до $0,927C_2$ скоростями в диапазоне волновых чисел $0,01 \dots 5 \text{ см}^{-1}$. В диапазоне волновых чисел от 5 см^{-1} до бесконечности скорость распространения волн пакета одинакова и равна $0,927C_2$. Чем больше толщина пластины, тем ближе к оси ординат значения скорости классической волны Рэлея, равной $0,927C_2$. На рис. 2 показано постепенное с увеличением толщины пластины приближение к оси ординат точки со значением отношения C_α/C_2 равным $0,927$, соответствующим волне Рэлея для очень толстых пластин.

Устремив в спектральном уравнении (6) δ к бесконечности и проведя несложные преобразования, получим более простое уравнение существования и скорости распространения волны в пластинах большой толщины:

$$4\gamma_1 \gamma_2 - (1 + \gamma_2^2)^2 = 0. \quad (7)$$

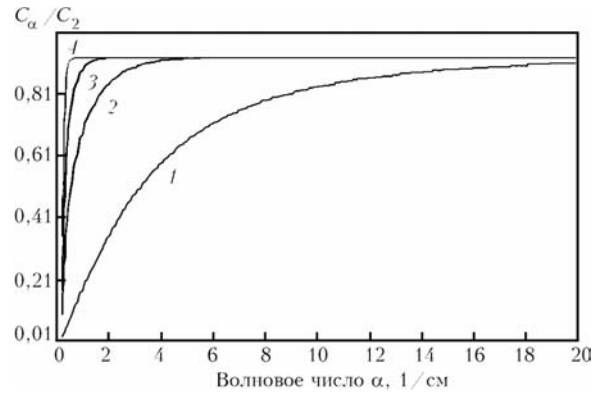


Рис. 2. Численное решение уравнения (6) при δ , равных, см: 0,4 (1); 1,0 (2); 2,6 (3); 10,0 (4)

Подставляя C_1^2 из соотношения $\frac{C_2^2}{C_1^2} = \frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}$ в

γ_1 , при $\nu = 0,3$ получаем $\gamma_1 = \sqrt{1 - 0,286 C_\alpha^2 / C_2^2}$. Решая уравнение (7), получаем скорость распространяющейся волны для пластины, толщина которой стремится к бесконечности. Эта скорость равна $0,927C_2$ и в отличие от тонких пластин постоянна во всем диапазоне волновых чисел от 0 до бесконечности.

Определим теперь перемещения поверхности пластины. В терминах φ и ψ перемещение w выражается следующим образом:

$$\bar{w}(z) = \partial \bar{\varphi} / \partial \bar{z} + \alpha^2 \bar{\varphi}.$$

Используя первое соотношение (4), перепишем эту формулу в таком виде:

$$\begin{aligned}
 \bar{w}(z) = & \beta_1 C \exp(z\beta_1) + P_1 \exp[-(z_0 - z)\beta_1] + \\
 & + \alpha^2 [A \exp(-z\beta_2) + B \exp(z\beta_2)] \text{ при } z \leq z_0, \quad (8)
 \end{aligned}$$

где, как и ранее,

$$P_1 = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \frac{V_0^*}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \delta_+(\omega_0 - \alpha C_\alpha).$$

Применив обратные преобразования cos-Фурье и Ханкеля к выражению (8), при $z = 0$ получим:

$$\begin{aligned}
 w = & \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty \alpha [\alpha \gamma_1 C + P_0 \exp(-\alpha \gamma_1 z_0) + \alpha^2 (A + B)] \times \\
 & \times J_0(\alpha r) [\cos(\alpha C_\alpha t) - 1] d\alpha. \quad (9)
 \end{aligned}$$

Величину перемещений w на поверхности пластины ($z = 0$) определим после подстановки значений коэффициентов A, B и C в выражение (9) и выполнения интегрирования в указанных пределах. На рис. 3 (см. цв. вклейку) представлены перемещения поверхности пластин толщиной 0,4 см; 1 см и 2,6 см в моменты времени $t = 32 \text{ мкс}$ и 160 мкс от начала излучения.



Следует отметить, что уравнение (6) в промежулке скоростей волн от 0 до C_2 в пластинах большой толщины допускает существование одной волны, распространяющейся со скоростью $C_3 = 0,927C_2$. Тогда, с учетом сказанного при больших значениях $\alpha\gamma_1\delta$ выражение (9) может быть переписано:

$$w \approx -\frac{1+v}{1-v} \frac{V_0^*}{2\pi^2} \frac{1-\gamma_2^2}{1+\gamma_2^2} \times \int_{\alpha_n}^{\infty} \alpha \exp(-\alpha\gamma_1 z_0) J_0(\alpha r) [\cos(\alpha C_3 t) - 1] d\alpha. \quad (10)$$

Как видно из этой формулы, интегрирование ограничено с нижней стороны величиной предельного значения волнового числа α_n , при котором скорость распространения волны достигает расчетной величины $0,927C_2$. Если положить толщину пластины равной бесконечности (на практике больше 2,5 см), то нижний предел интегрирования можно принять равным 0. Тогда в пределах от 0 до бесконечности в формуле (10) может быть выполнено интегрирование:

$$w = \frac{1+v}{1-v} \frac{V_0^*}{2\pi^2} \frac{1-\gamma_2^2}{1+\gamma_2^2} \left\{ \frac{\gamma_1 z_0}{((\gamma_1 z_0)^2 + r^2)^{3/2}} - \frac{\sqrt{(\gamma_1 z_0)^2 + (C_3 t)^2}}{[(\gamma_1 z_0)^2 - (C_3 t)^2 + r^2]^2 + (2\gamma_1 z_0 C_3 t)^2} \right\}^{3/4} \times \cos \left\{ \arctg \left(\frac{C_3 t}{\gamma_1 z_0} \right) - \frac{3}{2} \arctg \left[\frac{2\gamma_1 z_0 C_3 t}{(\gamma_1 z_0)^3 - (C_3 t)^2 + r^2} \right] \right\}, \quad (11)$$

где

$$\gamma_1 = \sqrt{1 - \frac{C_3^2}{C_1^2}}; \quad \gamma_2 = \sqrt{1 - \frac{C_3^2}{C_2^2}}; \quad C_3 = 0,927C_2.$$

На рис. 4 представлена предельная волна, подсчитанная по формуле (11) (волна Рэлея), распро-

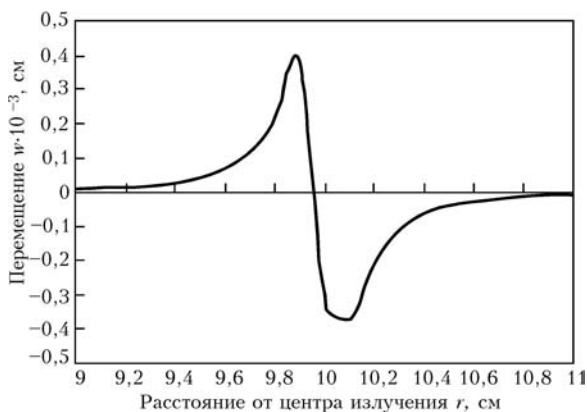


Рис. 4. Перемещение поверхности полупространства w , вызванное волной Рэлея ($C_3/C_2 = 0,927$) в момент, когда $C_3 t = 10$ см

страняющаяся в полупространстве, когда можно принять $\delta = \infty$.

Ометим, что в формуле (9) каждая элементарная волна определяется своей скоростью распространения и своим предельным волновым числом α . Таким образом, в общем случае расчет волн осуществляется по одной и той же формуле (9), но при разных значениях скоростей и волновых чисел.

С увеличением толщины пластины происходит изменение формы сигнала акустической эмиссии. Из многопикового, например, в пластине толщиной 0,4 см, он постепенно с увеличением толщины пластины приобретает классическую форму импульса для полупространства. Это видно из рис. 3, где представлены АЭ сигналы в пластинах толщиной 0,4 см, 1 см и 2,6 см. Видно, что уже в пластине толщиной 1 см АЭ сигнал становится близким к импульсу. Сигнал в пластине толщиной более 2,6 см можно считать предельным переходом для сигналов в полупространстве. При этом в расчетах перемещений поверхности пластины можно с достаточной для практических целей точностью применять формулу (11). На рис. 3 также видно, что с увеличением времени с момента возникновения АЭ сигнала его параметры существенно изменяются по мере перемещения волны. Особенно заметным становится уменьшение амплитуды. Это необходимо учитывать при назначении расстояния между АЭ датчиками при проектировании схемы их расстановки на объектах контроля.

Следует также обратить внимание на особенность АЭ сигнала, поступающего в измерительный прибор. Параметры сигнала на входе в измерительный прибор в сильной мере зависят от полосы частот, которую пропускают АЭ датчики и собственно измерительный прибор. На рис. 5 (см. цв. вклейку) показаны сигналы АЭ, отфильтрованные датчиками с полосой пропускания 50...500 кГц и 300...400 кГц. На рис. 4 представлен сигнал, полученный в полном спектре для пластин толщиной более 2,6 см. Сравнивая графики рис. 4 и 5, можно видеть, что сигналы отличаются. Эти особенности необходимо учитывать при проектировании АЭ датчиков и измерительных приборов.

Особенно существенное отличие имеют сигналы акустической эмиссии, прошедшие через узкополосные фильтры. На графике рис. 6 (см. цв. вклейку) в качестве примера показан АЭ сигнал в пластине толщиной 0,4 см после фильтрации в диапазоне 10 кГц (155 ± 5 кГц). Как видно из рисунка, сигнал в этом случае резко отличается от показанного на рис. 4 и 5 и имеет простую близкую к затухающей синусоиде форму. Работа с такой формой сигнала при расчете координат ис-



точников АЭ требует сложных конструктивных и программных средств.

Анализируя уравнение (6), нетрудно видеть, что оно имеет строгое решение в случае, если $\alpha\gamma_1\delta = \infty$, т. е. в двух предельных случаях: 1) при $\alpha = \infty$; 2) при $\delta = \infty$.

В первом случае волны в пластине отсутствуют, так как интегрирование по α в формуле (9) осуществляется в пределах от ∞ до ∞ . Второй случай, как было показано выше, представляет полупространство. Распространяющаяся волна w не зависит от спектрального числа α , имеет скорость движения C_3 и определяется из формулы (6) предельным переходом $\delta \rightarrow \infty$.

Следует отметить неопределенность понятия бесконечности в технических расчетах. Как правило, все физические величины, рассматриваемые в технических расчетах, конечны, и лишь с определенными допущениями к ним можно применить понятие бесконечности. Анализируя выражение (6), можно заметить, что все коэффициенты при сгруппированных членах есть функции, достигающие нуля или бесконечности при стремлении аргумента к бесконечности. Так, при стремлении толщины пластины к бесконечности получаем полупространство. Но что такое полупространство для технической задачи? Очень толстая пластина или пластина средней толщины? На этот вопрос трудно ответить.

Учитывая изложенное, попробуем объяснить некоторые процессы распространения волн в пластинах, исходя из физических соображений. Формула (9) представляет распространяющуюся волну как сумму элементарных волн, описываемых подынтегральной функцией. Элементарные волны, входящие в сумму, отличаются длиной волны, частотой и амплитудой. Таким образом, не все волны из пакета доходят до нижней границы пластины. Волны, не дошедшие до нижней границы, будут удовлетворять условиям псевдобесконечности по толщине, составляя в сумме волну, распространяющуюся по верхней поверхности пластины. Учитывая, что к таким волнам будут относиться более короткие волны, то пакет волн в выражении (9) будет усечен с нижней стороны (по нижнему пределу интегрирования).

Итак, для больших значений $\alpha\gamma_1\delta$ мы упростили формулу (9). Величина нижнего предела интегрирования в (10) α_n — это значение волнового числа, при котором при заданной толщине пластины обеспечивается нуль в спектральном уравнении (6). Перемещение наружной поверхности пластин складывается из двух составляющих: в направлении оси z — составляющая w , вызванная поперечными волнами, и в направлении оси r — составляющая u , вызванная действием продольной волны. Можно показать, что второй составляющей

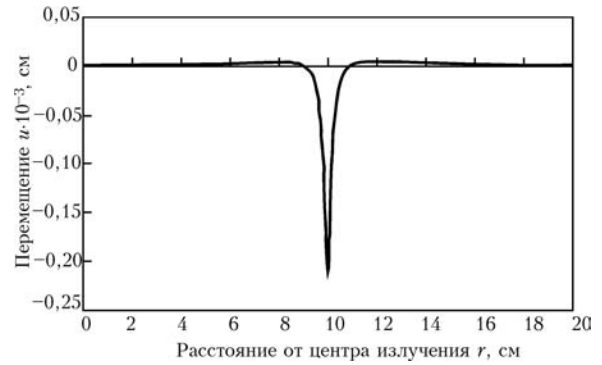


Рис. 7. Перемещение u верхней поверхности толстой пластины ($z=0$), вызванное действием продольной волны (формула (13))

для волн, двигающихся со скоростями менее C_2 , можно пренебречь из-за ее малости по сравнению с первой. Так, если продольные перемещения в пластине от действия мгновенного источника излучения в преобразованном виде можно записать как

$$\bar{u} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\bar{\Phi} + \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial z} \right),$$

то формула для определения перемещений u верхней поверхности пластины в направлении оси r может быть записана в виде:

$$u = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_{\alpha_n}^{\infty} \alpha^2 \left[C + \frac{P_0}{\alpha\gamma_1} \exp(-\alpha\gamma_1 z_0) - \alpha\gamma_2(A - B) \right] \times [\cos(\alpha C_3 t) - 1] J_1(\alpha r) d\alpha, \quad (12)$$

а для пластин с большими значениями $\alpha\gamma_1\delta$ после подстановки значений коэффициентов A , B и C получим:

$$u = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \frac{V_0^*}{2\pi^2} \frac{1 - \gamma_2^2}{2\gamma_1} \times \int_{\alpha_n}^{\infty} \alpha J_1(\alpha r) [\cos(\alpha C_3 t) - 1] \exp(-\alpha\gamma_1 z_0) d\alpha.$$

После интегрирования этого выражения в пределах от нуля до бесконечности получим:

$$u = -\frac{1 + \nu}{1 - \nu} \frac{V_0^*}{2\pi^2} \frac{1 - \gamma_2^2}{2\gamma_1} \left\{ \frac{r}{[(\gamma_1 z_0)^2 + r^2]^{3/2}} - \frac{r \cos\left[\frac{3}{2} \arctg \frac{2\gamma_1 z_0 C_3 t}{(\gamma_1 z_0)^2 + r^2 - (C_3 t)^2}\right]}{[(\gamma_1 z_0)^2 + r^2 - (C_3 t)^2]^2 + (2\gamma_1 z_0 C_3 t)^2} \right\}^{3/4}. \quad (13)$$

График перемещений u на рис. 7 показывает, что величина перемещений для толстой пластины в направлении оси r , вызванная действием продольной волны, примерно в два раза меньше пе-



ремещений, показанных на графике рис. 4, для поперечной волны.

Выводы

Установлено, что в результате действия внутреннего точечного источника излучения в тонких и толстых пластинах образуется и распространяется со скоростью, ниже скорости C_2 , одна практически значимая волна.

С увеличением толщины пластины распространяющаяся волна постепенно преобразуется и приобретает классическую форму волны Рэлея, двигающуюся со скоростью $0,927C_2$.

Разработанная методика дает возможность расчетным путем получить основные параметры АЭ волны первого диапазона скоростей ($C_\alpha \leq 0,927C_2$) и может быть использована при анализе спектра упругих колебаний реальных пластин (толстых и тонких) при создании методик и средств контроля состояния материалов конструкций с помощью акустической эмиссии.

* Вторая (продольная) волна по сравнению с поперечной менее мощная. В нашем случае ее амплитуда в 2 раза меньше амплитуды поперечной волны.

1. Патон Б. Е. Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций // Автомат. сварка. — 2003. — Октябрь–ноябрь. — С. 7–13.
2. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я. Техническая диагностика: вчера, сегодня и завтра // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 4. — С. 6–10.
3. Paton B. E., Nedoseka A. J. Diagnostic of designs and safety of an environment // The Report on international conference «the Human factor and environment» International Institute of Welding, July 19–20 1999, Lisbon, Portugal.
4. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Индпром, 2001. — 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.
6. Недосека А. Я. Влияние характера локальных изменений структуры материала на формирование упругих волн деформаций на поверхности толстой пластины // Там же. — 1991. — № 3. — С. 66–73.
7. Pao Y. H., Gajevski R. R. Generalized ray theory and transient response of layered elastic solids // Physical acoustics. — 1997. — 3, № 6. — P. 184–265.
8. Yih-Hsing Pao, Ralph Gajevski, Ahmet N. Ceranoglu. Acoustic emission and transient waves in an elastic plate // J. Acoust. Soc. Am. — jan. 1979. — 65(1). — P. 96–105.
9. Richard L. and Yih-Hsing Pao. Spectra of transient waves in elastic plates // Ibid. — 1982. — December. — 72(6). — P. 1933–1941.
10. Недосека А. Я., Бойчук О. И. Аналитическое фундаментальное решение пространственной задачи термопластичности для слоя из неизоэргического материала // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1996. — № 3. — С. 3–16.
11. Gillis P. P. Dislocation motions and acoustic emission // A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. — 1971. — 7-8 December. — Bal Harbour. — P. 20–29.
12. Tetelman A. S., Chow R. Acoustic emission testing and micro cracking processes // Ibid. — 7-8 December 1971. — Bal Harbour. — P. 30–40.
13. Nakamura Y., Veach C. L., McCauley B. O. Amplitude distribution of acoustic emission signals // Ibid. — 7-8 December 1971. — Bal Harbour. — P. 164–186.
14. Fowler K. A., Papadakis E. P. Observation and analysis of simulated ultrasonic acoustic emission waves in plates and complex structures // Ibid. — 7-8 December 1971. — Bal Harbour. — P. 222–237.
15. Hartbower C. E., Reuter W. G., Morais C. F., Crimmins P. P. Use of acoustic emission for the detection of weld and stress corrosion cracking // Ibid. — 7-8 December 1971. — Bal Harbour. — P. 187–221.
16. Balderston H. L. The broad range detection of incipient failure using the acoustic emission phenomena // Ibid. — 7-8 December 1971. — Bal Harbour. — P. 297–317.
17. Бейтмен Г., Эрдейи А. Таблицы интегральных преобразований // Т.1. Преобразования Фурье, Лапласа, Меллина. — М.: Наука, 1969. — 343 с.
18. Forli O., Raine G. A. NDT offshore: a review of current practice // INSIGHT. — June 1996. — 38, № 6. — 1996.
19. Сборник трудов 12-й Международной деловой встречи «Диагностика-2002». — Белек, 23–26 апреля 2002. — Т.2 «Диагностика электромеханического оборудования, надежности КС и экологического мониторинга». — Ч. 2. — М.: ИРЦ Газпром, 2002. — 142 с.
20. Топон В. М., Дубицкий Д. А. Комплексная диагностика украинской части аммиакопровода Тольятти–Одесса // 12-я Международная деловая встреча «Диагностика-2002», Белек, 23–26 апреля, 2002. — Т.3. Диагностика линейной части магистральных газопроводов. — Ч.2. — М.: ИРЦ Газпром, 2002. — С. 8–16.
21. Диагностика технического состояния магистральных газопроводов УМГ «Львовтрансгаз» // Р. И. Коваль, Ю. В. Банахевич, Й. Л. Зубик и др. // Там же. — 2002. — С. 134–138.
22. Костюков В. Е., Кудаев А. П., Павликов И. А., Спиридович Е. А., Лисин В. Н. Интегрированная экспертно-аналитическая система оценки, анализа и прогнозирования технического состояния линейной части магистральных газопроводов (АЭС МГ) как составная часть региональной и глобальной систем экологического мониторинга // Межд. специализ. выставка-конф. военных и двойных технологий «Новые технологии в радиоэлектронике и системах управления». — Нижний Новгород, 3–5 апреля 2002 / Тр. конф. «Информационные технологии и автоматизированные системы управления. — Т.1. — Секц.1. — М.: ЦНИИ «Электроника», 2002. — С. 22–25.
23. Завьялов А. П., Халилова П. Р. Метод оценки напряженно-деформированного состояния участка магистрального трубопровода с локальными дефектами стенок // Тез. докл. Межрегион. мол. конф. «Севергеоэкотех-2002». — Ухта: Ухтин. гос. техн. ун-та, 2002. — С. 100–101.
24. Дегтярев Д. В., Дадонов Ю. А., Кручинина И. А., Лисанов М. В., Сумской С. И. Анализ риска аварий на магистральном аммиакопроводе «Тольятти-Одесса» ОАО «Трансаммиак» // Тр. 7-й Всерос. научн. конф. «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф» и 3-й Всерос. научн.-практ. конф. «Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». — Красноярск, 13–17 октября. — Т.2. Ин-т вычисл. моделир. СО РАН. — 2003. — С. 102–103.
25. Биус Г. А. Требования к системам технического диагностирования оборудования стартовых комплексов ракет-носителей // Свароч. пр-во. — 2004. — № 10. — С. 50–55.
26. Пат. 2226272 РФ МПК7G 01 N. Способ акустико-эмиссионного контроля и диагностирования резервуаров для хранения сжиженных газов / В. И. Тарасенко, Б. Г. Ким, В. Н. Румянцев, А. В. Гришин. — Опубл. 27.03.2004.



ПЯТИУРОВНЕВАЯ МОДУЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРУБОПРОВОДАХ, СОСУДАХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ, ХРАНИЛИЩАХ, РЕЗЕРВУАРАХ МАГНИТОАНИЗОТРОПНЫМ МЕТОДОМ

С. К. ФОМИЧЕВ, С. Н. МИНАКОВ, В. В. КОЧУБЕЙ, М. А. ЯРЕМЕНКО, С. В. МИХАЛКО,
А. В. ДАНИЛЬЧИК, П. О. КАРПЕНКО

Приведено описание пятиуровневой системы мониторинга механических напряжений в магистральных трубопроводах магнитоанізотропным методом. Она предназначена для периодических измерений механических напряжений, накопления и анализа полученных данных с целью предоставления объективной информации для принятия технологических решений. Система построена на основе унифицированных модулей, которые формируют блоки, последние формируют уровни системы. Данные, полученные любым уровнем системы, используются для глобального мониторинга конструкций без ограничений, т. е. все уровни системы совместимы между собой как на уровне данных, так и на уровне их интерпретации.

The paper gives a description of a five-level system of monitoring the mechanical stresses in line pipelines by magnetic anisotropy method. The system is designed for periodical measurement of mechanical stresses, acquisition and analysis of the obtained data to obtain objective information for taking technology decisions. The system is based on unified modules, forming the blocks, which form the system levels. The data obtained by any system level, are used for global monitoring of structures without limitations, i.e. all the system levels are compatible both at the level of the data and at the level of their interpretation.

Основная часть магистральных газо-, нефте- и продуктопроводов Украины находится в эксплуатации от 20 до 55 лет. После 20 лет эксплуатации в результате старения происходит нарушение изоляции трубы, деградация металла и замедленное разрушение, механизмы которых описаны в работе [1]. В связи с этим мониторинг технического состояния магистральных трубопроводов в настоящее время становится государственной проблемой.

В этой работе рассмотрена система, предназначенная для периодических измерений механических напряжений, накопления и анализа полученных данных с целью предоставления объективной информации для принятия технологических решений.

Неразрушающий магнитоанізотропный метод контроля механических напряжений, основанный на зависимости магнитной проницаемости ферромагнитных материалов измеряемых объектов от их напряженного состояния, составляет базис всех уровней системы мониторинга, использующих один и тот же унифицированный тип датчика [2].

Применяемая аппаратура требует минимальной подготовки контролируемой поверхности, что является преимуществом метода и позволяет проводить измерения при неполном снятии покрытия с измеряемого объекта. Достаточно очистить поверхность изделия в зоне контроля (размером ориентировочно 50×50 мм) от грубых наслоений ржавчины, грязи и окалины. Способ позволяет

также проводить измерения напряжений на поверхностях, покрытых неметаллическими покрытиями (лаки, краски и т. д.) толщиной до 0,3 мм.

Для оптимизации структуры системы под конкретные объекты мониторинга предложены соответствующие уровни исполнения системы. Данная система разбита на пять технологических уровней, каждый из которых учитывает конкретные условия эксплуатации трубопроводов, сосудов под давлением, хранилищ, резервуаров. Количество применяемых уровней и состав системы может быть определен из конкретных условий эксплуатации трубопроводов.

Данные, полученные любым уровнем системы, могут быть использованы для глобального мониторинга всего трубопровода без ограничений, т. е. все уровни системы совместимы между собой как на уровне регистрации данных, так и на уровне их интерпретации. Полученные с их помощью данные доступны для общего анализа соответствующим программным обеспечением (ПО) на ПК и поступают по имеющимся линиям связи на локальные и глобальный серверы.

Под локальным сервером понимается ПК, установленный в местном офисе организации, в зону ответственности которой входят участки трубопровода, на которых применяются соответствующие уровни системы. Накопление, обработка и анализ полученных данных дают информацию для



принятия технологических решений на местном уровне.

Под глобальным сервером понимается ПК, установленный в главном офисе организации, эксплуатирующей трубопровод, что позволяет оценивать напряженное состояние трубопровода в целом и предоставляет информацию для принятия технологических решений глобального характера.

Система построена на основе унифицированных модулей, которые формируют блоки. Данная структура позволяет гибко подбирать необходимую комплектацию оборудования для измерения механических напряжений, а также при необходимости проводить модернизацию с минимальными затратами.

Для всех уровней одинаковый и неизменный модуль — это датчик, который непосредственно проводит первичный съем информации об изменениях напряженного состояния объекта названным методом. Его основа — унифицированный магнитоанізотропный четырехполюсный преобразователь специального исполнения.

Разработчики предлагают **пять уровней** исполнения системы для измерения механических напряжений трубопроводов:

первый: одноканальный портативный прибор;

второй: многоканальная коммутируемая система на основе переносного портативного прибора;

третий: многоканальная стационарная неавтономная система с использованием носимого устройства съема информации;

четвертый: автономная стационарная многоканальная система мониторинга механических напряжений трубопроводов;

пятый: автоматическая, автономная стационарная многоканальная система мониторинга.

Рассмотрим каждый уровень системы более детально.

Первый уровень системы (рис. 1) включает портативный регистрирующий прибор — измеритель механических напряжений типа MESTR; присоединяемый к прибору датчик — четырехполюс-

ный магнитоанізотропный преобразователь; прилагаемое программное обеспечение первого уровня (ПО1) для построения эпюр распределения осевых напряжений в сечении трубопровода, как правило, используется в стационарных условиях центра мониторинга, но может применяться и непосредственно в местах проведения измерений с использованием переносных ПК.

Прибор типа MESTR [2, 3] представляет собой автономное устройство, питание которого вместе с датчиком осуществляется от установленных в нем аккумуляторных батарей. Прибор закреплен в сумке для ношения на плече.

Система первого уровня, основанная на портативном приборе, может быть использована для определения действующих напряжений в процессе эксплуатации трубопроводов с целью выявления наиболее напряженных участков; выбора технологии сборки, сварки и послесварочной обработки, обеспечивающей наименьший уровень остаточных напряжений; оценки напряженного состояния при монтаже и ремонте конструкций с целью принятия решения об оптимальном методе монтажа или ремонта; выбора места установки первичных преобразователей акустической эмиссии путем определения участков конструкции с наибольшим уровнем напряженного состояния.

С помощью оборудования данного уровня возможно проведение измерений в ручном режиме на любых доступных участках прохождения трубопроводов, в колодцах либо в случаях проведения ремонтных, диагностических, профилактических работ — как с земляными работами для шурфовки, так и без них.

Оператор, проводящий измерение, устанавливает датчик на место проведения измерения, ориентирует его, после чего на буквенно-цифровом дисплее считывает цифровое значение, которое заносит в протокол измерений с указанием места и времени проведения измерения. Затем полученные данные обрабатываются на ПК с помощью прилагаемого программного обеспечения первого уровня и только после этого информация о напряженном состоянии объекта поступают по линии связи на локальный и глобальный серверы.

Первый уровень системы строится на основе двух базовых блоков: прибора типа MESTR и программного обеспечения ПО1.

Рассмотрим состав блока «прибор типа MESTR», который состоит из следующих унифицированных модулей.

Магнитоанізотропный четырехполюсный преобразователь. Этот модуль представляет собой преобразователь трансформаторного типа, первичная обмотка которого является обмоткой намагничивания, на которую подается ток, а вторичная — измерительная обмотка, с которой сни-

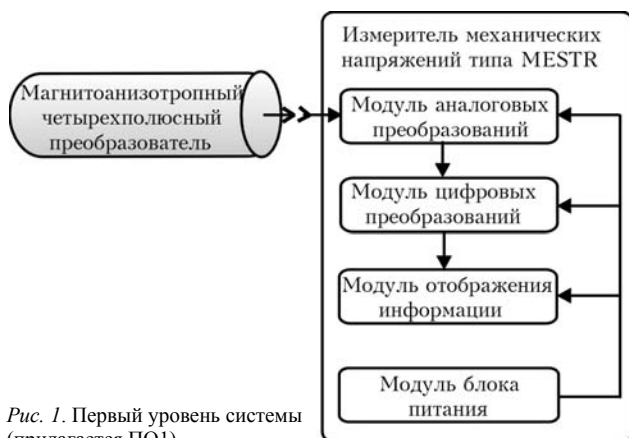


Рис. 1. Первый уровень системы (прилагается ПО1)



мается напряжение для дальнейшей обработки прибором. Обмотки размещены на П-образных сердечниках, расположенных под углом 90° по отношению одна к другой.

Модуль аналоговых преобразований (МАП). Служит для формирования входного сигнала, подающегося на обмотку намагничивания четырехполюсного магнитоанізотропного преобразователя и аналоговой обработки выходного сигнала, поступающего с измерительной обмотки. Содержит входные и выходные усилители, фазочувствительный выпрямитель, цифровой генератор синусоидального сигнала, аналогово-цифровой преобразователь (АЦП).

Модуль отображения информации (МОИ). Предназначен для отображения неименованных показаний четырехполюсного магнитоанізотропного преобразователя на буквенно-цифровом дисплее.

Модуль цифровых преобразований (МЦП). Предназначен для нормирования показаний четырехполюсного магнитоанізотропного преобразователя, выдачи управляющих команд на модуль МОИ, формирования команд данных, а также предусматривается возможность передачи их по сетевому протоколу RS-485/232.

Модуль блока питания. Предназначен для формирования напряжений питания, необходимых для работы других модулей.

Применение первого уровня системы целесообразно на открытых участках конструкций, в колодцах при плановом ремонте трубопроводов, при тестировании участков. И является оптимальным на участках, где предполагаемое количество измерений несколько сотен измерений в год. Первый уровень системы может быть модифицирован во второй уровень.

Второй уровень системы (рис. 2) состоит из прибора MESTR, блока коммутации, датчиков, программного обеспечения (ПО1) для построения эпюр распределения осевых напряжений в разрезе трубопровода.

Построение второго уровня системы основано на стационарной постановке датчиков на сечения трубопровода (сосуда, резервуара) и применении специального блока коммутации для их опроса оператором с применением регистрирующего прибора MESTR. Это является отличительной особенностью данного уровня системы от первого.

Этот уровень построен на идеологии первого уровня и полностью с ним совместим. Он отличается от него возмож-

ностью применения нескольких датчиков в непосредственной близости один от другого, которые устанавливают на трубопровод стационарно (как правило, в одном сечении) по заранее определенной схеме с фиксированием их нумерации и порядка производимых измерений на данном сечении в соответствующем формуляре.

Показания с них снимают поочередно портативным прибором MESTR, снабженным блоком коммутации. Ограничениями при этом, как и в первом уровне, могут быть лишь временные рамки производства измерений и перемещения к новому сечению трубопровода.

Блок коммутации — устройство, посредством которого осуществляется последовательная коммутация датчиков.

Датчики устанавливаются на трубопровод стационарно и могут работать как на открытых участках, так и под землей. В последнем случае после установки датчиков трубопровод засыпают и на поверхность выводится выводная труба с разъемом для подключения портативного прибора MESTR через модуль коммутации.

Подключив через разъем датчики к блоку коммутации посредством выведенных информационных и питающих проводов, оператор проводит не-

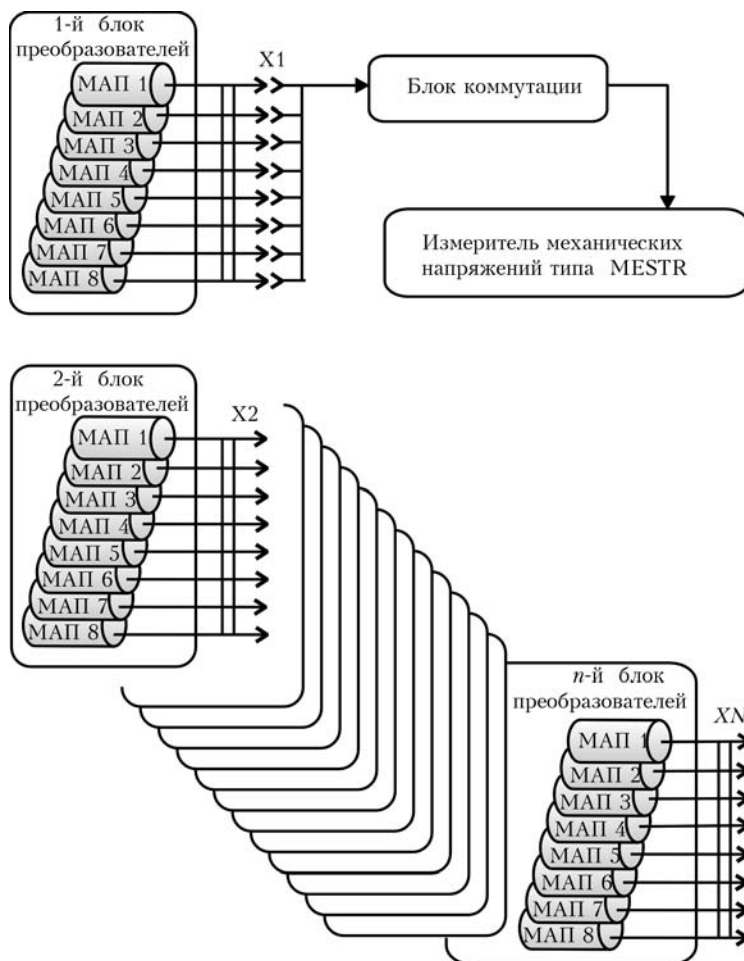


Рис. 2. Второй уровень системы (прилагается ПО1)



обходимые измерения и заносит данные в протокол измерений.

Области применения второго уровня системы: постоянные опасные места прохождения трубопроводов, требующие повышенного контроля в локальное определенное время, например, в период сезонных изменений, оползней, размывов и т. д.; опасные участки сосудов, резервуаров и хранилищ. Применение второго уровня системы оптимально при необходимости снятия показаний в пределах тысяч измерений в год. Полученные данные так же, как и в первом уровне системы, систематизируются посредством бумажного делопроизводства, обрабатываются на ПК с использованием программного обеспечения ПО1 для построения эпюр распределения осевых напряжений в сечении трубопровода, после чего поступают по линиям связи на локальный и глобальный серверы.

Третий уровень системы (рис. 3) — многоканальная стационарная неавтономная система для измерения механических напряжений. Данный уровень открывает следующее поколение систем сбора и обработки данных напряженного состояния и значительно снижает трудозатраты процесса мониторинга. Этот уровень позволяет на порядок увеличить производительность и количество датчиков, используемых в мониторинге объекта, соответственно повышая информативность и оперативность системы в целом.

Состоит из таких блоков: блока датчиков, универсального измерителя напряжений (УИН), переносного устройства съема информации, прила-

гаемого программного обеспечения нового уровня ПО2.

Рассмотрим детально каждый из блоков.

Универсальный измеритель напряжений (УИН). Устройство, предназначенное для непосредственного опроса четырехполюсных магнитоанізотропных преобразователей, оцифровки и нормировки их показаний с возможностью передачи данных на порт вывода информации RS-485. Этот порт позволяет передавать информационные данные по физической витой паре на расстояние до 2 км. Так же, как и блок датчиков, данное устройство является базовым для последующих уровней системы.

В состав блока входят модули: аналоговых преобразований, цифровых преобразований и коммутации.

Универсальный измеритель напряжений характеризуется такими параметрами: количество опрашиваемых четырехполюсных магнитоанізотропных преобразователей — до 23 шт.; питание УИН-12-24В постоянного тока; канал передачи данных реализован через порт RS-485; модульная компоновка УИН: состоит из легко заменяемых стандартизованных модулей для облегчения ремонта, замены либо тестирования любого из них; герметичный, прочный некорродируемый корпус; при подземной постановке на поверхность выводится всего четыре провода в защитной оболочке: два информационных, два питания.

Переносное устройство съема информации. Предназначено для опроса УИН, установленного

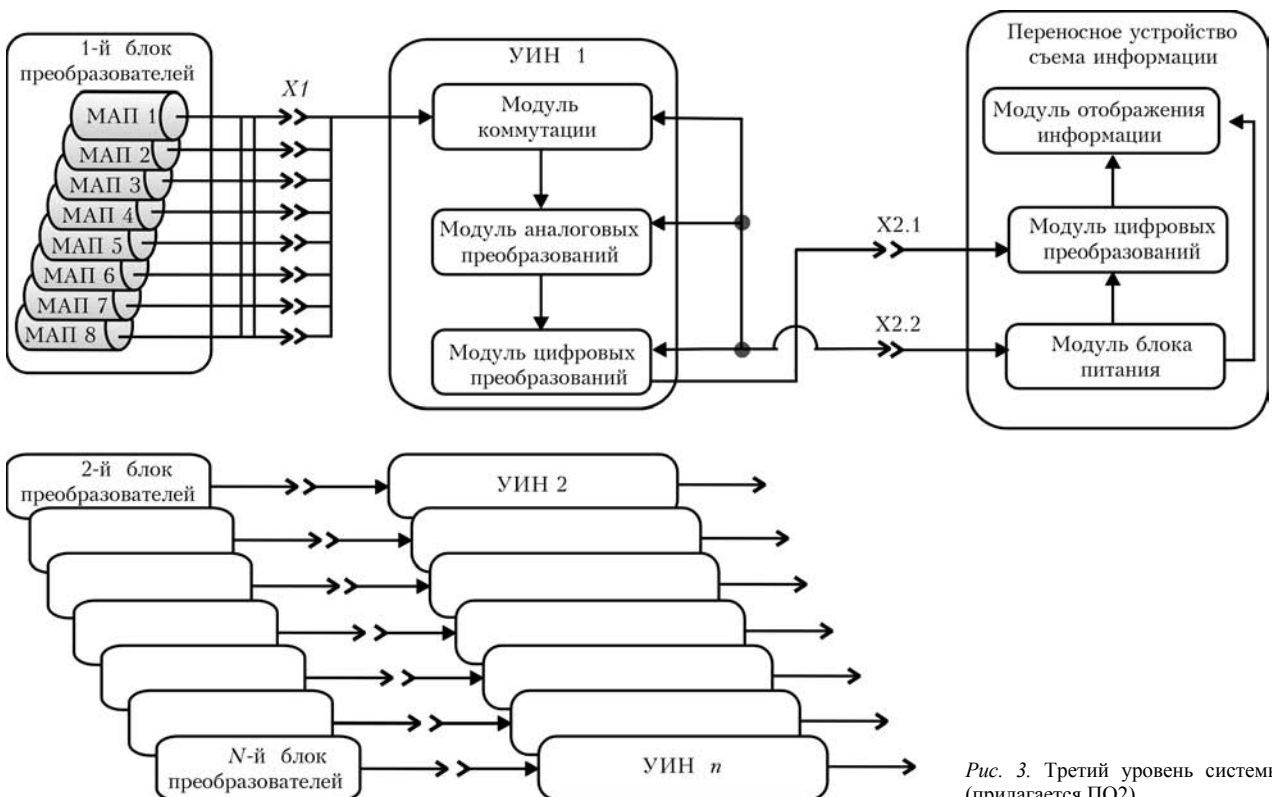


Рис. 3. Третий уровень системы (прилагается ПО2)



на трубопроводе как на поверхности, так и под землей. Применяется для получения по каналу передачи данных с УИН. Питающее напряжение для УИН подается с переносного устройства съема информации по кабелю при его подключении и регистрации данных через единый разъем.

Переносное устройство съема информации состоит из модулей: цифровых преобразований, отображения информации, блока питания.

Из перечисленного видно, что система третьего уровня — это возможность установки неограниченного количества УИН, стационарная постановка датчиков, надежность эксплуатации. Оператор имеет при себе только переносное внешнее устройство съема информации, которым проводит измерения путем подключения к одному из установленных УИН. Данные, поступающие с датчиков, автоматически передаются в переносное устройство съема информации и подлежат дальнейшему анализу на ПК с помощью прилагаемого программного обеспечения второго уровня (ПО2), затем поступают по линиям связи на локальный и глобальный серверы.

Возможности третьего уровня системы с минимальными затратами позволяют модифицироваться в четвертый, а затем в пятый уровень системы. Применение третьего уровня систем является оптимальным при снятии показаний в пределах десятков тысяч измерений в год.

Четвертый уровень системы (рис. 4) — автономная стационарная многоканальная система мониторинга механических напряжений трубопроводов. В отличие от системы третьего уровня

дополнительно содержит блоки контроллера, повторителей, программное обеспечение ПО2.

Контроллер предназначен для периодического опроса УИН и состоит из следующих модулей: концентратора, микроконтроллера, модуля блока питания.

Следует отметить, что применение блока контроллера в этом уровне системы позволяет присоединять к одной информационной шине любое количество УИН и обеспечивать при этом съем информации сразу со всех устройств лишь в одной, удобной точке коммутации. Также имеется возможность в любой момент подключить к системе портативный персональный компьютер с возможностью получить весь объем информации за период от последнего сеанса измерения. Модули датчиков, блоки УИН и повторителей стационарно закреплены на объекте мониторинга в корпусах соответствующего исполнения.

Модуль концентратора предназначен для концентрации информационных потоков с блоков УИН и преобразовании их в протокол связи с компьютером.

Модуль микроконтроллера предназначен для периодического опроса УИН, накопления и хранения данных.

Модуль блока питания предназначен для выработки напряжений питания на УИН, повторители и модуль концентратора (12...24 В постоянного тока).

Повторитель — устройство, служащее «промежуточным звеном» для последовательного подключения УИН. Этот блок устанавливается вмес-

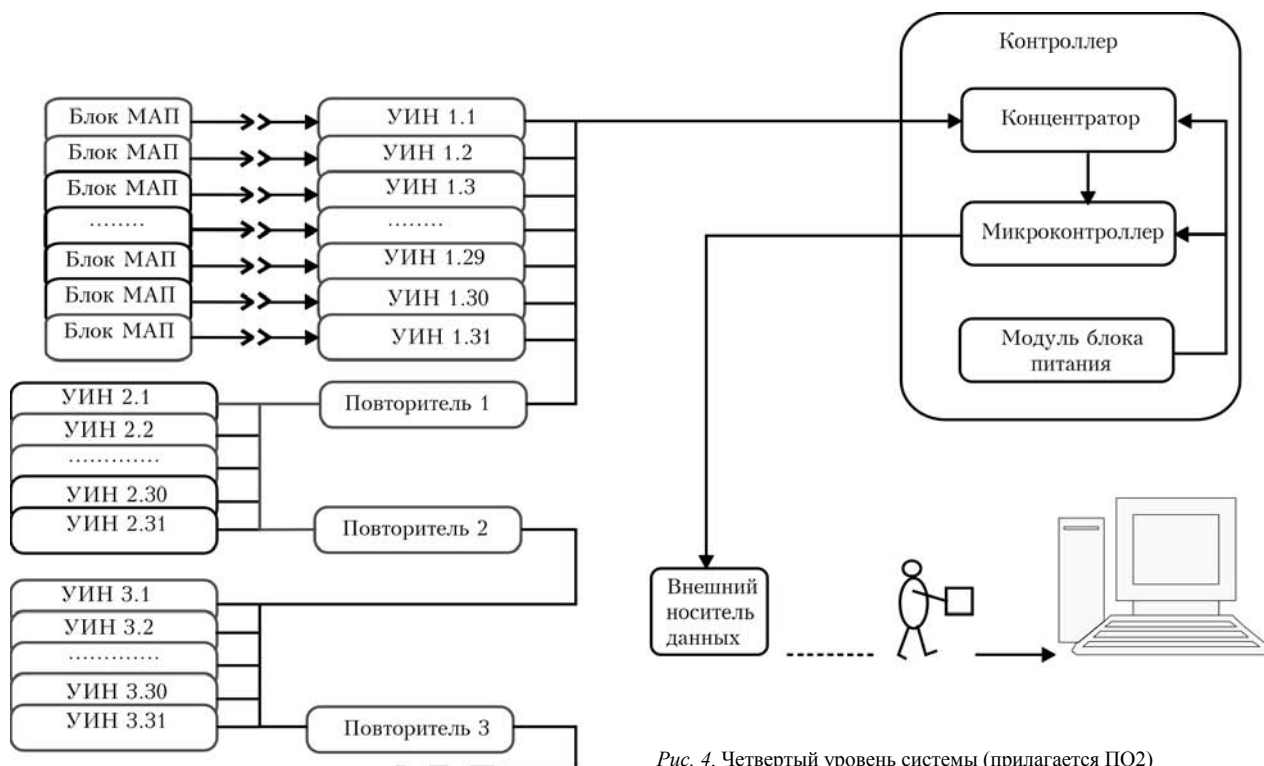


Рис. 4. Четвертый уровень системы (прилагается ПО2)

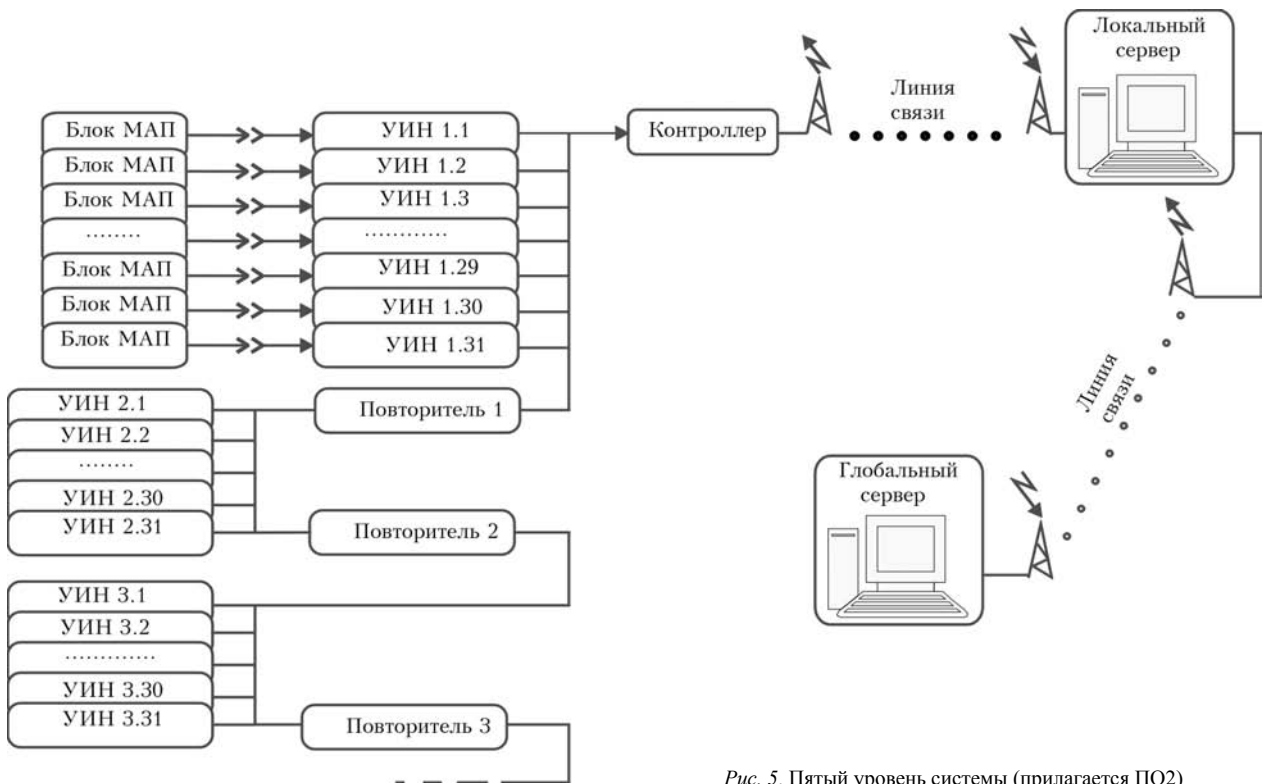


Рис. 5. Пятый уровень системы (прилагается ПО2)

то одного из 32-х УИН в случае необходимости последовательного подключения более 31 УИН на одну информационную шину при мониторинге объекта, требующего очень большого количества датчиков в определенной локальной зоне. В противном случае его наличие не требуется.

Внешний носитель данных — это устройство, предназначенное для съема накопленной информации с блока контроллера (модуля микроконтроллера) и передачи ее в ПК (локальный сервер) для последующей обработки с помощью программного обеспечения ПО2. Затем данные поступают по линиям связи в глобальный сервер.

Блок питания 12...24 В постоянного тока.

Применение четвертого уровня системы оптимально при снятии показаний в пределах сотен тысяч измерений в год и не требует бумажного делопроизводства. Четвертый уровень системы легко модифицируется в пятый, так как отличается лишь средствами автоматизации доставки и обработки данных механических напряжений и может функционировать в полностью автономном режиме. Предполагает замену бумажных технологий учета электронными формами, ликвидирует возможность неточностей субъективного характера.

Пятый уровень системы (рис. 5) — представляет автоматическую автономную стационарную многоканальную систему мониторинга механических напряжений трубопроводов. Она базируется на системе четвертого уровня и в отличие от последней пересылает данные через линии связи к локальному и глобальному серверам в автоматическом режиме.



Рис. 6. Оптимальные области применения уровней системы

Этот уровень системы предполагает полную автоматизацию мониторинга механических напряжений трубопровода, что позволяет отслеживать опасные участки в режиме реального времени без каких-либо ограничений, находясь далеко от места их нахождения.



Разработанная пятиуровневая модульная система мониторинга напряженного состояния трубопроводов магнитоанізотропным методом предназначена для гибкой оптимизации структуры системы под конкретные объекты мониторинга, уровни опасности объектов, а также стоимости получения данных одного измерения. Каждый из разработанных уровней системы имеет свою экономическую целесообразность применения (рис. 6). Система не ограничена количеством и качественным составом применяемых одновременно уровней. По мере роста производственной и экономической необходимости предусмотрена модификация первого уровня во второй, а также третьего в четвертый и далее в пятый. Для современных объектов трубопроводного транспорта может быть рекомендовано комплексное использование различных уровней системы с применением отдельных уровней на различных участках.

Выводы

Разработана многоуровневая система мониторинга напряженного состояния, обеспечивающая безопасную эксплуатацию трубопроводов, сосудов под давлением, хранилищ и резервуаров.

Использование магнитоанізотропного метода контроля предъявляет минимальные требования к

подготовке контролируемой поверхности и позволяет проводить измерения при неполном снятии защитного покрытия с измеряемого объекта.

Данные, полученные любым уровнем системы, используются для глобального мониторинга конструкций без ограничений, т. е. все уровни системы совместимы между собой как на уровне данных, так и на уровне их интерпретации.

Предусмотрена возможность наращивания информационной мощности каждого из уровней в отдельности, а также их модификация в более высокие уровни общей системы мониторинга с существенной экономией средств.

В комплексе система обеспечивает предоставление своевременной и объективной информации для принятия технологических решений на любых уровнях управления.

1. *Обоснование* метода обследования и выбор мест шурфовки магистральных газопроводов / Б. Е. Патон, А. Я. Недосека, С. К. Фомичев, М. А. Яременко // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1999. — № 1. — С. 3–12.
2. *Особенности* измерения механических напряжений электромагнитным методом в трубопроводах и сосудах давления газового и нефтяного комплекса / А. Я. Недосека, С. К. Фомичев, С. Н. Минаков, М. А. Яременко и др. // Там же. — 1996. — № 1. — С. 55–56.
3. *Измеритель* механических напряжений серии MESTR-41x / С. К. Фомичев, С. Н. Минаков, А. В. Данильчик, М. А. Яременко и др. // Там же. — 1998. — № 1. — С. 58–60.

Нац. техн. ун-т Украины «КПИ»,
Киев

Поступила в редакцию
01.06.06

LTWMP-2007
3-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ
И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ»
21-25 мая 2007 г.,
Крым, Ялта, Дом творчества ученых «Кацивели»
Организаторы:
ИЭС им. Е.О. Патона
НТТУ «КПИ»
Международная ассоциация «Сварка»
Тел./факс: (38044) 529-26-23
E-MAIL: JOURNAL@PATON.KIEV.UA
WWW.IAW.COM.UA/RUSSIAN/CONFERENCES



ОЦЕНКА ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ СЕРОВОДОРОДНОЙ НЕСПЛОШНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕЕ ВЫСОТЫ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

В. П. ДЯДИН, Е. А. ДАВЫДОВ, А. Е. ЛИТВИНЕНКО

На натурном фрагменте элемента теплообменника, подверженного низкотемпературному сероводородному растрескиванию, выполнено гидравлическое нагружение пластической несплошности и проведено тензометрирование данной области. Выполнена экспериментальная проверка модели для инженерной оценки внутреннего давления в пластической несплошности в зависимости от высоты ее пластического прогиба и геометрических размеров. Представлены результаты ультразвукового сканирования зоны низкотемпературного сероводородного растрескивания после гидравлического нагружения несплошности и отмечены их особенности.

Hydraulic loading of a plastic discontinuity and strain gauge measurement in this area were performed on a full-scale fragment of a heat exchanger element prone to low-temperature hydrosulphuric cracking. Experimental verification of the model was conducted for engineering assessment of inner pressure in a plastic discontinuity, depending on the height of its plastic sagging and geometrical dimensions. The results of ultrasonic scanning of the zone of low-temperature hydrosulphuric cracking after hydraulic loading of the discontinuity are presented and their features are noted.

В работе [1] рассмотрены результаты экспериментального исследования влияния гидравлического нагружения цилиндрической оболочки на изменение напряженно-деформированного состояния наружной стенки пластической полости («пузыря»), кроме того, была предложена упрощенная модель по оценке величины давления в нем. Тензометрирование наружной стенки в зоне «пузыря» проводили на действующем оборудовании в процессе его технического диагностирования, в связи с чем влияние величины внутреннего давления в «пузыре» на изменение напряженного состояния в зоне пластической несплошности не исследовали и экспериментальную проверку предложенной модели в работе [1] не проводили. В первую очередь это было связано с невозможностью разгрузки исследуемой пластической полости путем механического вскрытия и отсутствием непосредственного доступа к ней с внутренней стороны без вывода аппарата из эксплуатации.

В данной статье рассматриваются результаты дополнительного исследования влияния внутреннего давления в пластическом «пузыре» на изменение величины пластического прогиба его вершины и напряженно-деформированного состояния стенки в зоне сероводородного низкотемпературного расслоения.

Для экспериментальной проверки предложенной в работе [1] модели роста пластического выпучивания при диагностическом плановом обследовании нефтеперерабатывающего оборудования, подверженного низкотемпературному сероводородному растрескиванию, был отобран элемент

теплообменника, подлежащий отбраковке в связи со значительным его повреждением в водородо-содержащей среде.

На момент проведения замены поврежденного участка теплообменный аппарат находился в эксплуатации более 25 лет при давлении не менее 1 кгс/см² и температуре не выше плюс 80 °С (среда — жирный газ).

Исследуемый фрагмент (рис. 1) представляет собой элемент обечайки кожуха теплообменника размером 700×900 мм с начальной толщиной стенки 16 мм, изготовленного из стали марки 09Г2С в соответствии с ГОСТ 5520–79 «Сталь листовая углеродистая низколегированная и легированная для котлов и сосудов, работающих под



Рис. 1. Общий вид фрагмента корпуса теплообменника, подверженно-го низкотемпературному сероводородному растрескиванию



давлением». Характерной особенностью рассматриваемого элемента является наличие в нем изолированной пластической полости и цепочек плоских несплошностей в направлении проката, образовавшихся в результате растрескивания по границам вытянутых пластинчатых неметаллических включений под воздействием наводороживающей среды. Все дефекты залегают тонким слоем высотой около 2,0 мм на глубине около 9,0 мм от наружной поверхности, что, в свою очередь, позволяет снизить вероятность ступенчатого развития дефекта в направлении толщины в процессе нагружения пластической несплошности внутренним давлением. Коррозионный износ на внутренней стороне элемента в зоне низкотемпературного сероводородного растрескивания достигает 2,0 мм (средняя толщина вырезанного фрагмента в зоне дефекта составляет 14,5 мм). Геометрические размеры «пузыря» в осевом направлении фрагмента обечайки до разгрузки (засверловки) и его модельное представление в соответствии с работой [1] показаны на рис. 2.

При расчете внутреннего давления исследуемый пластический дефект рассматривается как круговая несплошность. Поправки на эллиптичность и цилиндрический изгиб не учитываются. В данном случае рассмотрение пластической несплошности как круговой полости приводит к несколько завышенному расчетному давлению в ней, что в ряде случаев может быть вполне оправдано при предварительных оценках напряженного состояния в процессе технического диагностирования оборудования, подверженного такого рода повреждениям.

Для проведения гидравлического нагружения данной несплошности с внешней стороны обечайки к центральной части «пузыря» был приварен угловым швом на малых токах короткий штуцер и наклеены тензорезисторы с рабочей базой 20 мм 2ПКБ-20-

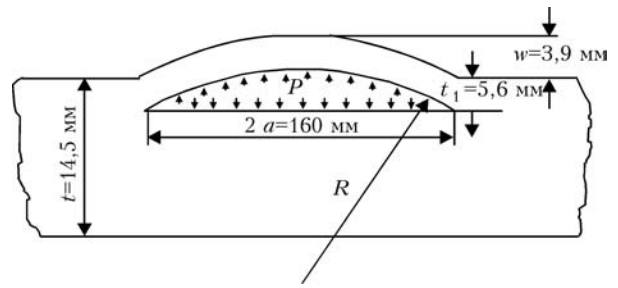


Рис. 2. Модельное представление выявленной пластической несплошности

200ХБ с сопротивлением $R = 198,00...198,49$ Ом для контроля изменения напряженно-деформированного состояния в зоне «пузыря» в процессе его разгрузки и последующего гидравлического нагружения. Для наклейки тензорезисторов применяли клей Циакрин ЭО на внешней и внутренней стороне фрагмента обечайки. Для тарировки тензорезисторов использовали тарировочную балочку, нагружавшуюся чистым изгибом. Измерение деформаций (напряжений) проводили тензостанцией ИСД-3 с мостовой схемой питания на постоянном токе (в данном случае единице измерения сопротивления тензорезистора соответствовало изменение напряжения — 1,86 МПа). Места расположения датчиков показаны на рис. 3.

Перед проведением испытаний определялись начальные показатели тензорезисторов и измеряли высоту прогиба в центральной части «пузыря» в осевом направлении вырезанного фрагмента обечайки. После этого проводили разгрузку пластической несплошности путем засверловки наружной стенки «пузыря» через сваренный штуцер с последующим снятием показаний тензорезисторов и измерением высоты его максимального прогиба. Для определения начального давления в «пузыре» и его связи с пластическим прогибом w было выполнено гидравлическое нагружение полости через сваренный штуцер с подключением ма-

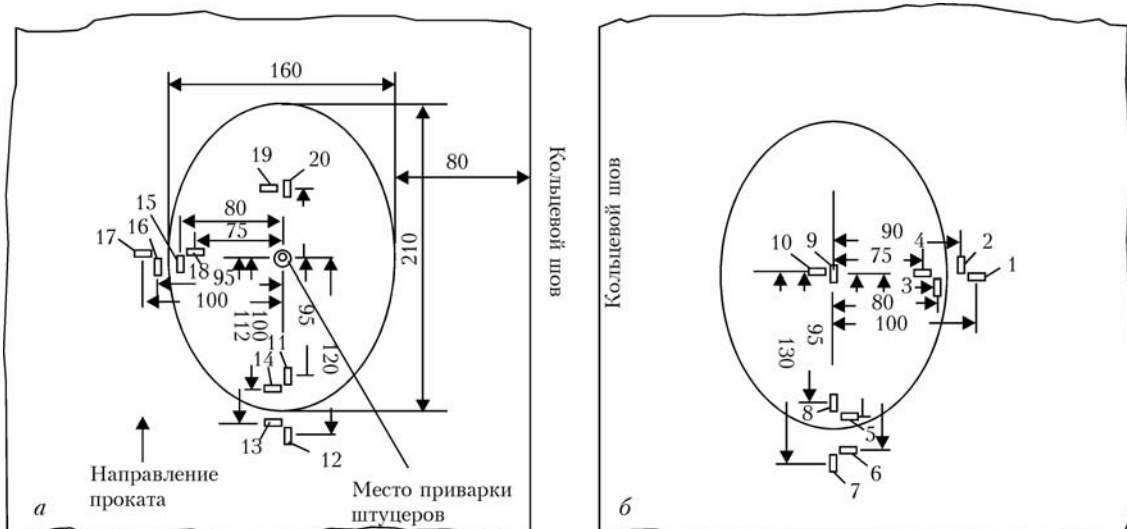


Рис. 3. Места расположения тензодатчиков с наружной (а) и внутренней (б) стороны фрагмента исследуемой обечайки



нометра. Нагружение пластической несплошности проводили в два этапа, разнесенные во времени в двадцать дней.

На первом этапе гидравлического нагружения ставилась задача определения максимального давления в «пузыре» в период последнего диагностического обследования аппарата и на момент его разгрузки при исходном поперечном размере. Следует отметить, что эти два состояния могут несколько отличаться. В первую очередь это связано с тем, что между окончанием срока пребывания данного элемента в сероводородсодержащей среде и проведением испытаний прошло около четырех месяцев. Последнее не исключает возможного подрастания дефекта в связи с изменением (падением) коэффициента интенсивности напряжений K_s в пластической области перед фронтом развивающегося дефекта, который находится в диапазоне $K_{1c} \geq K_s \geq K_{scc}$, где K_{1c} — статический коэффициент интенсивности напряжений в случае отсутствия влияния агрессивной среды; K_{scc} — пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений в присутствии агрессивной среды (в данном случае во влажном сероводороде) [2–4].

Для решения этих задач в начале было проведено ступенчатое гидравлическое нагружение «пузыря» до 63 кгс/см^2 с записью показаний тензодатчиков и замеров величины прогиба в центральной части «пузыря» на каждом шаге нагружения с выдержкой давления не менее 5 мин. Далее пластическая несплошность была разгружена путем сброса давления до нуля. Температура воздуха в помещении и воды на момент проведения гидравлического нагружения исследуемого элемента, составляла 15°C .

На втором этапе — пошаговое нагружение до 75 кгс/см^2 с целью выявления закономерностей изменения величины прогиба после предварительной разгрузки и изучения характерных особенностей роста дефекта в плоскости проката методом

УЗ-контроля компьютеризированной системой R-Scan. Температура воздуха в помещении и воды на втором этапе гидравлического нагружения «пузыря» составляла 12°C .

Начальное давление в «пузыре» до его засверловки (разгерметизации) определялось по минимальному значению среднеквадратичной функции:

$$F(x-p) = \left(\frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} (f_i(\phi) - f_i(p))^2 \right)^{0,5}, \quad (1)$$

где $f_i(\phi)$ — показания значений тензодатчиков до засверловки (разгерметизации) «пузыря»; $f_i(p)$ — текущие показания значений тензодатчиков при гидравлическом нагружении; i — порядковый номер тензодатчика.

Номера тензодатчиков и начальные геометрические размеры «пузыря» в плоскости представлены на рис. 3. Результаты показаний тензодатчиков в процессе гидравлического нагружения «пузыря» до 63 кгс/см^2 представлены в табл. 1, изменение среднеквадратичной функции (1) — на рис. 4.

Как видно из рис. 4, наименьшее отклонение функции (1) по показаниям 20-ти тензорезисторов $f_i(p)$ от первоначальных значений $f_i(\phi)$ достигается при гидравлическом нагружении полости до $p = 33 \text{ кгс/см}^2$. Таким образом, можно судить о том, что на момент разгрузки (засверловки) давление в «пузыре» составляло примерно 33 кгс/см^2 .

При оценке максимального давления в «пузыре» на момент проведения технической диагностики аппарата в случае отсутствия роста дефекта в поперечном направлении проката можно исходить из следующего. Во-первых, при достижении данной нагрузки следует ожидать появления нелинейности в изменении напряжений (деформаций) в вершине (полусе) «пузыря» со стороны его пластического выпучивания (датчики 9 и 10). Во-вторых, при незначительном увеличении поперечного размера «пузыря» в процессе его гидравлического нагружения следует ожидать появления нелинейности в точке условного перехода упругого прогиба к его пластическому росту в вершине дефекта. Результаты измерения изменения величины прогиба «пузыря» в его вершине в зависимости от величины гидравлического давления представлены в табл. 2.

Сказанное выше наглядно продемонстрировано на рис. 5 и рис. 6, а, где приведены результаты изменения напряжений $\Delta\sigma$ (деформаций) и величины прогиба w в вершине вздутия при гидравлическом нагружении «пузыря» до 63 кгс/см^2 . Видно, что отклонение от линейности в обоих случаях происходит при одном и том же давлении, равном примерно 45 кгс/см^2 . Откуда следует, что максимальное давление в «пузыре» при обнару-

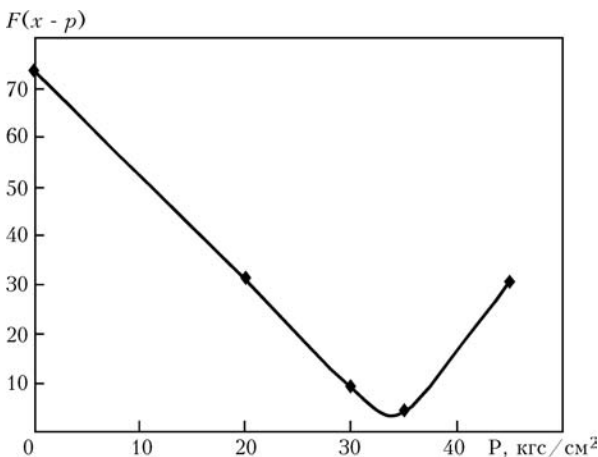


Рис. 4. Изменение величины среднеквадратичной функции (1) при гидравлическом нагружении несплошности



Таблица 1. Результаты показаний тензодатчиков при нагружении «пузыря» до 63 кгс/см²

Номер датчика (рис. 3)	Условные сопротивления тензорезисторов										После разгрузки
	До засверловки	После засверловки	Гидравлические нагружения, кгс/см ²								
			20	30	35	45	50	55	60	63	
1	441	448	439	434	431	426	423	412	405	396	440
2	491	496	493	491	490	489	489	496	503	513	497
3	682	689	685	683	682	681	681	686	691	700	684
4	538	394	477	518	540	578	620	732	807	882	725
5	458	440	449	455	457	461	466	493	511	523	489
6	439	427	432	436	439	442	446	456	465	478	445
7	511	463	490	506	515	529	547	608	666	744	663
8	510	402	466	498	515	546	584	640	674	703	579
9	436	516	472	449	435	397	342	208	122	—	—
10	458	696	558	486	445	343	186	—	—	—	—
11	584	560	574	581	585	591	594	593	591	588	553
12	496	483	489	494	497	502	505	510	515	523	478
13	519	507	513	516	519	522	525	530	535	541	512
14	500	486	494	498	500	504	508	513	515	518	495
15	489	469	479	485	488	492	493	493	491	487	465
16	424	404	413	420	423	427	430	434	436	438	406
17	626	610	619	625	629	634	639	651	660	673	620
18	529	455	500	524	537	553	562	572	583	592	462
19	454	469	460	455	452	449	447	445	442	439	472
20	446	475	456	446	441	434	428	419	411	403	471

женных его геометрических размерах в период диагностического обследования и эксплуатации достигало 45 кгс/см².

В соответствии с работой [1] давление внутри «пузыря» (см. рис. 2) при условии деформационного упрочнения материала в первом приближении можно описать зависимостью:

$$P = 4\sigma_{0,2}(2/(3\varepsilon_T))^n(a/w + w/a)^{-(2n+1)} \times (1 + 2/3(a/w + w/a)^{-2})^{-1}t_1/a, \quad (2)$$

где w — прогиб «пузыря» в вершине; a — радиус полости; t_1 — толщина пластического слоя; t — толщина листа; $\sigma_{0,2}$ — предел текучести материала; ε_T — деформация соответствующая $\sigma_{0,2}$; n —

Таблица 2. Результаты измерения высоты прогиба при гидравлическом нагружении «пузыря» до 63 кгс/см²

Давление в «пузыре», кгс/см ²	Высота прогиба w , мм	Примечание
0	3,4	—
20	3,6	—
30	3,7	—
35	3,9	—
45	4,1	Отмечаются щелчки в металле
50	4,8	—
55	5,6	Отмечаются щелчки в металле
60	6,7	То же
63	7,6	—

величина деформационного упрочнения материала при одноосном растяжении.

Для определения механических свойств исследуемого элемента было изготовлено три образца МИ-12 тип II в соответствии с ГОСТ 6996–66 в направлении поперек проката. Принимая во внимание, что при техническом диагностировании нефтеперерабатывающего оборудования наибольшее распространение получило определение твердости при пластическом вдавливании шарика, прочностные характеристики металла в исследуемой зоне также определялись по значениям твер-

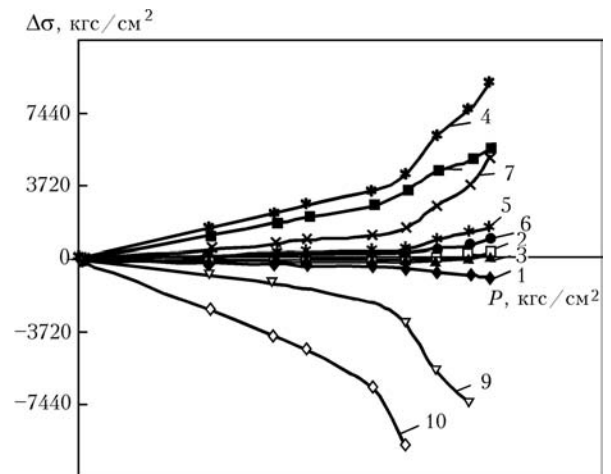


Рис. 5. Изменение напряжений (деформаций) в местах расположения тензодатчиков 1–10 согласно рис. 3, б при гидравлическом нагружении несплошности до 63 кгс/см²

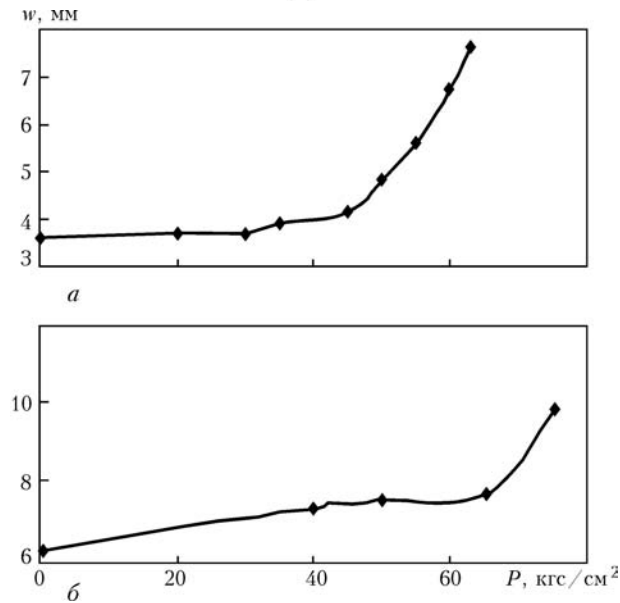


Рис. 6. Изменение величины прогиба вершины «пузыря» при его гидравлическом нагружении до 63 кгс/см² после засверловки (а) и при повторном гидравлическом нагружении до 75 кгс/см² после предварительной разгрузки (б)

дости *НВ* по Бринелю при статическом нагружении. Перерасчет твердости по *НВ* на временное сопротивление материала σ_B и $\sigma_{0,2}$ проводили по ГОСТ 22761–77 и МУ «Проведение работ по оценке остаточной работоспособности технологического оборудования — нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств. г. Киев — 1993» (табл. 3).

Как видно из табл. 3, перерасчет предела текучести $\sigma_{0,2}$ по твердости дает вполне пригодные для инженерных оценок значения.

Подставляя в выражение (2) значения геометрических размеров «пузыря» в поперечном направлении (рис. 2) и принимая прочностные характеристики стали О9Г2С, соответствующие испытанию на растяжение образцов МИ-12 (табл. 3) с учетом зависимости по оценке величины деформационного упрочнения n [5]

$$n = -0,182 + 0,222(\sigma_B/\sigma_{0,2}) \quad (3)$$

получаем, что расчетное внутреннее давление в «пузыре» в этом случае также очень близко к значению 45 кгс/см². Последнее показано на рис. 7, где представлены расчетные и фактические значения внутреннего давления в «пузыре» в зависимости от величины пластического прогиба его вершины и принимаемых радиусов дефекта при

Таблица 3. Механические свойства исследуемого элемента и расчетные значения по твердости при температуре $t = 20$ °С

Сталь О9Г2С, $\delta = 16$ мм	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
ГОСТ 5520–79	325	470	21,0	—
МИ-1 т. II (ГОСТ 6996–66)	354	507	36,6	65,9
Перерасчет по <i>НВ</i> (1590 МПа)	343	548	26...30	—

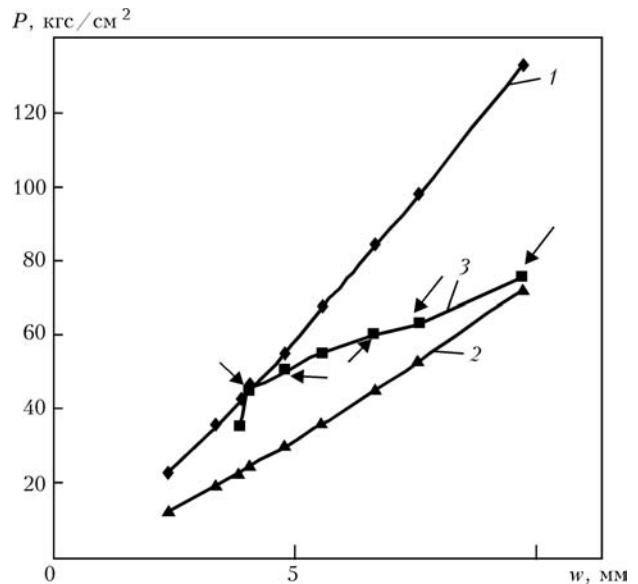


Рис. 7. Изменение величины давления в неплоскости в зависимости от высоты ее выпучивания при различных расчетных радиусах a , мм: 1 — 78; 2 — 105; 3 — экспериментальные значения

гидравлическом нагружении полости до 63 кгс/см² и выше. Здесь также необходимо отметить, что поскольку в процессе гидравлического нагружения основной рост «пузыря» наблюдался в направлении проката, то за исходный размер дефекта при расчете максимального давления принимался его поперечный размер (вписанная окружность). При оценке минимального давления в «пузыре» за его геометрические размеры принимался радиус описанной a окружности и соответствовал данным, приведенным на рис. 3. Нагрузки, при которых отмечались щелчки (характерные при подрастании исследуемой полости или ее слиянии с более мелкими отдельно стоящими полостями), помечены стрелочками.

Как видно из рис. 7, экспериментальные значения фактического давления (кривая 3) в исследуемой полости находятся между этими двумя расчетными кривыми (1, 2), что, в свою очередь, позволяет оценить изменение величины давления в полости при возможном изменении дефекта в процессе эксплуатации и в периоды простоя оборудования. Таким образом, если не учитывать поправку на подрастание полости и эллиптичность, что, как было отмечено выше, приводит к несколько завышенному давлению, из рис. 7 также следует, что можно говорить о достаточно хорошем соответствии расчетного давления в «пузыре» по формуле (1) его фактическому значению и для больших прогибов. Наблюдаемая погрешность между расчетным давлением (кривая 1) и фактическим при максимальном прогибе 7,6 мм, на наш взгляд, является вполне приемлемой для инженерных оценок. Тем более, что при уточнении поперечного размера «пузыря» в этой точке



Таблица 4. Результаты показаний тензодатчиков при повторном нагружении «пузыря» до 75 кгс/см²

Номер датчика (рис. 3)	Значения условных сопротивлений тензорезисторов							После разгрузки
	После разгрузки	Через 20 дней	Нагружение, кгс/см ²					
			40	50	65	70	75	
1	440	438	410	403	395	384	378	412
2	497	496	505	508	512	524	536	496
3	684	682	692	695	700	711	723	686
4	725	722	826	850	877	927	—	732
5	489	486	508	514	520	520	514	493
6	445	444	466	471	479	496	514	456
7	663	660	714	725	750	843	—	608
8	579	578	663	680	705	724	734	640
9	—	—	—	—	—	—	—	208
10	—	—	—	—	—	—	—	—
11	553	562	586	591	597	595	593	593
12	478	477	506	512	522	532	545	510
13	512	530	550	554	562	569	579	530
14	495	499	514	518	523	525	527	513
15	465	464	478	482	494	479	473	493
16	406	404	423	427	433	436	438	434
17	620	620	654	660	674	685	698	651
18	462	461	548	565	593	598	611	572
19	472	469	447	443	435	432	426	445
20	470	469	423	415	398	390	377	419

данная погрешность будет еще меньше даже без учета эллиптичности дефекта.

Для выявления закономерностей изменения величины прогиба после предварительной разгрузки и характерных особенностей роста дефекта в плоскости проката на втором этапе было выполнено повторное гидравлическое нагружение «пузыря» до 75 кгс/см² с последующим ультразвуковым сканированием исследуемого участка и прилегающей зоны.

Результаты тензометрирования «пузыря» при гидравлическом нагружении до 75 кгс/см² представлены в табл. 4. Изменение величины пластического прогиба показаны на рис. 6, б. Максимальный прогиб при давлении 75 кгс/см² также показан на рис. 7 отдельной крайней точкой.

Из рис. 6, б видно, что через 20 дней после разгрузки «пузыря» при повторном его нагружении до 75 кгс/см² в точке максимального предыдущего сброса давления (63 кгс/см²) также наблюдается перегиб кривой, что подтверждает полученные ранее результаты при определении максимального давления в полости в период эксплуатации теплообменника. Характерной особенностью последнего гидравлического нагружения полости является постоянно отмечаемый рост (щелчки) расслоения при подъеме давления выше 50 кгс/см². Вместе с тем, отмечаемые изменения напряжений (деформаций) в зоне тензодатчика 4 и совсем малые приращения напряжений

в зоне датчика 1 свидетельствует о слабом развитии дефекта в поперечном направлении (см. табл. 4). В то же время в зоне тензодатчиков 5–8 наблюдается абсолютно противоположная картина, что косвенно свидетельствует о развитии дефекта в этой области, т. е. в направлении проката. В целом же следует отметить, что в виду отсутствия резких скачков по уменьшению изменения напряжений (деформаций) в зонах расположения тензодатчиков от 1 до 6, 8 и высокие приращения (деформаций) в районе датчика 7, — преимущественное развитие «пузыря» в основном носит канальный характер. Т. е., при незначительном увеличении геометрических размеров «пузыря», отмечается его соединение с соседними небольшими несплошностями через разрыв узких тонких перемычек между ними. Последнее очень наглядно иллюстрируется рис. 8, где представлены результаты ультразвукового сканирования исследуемого участка с наружной стороны компьютеризированной системой P-Scan в режиме толщинометрии.

Как видно из рис. 8, между основным «пузырем» и залегающими несплошностями наблюдается цепочка последовательно соединенных между собой узких перемычек в разных направлениях. При этом следует отметить, что основная их масса залегаёт отдельными полосами в направлении проката. Этим скорее всего и объясняется принципиальное отличие в показаниях тензорезисторов, расположенных по границам дефекта в про-

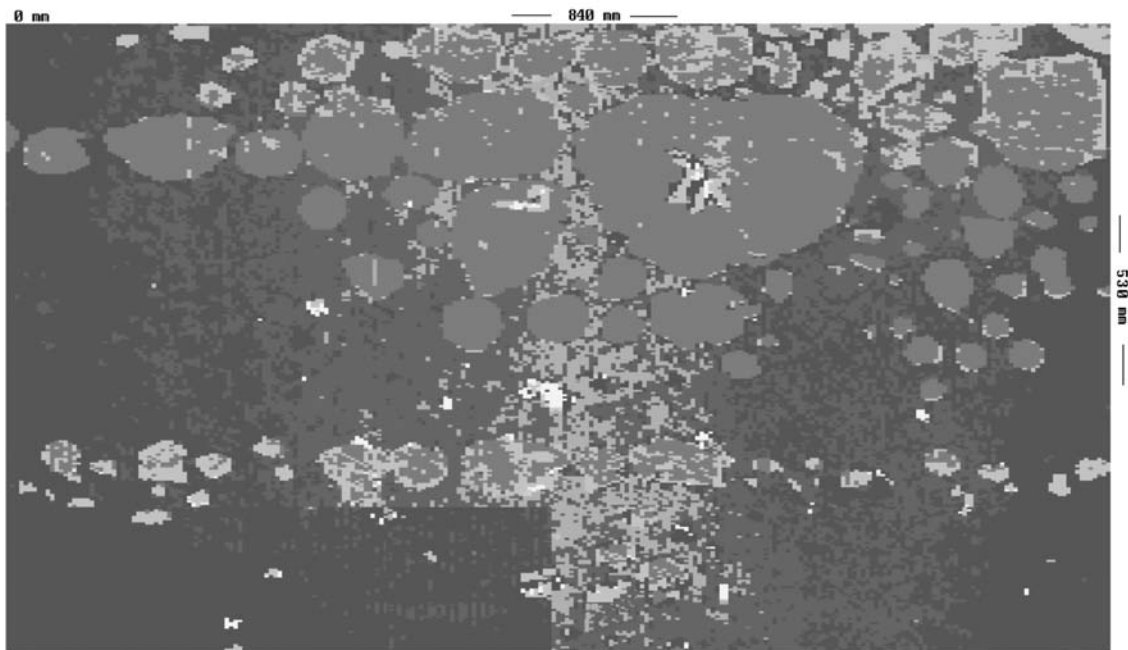


Рис. 8. Результаты ультразвукового сканирования участка исследуемого фрагмента обечайки теплообменника в зоне низкотемпературного сероводородного растрескивания после гидравлического нагружения пластической несплошности до 75 кгс/см^2

дольном и поперечном направлениях проката. Вместе с тем, нельзя исключить и влияние геометрических размеров несплошностей и их взаимодействие между собой на показания тензорезисторов (как видно из рис. 8, геометрические размеры несплошностей залегающих в продольном направлении несколько превосходят размеры аналогичных дефектов, расположенных в поперечном направлении). Кроме того, появление пластических перемычек, не выходящих на поверхность, между основным «пузырем» и рядом стоящими дефектами также может вносить существенную поправку в напряженно-деформированное состояние исследуемой области. Последнее по всей видимости и объясняет изменение угла наклона экспериментальной кривой на рис. 7, попадающей в расчетную область максимального изменения геометрического размера несплошности в сторону минимальной расчетной кривой 2. Так, при появлении пластических перемычек между «пузырем» и рядом стоящими дефектами в поперечном направлении, за расчетный диаметр должен приниматься размер с учетом близлежащих дефектов, связанных между собой пластическими перемычками, который, как видно из рис. 8, близок к 200...240 мм.

Более детальный анализ взаимодействия нескольких расслоений, расположенных на одном или различных уровнях по толщине стенки элемента [6–7], выходит за рамки данной статьи и представляет отдельную задачу.

Таким образом, как следует из анализа полученных экспериментальных данных, предложенная модель гидравлического выпучивания «пузыря» дает возможность для инженерной оценки

внутреннего давления в полости и может быть использована для дальнейшего анализа напряженного состояния стенки корпуса аппарата в зоне дефекта.

Что касается результатов тензометрирования наружной стенки в зоне «пузыря» (см. табл. 1, 2), то детальный их анализ будет выполнен в следующей статье.

В заключении следует еще раз подчеркнуть преимущества компьютеризированных систем контроля, позволяющих более точно прогнозировать возможный рост подобных дефектов и, как следствие, используя современные методы и подходы к оценке дефектостойкости сварных конструкций, определить оптимальные безопасные размеры подобного рода повреждений.

Выводы

Экспериментально подтверждена пригодность предложенной модели для инженерной оценки внутреннего давления в несплошности («пузыре») в зависимости от высоты ее пластического вздутия и геометрических размеров.

Выполненные исследования с дополнительным использованием современных компьютеризированных ультразвуковых систем контроля позволяют более точно оценить степень опасности дальнейшего развития взаимодействующих дефектов в зоне сероводородного растрескивания металла.

1. *Инженерный* подход к оценке допустимых размеров герметичных «пузырей» при техническом диагностировании нефтехимического оборудования, подвергнутого низкотемпературному водородному растрескиванию / В. П. Дядин, Е. А. Давыдов, А. Е. Литвиненко, Е. А. Гон-



- чар // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2005. — № 1. — С. 16–20.
2. *Балуева А. В., Дашевский И. Н.* Модель роста газонаполненной трещины в материале // Изв. РАН. МТТ. — 1994. — № 6. — С. 113–118.
 3. *Колачев Б. А.* Водородная хрупкость металлов. — М.: Металлургия, 1985. — 216 с.
 4. *Джонсон Х. Х.* Водород в металлах / Под ред. Г. Алефенда и И. Фелькля. — М.: Мир, 1981. — С. 35–68.
 5. *Дядин В. П.* Сопоставление значений ударной вязкости образцов Шарпи и Менаже при вязком разрушении // Автомат. сварка. — 2004. — № 4. — С. 24–29.
 6. *Оценка предельного состояния конструкций с водородными расслоениями / В. М. Кушнарченко, М. И. Климов, Н. В. Холзаков, И. Ф. Миргородский // ФХММ. — 1990. — № 1. — С. 76–80.*
 7. *К прогнозированию развития расслоений в конструкциях при наводороживании / В. М. Кушнарченко, О. И. Стеклов, М. И. Климов, Н. В. Холзаков // Там же. — 1988. — № 1. — С. 98–100.*

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
Киев

Поступила в редакцию
20.05.06

НОВЫЕ КНИГИ

Малайчук В. П., Мозговой О. В., Петренко О. М. *Інформаційно-вимірвальні технології неруйнівного контролю:* Навч. посіб. — Дніпропетровськ: РВВ ДНУ, 2004. — 240 с.



Навчальний посібник містить математичні основи теорії проектування інформаційно-вимірвальних технологій у задачах неруйнівного контролю, технічної діагностики й оцінки стану навколишнього середовища. Розглянуті алгоритми контролю та перевірки технічних характеристик вимірвачів, дослідження помилок і методи класифікації вимірвачів за їх точностними характеристиками. Синтезовані алгоритми порівняння стану технологій виробництва за кількістю бракованих виробів у задачах «до і після», «тут і там» і вирішальні правила вибіркового контролю.

Розроблено теоретичні засади формування вирішальних правил розпізнавання методами оцінок параметрів законів, групового обліку аргументів А. Г. Івахненка, гістограмним методом і на основі відновлених законів розподілу рядами згладжених дельта-функцій.

Викладена теорія виявлення змін контрольованих процесів, де розглядаються задачі фільтрації, виявлення стрибків середнього значення та потужності шуму, стрибкоподібних змін функцій і законів розподілу.

Сформульовані також завдання для самостійної роботи студентів і теми курсових проектів.

Даний навчальний посібник виданий у такий спосіб, щоб при роботі з ним він міг перетворитися на індивідуальний конспект лекцій студента, на його особистий рукописний звіт про виконання навчальних завдань, про проведення комп'ютерних досліджень і про результати обчислювальних експериментів.

Малайчук В. П., Мозговой А. В. *Математическая дефектоскопия:* Днепропетровск: Системные технологии, 2005. — 420 с.

Большинство задач неразрушающего контроля связано с обработкой измерений, которые по своей физической природе являются случайными величинами. Измерения содержат информацию о состоянии контролируемых объектов и их числовых характеристик. Причинами случайности измерений являются шумы измерительных приборов, случайные изменения исходных материалов, неконтролируемые изменения технологических процессов, влияние окружающей среды. Чтобы получить информацию о состоянии контролируемых объектов, необходимо обработать измерения, т. е. путем их преобразования по определенным правилам оценить показатели, прямо или косвенно характеризующие контролируемые объекты. Монография посвящена задачам обработки измерений и формирования правил принятия решений о состоянии объектов или о изменении состояний.

Наиболее эффективные технологии неразрушающего контроля создаются совместными усилиями специалистов, которые разрабатывают или эксплуатируют объекты контроля, и специалистами, которые проектируют информационно-измерительные устройства и системы. Знания, систематизированные и изложенные в монографии, будут полезны как тем, так и другим, а также студентам вузов.



По вопросу приобретения монографии и учебного пособия обращаться по адресу:

**НПП «Машиностроение», г. Днепропетровск,
факс 38(0562)34-04-93, тел. 38(0562) 35-07-49, тел. 38(056) 372-85-04 (многоканальный)**



ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Ю. В. ВИТРУК, В. С. ЕРЕМЕНКО

Рассмотрены вопросы повышения информативности неразрушающего контроля композиционных материалов методом свободных колебаний. Для расчета диагностических параметров предложено использовать спектр метрик, который позволяет учитывать не только амплитуды, но и фазы спектральных составляющих свободных колебаний. На основе экспериментальных данных показаны преимущества полученных диагностических параметров.

Observed questions of increase informations non-destructive testing composition materials of free vibration method. For estimate diagnostics parameters in these article produced use spectrum of metrics, which allows to include amplitudes and phases of spectral components of free vibration. Showed advantages these diagnostics parameters on experimental dates.

Метод свободных колебаний (МСК) основан на возбуждении в зоне контроля изделия свободно затухающих упругих колебаний широкого диапазона частот и сравнении спектров принятых сигналов на дефектных и бездефектных (эталонных) участках. В настоящее время все существующие МСК-дефектоскопы регистрируют и анализируют амплитудный спектр возбуждаемого сигнала. Однако амплитуда не является надежным информативным параметром вследствие влияния случайных и неконтролируемых факторов (степени прижатия преобразователя к поверхности изделия, изнашивания контактной поверхности бойка, состояния поверхности объекта контроля). Поэтому для повышения достоверности контроля возникает задача нахождения дополнительных информативных признаков, чувствительных к дефектности изделия. Одним из этих признаков может быть фазовый спектр свободных колебаний, который в меньшей степени зависит от названных выше факторов.

Исследованиям фазовых спектров свободных колебаний при дефектоскопии композиционных материалов посвящены работы [1, 2], в которых на основе экспериментальных данных показано, что для отдельных типов дефектов фазочастотная характеристика более информативная, чем амплитудно-частотная. Но в этих работах фазовый и амплитудный спектры оценивали отдельно, а не как совместные комплексные информативные признаки. Это, в первую очередь, может привести к появлению погрешностей при расчетах фазы гармоник, которые имеют малую энергию и в значительной мере подвержены влиянию шумов в электрическом и акустическом трактах МСК-дефектоскопов.

Кроме того, при измерении фазового спектра надо учитывать погрешность от нестабильности

времени синхронизации (т. е. от случайного изменения момента времени выборки информативного сигнала), которая в некоторых случаях может быть довольно существенной, в особенности на высших гармониках анализа (рис. 1).

В работах [3, 4] теоретически доказано, что в общем случае для виброакустической диагностики амплитудный спектр не является оптимальным диагностическим признаком, поэтому предложено строить диагностическое пространство признаков на основе соответствующих действительной и мнимой компонент преобразования Фурье информативного сигнала, и с помощью критерия Фишера доказано, что использование данных признаков дает возможность существенно повысить достоверность диагностики. Так как приведенные работы носят обобщающий теоретический характер, авторами была поставлена задача подтвердить экспериментальными исследованиями данные теоретические результаты.

Рассмотрим возможность применения диагностических признаков, полученных на основе компонент квадратурного спектра (соответствующих действительной и мнимой части преобразования Фурье) свободных колебаний для дефектоскопии многослойных композиционных материалов. Преобразование Фурье отображает информативный

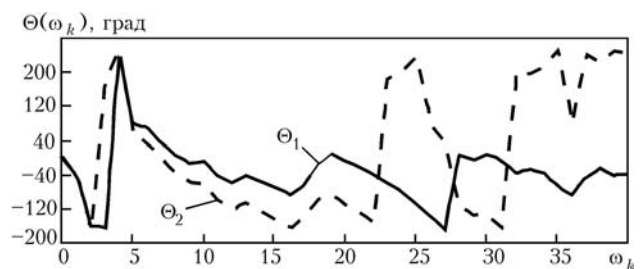


Рис. 1 Фазовый спектр свободных колебаний в дефектной зоне (θ_1) и спектр этого же сигнала, сдвинутого во времени (θ_2)



сигнал, который представляет собой действительную функцию времени, в комплексную функцию частоты. Таким образом, квадратурный спектр нужно рассматривать как вектор в трехмерном пространстве, где каждой гармонике будут соответствовать три координаты $S_R(\omega_k)$, $S_J(\omega_k)$, ω_k , где S_R — соответствующее действительное значение k -й гармоники; S_J — мнимое значение k -й гармоники; ω_k — ее частота. Примеры таких спектров свободных колебаний, полученных в бездефектной и дефектной зоне сотовой панели толщиной 20 мм, приведены на рис. 2. Дефектом служит искусственное расслоение между сотовым наполнителем и углепластиком диаметром 20 мм.

Приведенные спектры составляют множество признаков, которые являются более информативными по сравнению с амплитудным спектром, но визуальное сравнение квадратурных спектров между собой является довольно сложной задачей.

Числовым выражением сравнения спектров Фурье двух сигналов из бездефектной и дефектной зоны в трехмерном пространстве может служить массив метрик (евклидовых расстояний) [5], рассчитанных между соответствующими точками спектров.

Рассмотрим векторное изображение гармоник двух сигналов, полученных в дефектной и бездефектной зонах, которые отвечают некоторой частоте ω_i . Вектор OA соответствует гармонике в бездефектной зоне, а вектор OB — в дефектной (рис. 3).

Разностью между амплитудами двух гармоник является расстояние DB . При изменении фазового угла $\Delta\phi$ между гармониками величина DB не изменится, а при одинаковой амплитуде обеих гармоник будет равна нулю. В отличие от вектора DB отрезок AB — метрическое расстояние между этими гармониками в евклидовом пространстве — будет учитывать фазовый угол $\Delta\phi$ и иметь отличные от нуля значения даже при одинаковых амплитудах этих гармоник. Метрический спектр двух сигналов может быть рассчитан по следующей формуле:

$$M(\omega_k) = \sqrt{(S_{2R}(\omega_k) - S_{1R}(\omega_k))^2 + (S_{2J}(\omega_k) - S_{1J}(\omega_k))^2},$$

где $S_{1R}(\omega_k)$, $S_{2R}(\omega_k)$ — действительные спектры колебаний соответственно в эталонной (бездефектной) и дефектной зонах; $S_{1J}(\omega_k)$, $S_{2J}(\omega_k)$ — мнимые спектры колебаний соответственно в эталонной и дефектной зонах.

Принятие решения о наличии дефекта на основе вычисления метрического спектра двух сигналов может быть более эффективным, поскольку таким образом учитывается фазовая и амплитудная информация, кроме того, в отличие от квад-

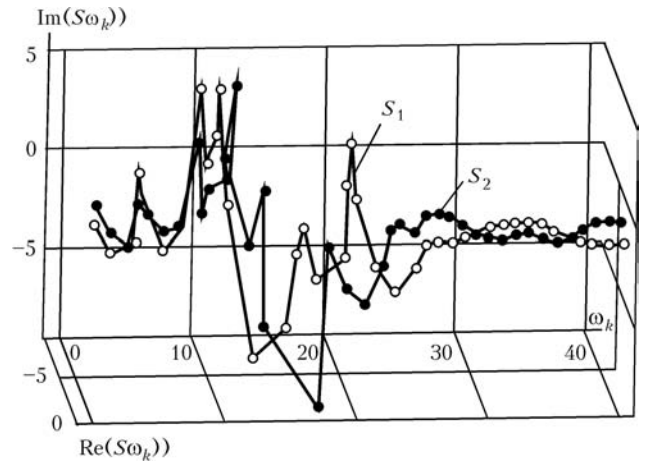


Рис. 2. Изображение квадратурных спектров сигналов в бездефектной S_1 и дефектной зонах S_2

ратурного этот спектр не является двумерным массивом.

Учитывая то, что влияние дефектов на спектральные компоненты не одинаковое, в современных методиках, применяющихся при контроле изделий методом свободных колебаний, для повышения чувствительности используют только составляющие спектра, которые наиболее сильно изменяются. Эти гармоники вычисляют на основе расчетов разностного амплитудного спектра и сравнения его составляющих с заданными пороговыми уровнями. Кроме того, используют также и обобщенные параметры, которые характеризуют отличия исследуемых спектров [6].

Рассмотрим разностный амплитудный спектр и спектр метрик (рис. 4) для полученных выше спектров свободных колебаний в дефектной и бездефектной зонах сотовой панели.

Как видно из приведенного рисунка, разностный спектр дает только две информативных гармоники, а спектр метрик с учетом фазовой информации увеличивает их количество до 12. Информативны в этих спектрах те гармоники, которые превышают определенный пороговый уровень (0,35), т. е. имеют наибольшие изменения по абсолютному значению в дефектной области сравнительно с бездефектной (эталонной).

Для проверки эффективности использования метрического спектра были проведены эксперименты на образцах панелей композитов с сотовым

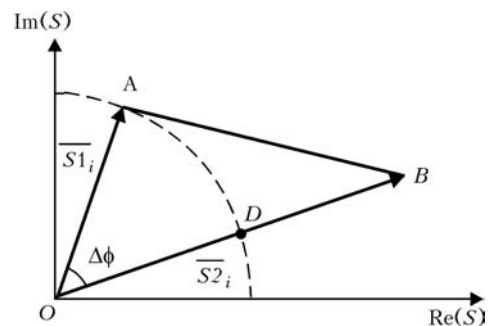


Рис. 3. Векторное изображение гармоник

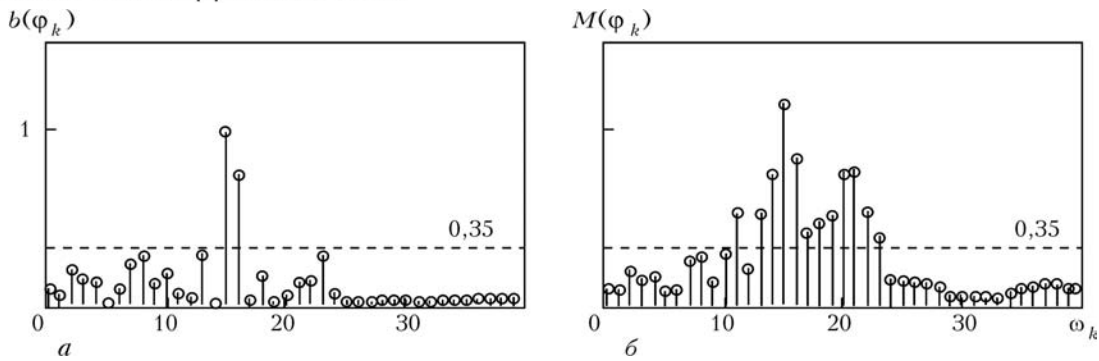


Рис. 4. Спектры разностей амплитудный (а) и метрик (б)

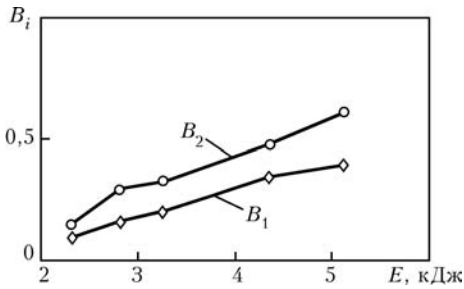


Рис. 5. Зависимость обобщенных параметров B_i от энергии удара

наполнением ПСП-1 и обшивкой на основе стеклоткани Т42/1-76. Моделями дефектов служили зоны с повреждениями, нанесенными точечным ударом с нормированной энергией в диапазоне от 2,0 до 5,1 кДж. По спектрам свободных колебаний в этих зонах, а также в неповрежденной зоне панелей рассчитывали разностный и метрический спектры.

В качестве параметра, по которому проводили оценку повреждения композитной панели, использовали обобщенные параметры B_i [5]:

$$B_1 = \sum_k b(\omega_k), \quad B_2 = \sum_k M(\omega_k),$$

где $b(\omega_k)$ — значение модулей разностей гармоник амплитудных спектров, которые превышают заданный порог; $M(\omega_k)$ — значение гармоник метрического спектра, которые превышают этот же порог.

На рис. 5 приведена зависимость этих обобщенных параметров от энергии, с которой наносился удар на исследуемую панель.

Нац. авиац. ун-т,
Киев

Зависимость параметра B_2 имеет характеристику с более высокой крутизной по сравнению с параметром B_1 , т. е. параметры, полученные на основе метрического спектра, более чувствительны к дефектности контролируемого изделия.

Выводы

Применение спектра метрик в методиках контроля методом свободных колебаний позволяет учитывать фазы гармонических составляющих, что существенно повышает информативность неразрушающего контроля.

Обобщенные параметры, рассчитанные на основе метрического спектра, имеют более высокую чувствительность к дефектности изделия, по сравнению с параметрами, используемыми в современных методиках МСК-контроля.

1. Методика выбора информативных параметров сигналов при разработке акустического метода свободных колебаний / В. П. Афанасьев, А. В. Мозговой, Д. А. Рапопорт, Н. А. Столярова // Дефектоскопия. — 1990. — № 4. — С. 19–24.
2. Мозговой А. В., Ахметшин А. М., Рапопорт Д. А. Фазочастотный акустический метод дефектоскопии слоистых изделий из полимерных материалов // Там же. — 1988. — № 4. — С. 50–55.
3. Гельман Л. М., Удовенко Л. Н. Оптимальное использование преобразования Фурье для технической диагностики // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 4. — С. 13–16.
4. Гельман Л. М. Диагностика сигналов: сравнение обеих компонент преобразования Фурье и спектральной плотности мощности // Там же. — 2006. — № 2. — С. 26–29.
5. Трахтман А. М. Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов. — М.: Сов. радио, 1972. — 352 с.
6. Применение спектрального анализа в низкочастотных акустических дефектоскопах / Ю. В. Ланге, С. И. Воропаев, В. Ф. Мужичкий и др. // Там же. — 1995. — № 10. — С. 74–83.

Поступила в редакцию
08.02.06



НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВНУТРЕННЕГО РЕЗЕРВУАРА ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ХРАНИЛИЩА ЖИДКОГО АММИАКА В «СЕВЕРОДОНЕЦКОМ ОБЪЕДИНЕНИИ АЗОТ»

В. А. ТРОИЦКИЙ, Ю. Н. ПОСЫПАЙКО, И. Я. ШЕВЧЕНКО В. И. КАРМАЗИН,
Г. Е. КОСТЕНКО А. И. ЛАЗАРЕНКО

Описаны основные процедуры комплексного технического освидетельствования резервуаров большого объема для хранения жидкого аммиака: визуально-оптический контроль внутренней поверхности резервуара, выявление и оценка неровностей на стенке и днище, уточнение объемов применения других видов контроля; неразрушающий контроль сварных соединений и металла стенки и днища резервуара ультразвуковым, магнитопорошковым и капиллярным методами; определение механических характеристик металла; металлографические исследования и химический анализ сварных соединений и основного металла.

The paper presents the main procedures of an integrated technical examination of large-volume tanks for liquid ammonia storage: visual-optical inspection of the tank inner surface, detection and evaluation of the unevenness on the wall and the bottom, more precise determination of the scope of application of other inspection techniques; NDT of welded joints and metal of the tank wall and bottom by ultrasonic, magnetic powder and capillary techniques; determination of metal mechanical characteristics; metallographic examination and chemical analysis of welded joints and base metal.

Введение. Проведение периодических комплексных технических освидетельствований вертикальных цилиндрических стальных изотермических хранилищ жидкого аммиака является необходимым условием их безопасной эксплуатации. Основная цель комплексного технического освидетельствования хранилища это определение его технического состояния, возможности дальнейшей безопасной эксплуатации, сроков последующих обследований, необходимости ремонта или вывода хранилища из эксплуатации.

Комплексное техническое освидетельствование изотермического хранилища жидкого аммиака в ЗАО «Северодонецкое объединение АЗОТ» в 2004 г. выполнили ЗАО «Северодонецкий ОРГХИМ» совместно с Отделом неразрушающего контроля качества сварных металлоконструкций Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и Исследовательской лабораторией металлов и технической диагностики ЗАО «Северодонецкое объединение АЗОТ».

Основой комплексного технического освидетельствования являются процедуры неразрушающего контроля качества металла и сварных соединений.

Работы по неразрушающему контролю этого резервуара включали:

визуально-оптический контроль внутренней поверхности резервуара, выявление и оценка неровностей (выпуклостей, вмятин, хлопунгов и т. п.) на стенке и днище внутреннего резервуара,

уточнение объемов применения других видов контроля;

неразрушающий контроль сварных соединений и металла *стенки* внутреннего резервуара на высоту первого пояса: ультразвуковой контроль (УЗК), магнитопорошковый контроль (МПК), капиллярный контроль (КК);

неразрушающий контроль сварных соединений и металла *днища* внутреннего резервуара: УЗК, МПК;

определение механических характеристик металла на образцах, изготовленных из вырезанного из днища образца-свидетеля со сварным швом;

металлографические исследования сварных соединений на образцах, изготовленных из вырезанного из днища образца-свидетеля с нахлесточным сварным швом;

металлографические исследования металла стенки на Т-образных швах между 1- и 2-м поясами методом реплик;

химический анализ металла, включая количественный анализ содержания водорода в металле.

Нормативной базой комплексного технического освидетельствования изотермического хранилища жидкого аммиака являются:

ДСТУ 4046-2001 «Оборудование технологическое нефтеперерабатывающее, нефтехимических и химических производств. Техническое диагностирование. Общие технические требования» [1];

РД 03-410-01 «Инструкция по проведению комплексного технического освидетельствования



изотермических резервуаров сжиженных газов» [2];

ДСТУ, ГОСТ, ОСТ на отдельные виды контроля.

Характеристика объекта контроля. По конструктивному решению изотермическое хранилище жидкого аммиака представляет собой двустенный вертикальный цилиндрический резервуар, изготовленный полистовым способом, располагаемый в железобетонном каземате (рис. 1).

Внутренний резервуар, в котором непосредственно хранится жидкий аммиак, изготовлен из низколегированной стали и рассчитан на гидростатическую нагрузку хранящегося продукта и на внешнее давление сыпучего теплоизоляционного материала. Для обеспечения устойчивости стенки в резервуаре установлены кольцевые ребра жесткости. Он концентрически расположен внутри наружного резервуара. Стенка внутреннего резервуара собрана из крупногабаритных листов (около 2,0×6,0 м). Все сварные соединения выполнены в стык. Толщина стенки внутреннего резервуара составляет (по поясам): 16-14-13-12-10-10-10-12-12 мм — всего 10 поясов, высотой 2000...2050 мм каждый.

Наружный резервуар изготовлен из низкоуглеродистой стали. Он предохраняет теплоизоляцию от повреждения и проникновение влаги и рассчитан на некоторое избыточное давление, атмосферные нагрузки (снег, ветер), вес теплоизоляции и несущих конструкций. Толщина стенки наружного резервуара составляет 7 мм (1–6 пояса) и 6 мм (6–15 пояса).

Межстенное пространство между наружным и внутренним резервуарами заполнено тепловой изоляцией из вспученного перлитового песка. В межстенное пространство постоянно подается газообразный азот для осушки теплоизоляции в процессе эксплуатации. Поток азота используется также как носитель для регистрации возможного появления аммиака в межстенном пространстве.



Рис. 1. Общий вид сварного резервуара для хранения жидкого аммиака

Для проведения работ внутри хранилища в нижней части стенки и на крыше предусмотрены люки-лазы. Хранилище оснащено трубопроводами ввода и вывода сжиженного и газообразного продуктов, защитными устройствами от превышения давления и образования вакуума, контрольно-измерительными приборами и прочим оборудованием.

Технические характеристики внутреннего резервуара: диаметр днища — 30050 мм; высота стенки — 21000 мм; объем резервуара — 16846 м³; количество хранимого продукта — 10000 т; температура хранимого продукта — минус 33 °С; давление в резервуаре — 3...7 кПа; марка стали листов стенки — N-TVF33 (Япония), отечественный аналог — 16ГС, ГОСТ 5520–79; марка стали листов днища и крыши — N-TVF30N (Япония), отечественный аналог — 09Г2С, ГОСТ 5520–79.

Изотермическое хранилище жидкого аммиака изготовлено поэлементно и поставлено фирмой ТЕС Kawasaki (Япония). Оно смонтировано на площадке производства аммиака 1-А СГПП «Объединение Азот» в 1973–1974 гг.

Визуальный контроль. Визуальный контроль проведен в соответствии требованиями ДСТУ ISO 17637–2003 [3] с целью выявления и определения размеров дефектов или повреждений, образовавшихся в процессе эксплуатации в основном металле и сварных соединениях.

Задача визуального контроля согласно ДСТУ 4046–2001 [1] — выявление следующих дефектов:

в основном металле: трещин, надрывов, коррозии стенок, выпучин, гофров, раковин, язв, механических повреждений поверхности, отслоений и других поверхностных дефектов, образовавшихся или получивших развитие в процессе эксплуатации;

в сварных швах: дефектов сварки, таких как: трещины всех видов и направлений, свищей и пористости наружной поверхности шва, подрезов, наплывов, прожогов, незаплавленных кратеров, коррозии, несоответствия формы и размеров швов требованиям технической документации;

видимых деформаций конструктивных элементов: коробления, провисания, отклонения от первоначального положения.

Геометрические размеры сварных швов проверяли на соответствие требованиям ГОСТ 5264–80 [4]:

стыковые швы стенки: тип шва С25 (табл. 29: $s_1 = 16$, ширина валика усиления шва $e = 14 \pm 3$, высота валика усиления шва $g = 0,5^{+2,0}_{-0,5}$);

уторный угловой шов: тип шва Т8 (табл. 50: $s_1 = 16$, $s_2 = 7$, высота катета $e = 12 \pm 3$, ширина катета 2,4...8);

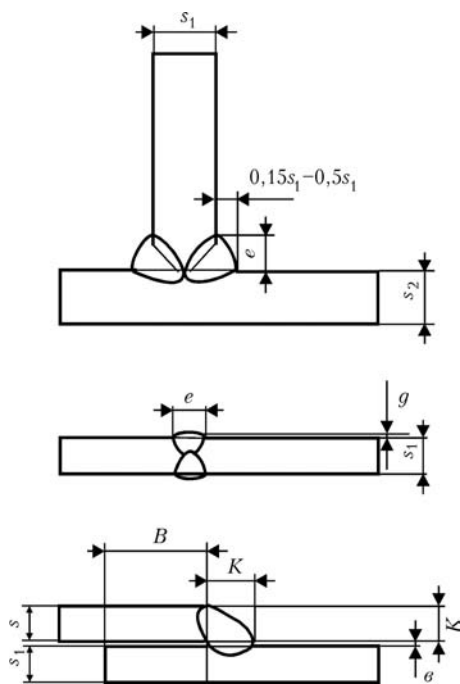


Рис. 2. Требования к размерам сварных соединений

нахлесточные швы днища: тип шва Н1 (табл. 53: $s_2 = 7$, минимальный размер катета $K = 5$, $B = 8 \dots 40$, $e = 0 + 1,5$).

Перед проведением контроля поверхность сварных швов и околошовная зона шириной по 100 мм от шва была зачищена с помощью мягких лепестковых наждачных кругов. Шероховатость зачищенных под контроль поверхностей составляла не более $R_a 12,5$ ($R_z 80$) по ГОСТ 2789-73.

При визуальном контроле использовалось следующее вспомогательное оборудование: лупы просмотровые (2* - или 3*-кратное увеличение); лупы измерительные по ГОСТ 25706-83; линейки измерительные металлические по ГОСТ 427-75; штангенциркули по ГОСТ 166-89; универсальные шаблоны сварщика УШС-3 по ТУ 102.338-83; щетки металлические и волосяные для зачистки; светильники переносные; маркеры; бинокль (для осмотра металлоконструкций стенки и крыши).

В результате тщательного визуального контроля установлено следующее.

1. Недопустимые дефекты основного металла и сварных швов, указанные в п. 5.2.9. ГОСТ 4046-2001 [1], не выявлены.

2. Геометрические размеры сварных швов не всегда соответствовали требованиям ГОСТ 5264-80 [4]. Однако их ремонт сваркой был признан нецелесообразным.

3. Сварной шов на листе № 57 протяженностью около 100 мм значительно отличался от требований табл. 53 ГОСТ 5264-80 [4] (катет горизонтальный $\cong 2$ мм, провар 2...3 мм). Участок забракован и отремонтирован сваркой (с предварительной механической выборкой металла шва).

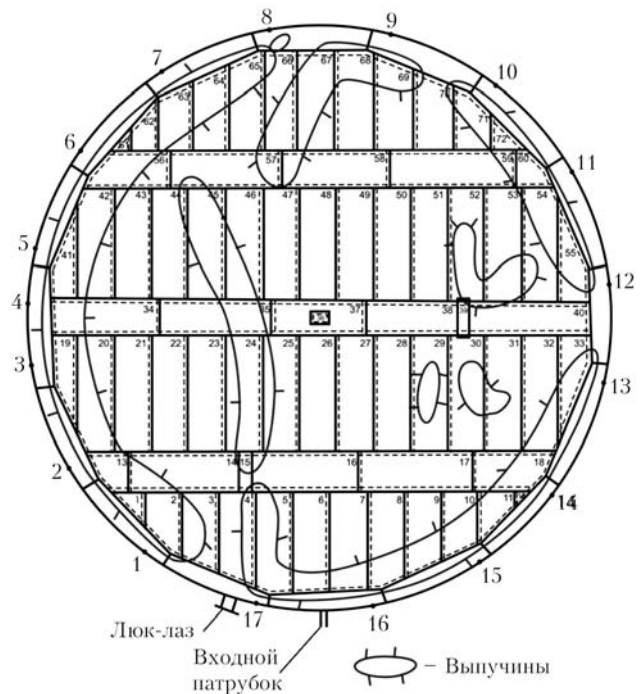


Рис. 3. Схема дна внутреннего резервуара: 1-17 — вертикальные сварные соединения 1-го пояса стенки

4. На днище расположены выпучины и хлопунны высотой до 100 мм, площадью 4...20 м² (рис. 3) как результат остаточной деформации днища после его «подъема» повышенным давлением в межстенном пространстве изотермического хранилища.

5. На 9- и 10-м поясах стенки внутреннего резервуара расположены две выпучины размером около 1,5×4,0 м и высотой около 200 мм, частично переходящие в куполообразную крышу. Выпучины не имеют резких перегибов, переломов и разрывов.

Магнитопорошковый контроль. Магнитопорошковый контроль проведен в соответствии с требованиями ГОСТ 21105-87[5], ДСТУ 2954-94 [6], ОСТ 26-01-84 [7] и «Технологической инструкции по магнитопорошковому контролю сварных соединений днища изотермического резервуара» [8] с целью выявления поверхностных и подповерхностных трещин различного происхождения, волосовин, надрывов, закатов, непроваров и других дефектов сварных соединений и околошовной зоны. При разработке инструкции [8], кроме нормативных документов [5-7], использован многолетний опыт работ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ в области магнитного контроля, обобщенный в работе [9].

Магнитопорошковому контролю подвергнуты: нахлесточные сварные соединения центральной части днища — 100 %;

стыковые сварные соединения листов окрайка днища и нахлесточные сварные соединения листов окрайка и центральной части днища — 100 %;

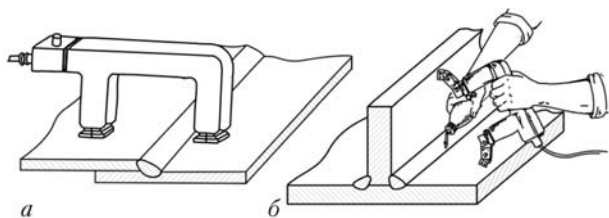


Рис. 4. Схема намагничивания сварных соединений с помощью приставного электромагнита: а — нахлесточного шва; б — уторного шва

угловой уторный шов — 100 %;
 вертикальные стыковые сварные соединения 1-го пояса стенки — выборочно, около 20 %;
 горизонтальное стыковое сварное соединение 1-го и 2-го поясов стенки — выборочно, около 20 %.

Магнитопорошковый контроль выполнен с помощью намагничивающих устройств дефектоскопов «Parker» (США) и ПМД-70 (НПО «Волна», Молдова).

Способ контроля — в приложенном поле. Способ намагничивания сварного соединения — продольное (полюсное) с помощью приставного электромагнита. Напряженность магнитного поля между полюсами — не менее 80 А/см. Нанесение магнитного порошка на контролируемую поверхность осуществлялось «сухим» способом. Применен магнитный порошок Ferromag фирмы Ely Chemical (Великобритания).

Для создания белого фона, контрастного с магнитным порошком, применена белая меловая суспензия в аэрозольной упаковке, изготовленная в НППФ «ИФХ-КОЛОП» (Киев).

Для проверки работоспособности всей системы магнитопорошкового контроля каждый час использовали контрольные образцы: образец Бертольда и контрольный образец предприятия (из комплекта дефектоскопа ПМД-70).

В результате магнитопорошкового контроля недопустимые дефекты сварного шва и околошовной зоны не выявлены.

Ультразвуковой контроль. Ультразвуковой контроль проведен в соответствии с требованиями ГОСТ 14782–86 [10], ОСТ 26–2044–83 [11] и «Технологической инструкции по ультразвуковому контролю нахлесточных и угловых сварных соединений днища изотермического резервуара» [12] с целью выявления внутренних плоскостных и объемных дефектов. При разработке инструкции [12], кроме нормативных документов [10, 11], использован многолетний опыт работ ИЭС им. Е. О. Патона в области ультразвукового контроля [13].

Полному ультразвуковому контролю подвергнуты:

- нахлесточные сварные соединения центральной части днища;
- стыковые сварные соединения листов окрайка днища и нахлесточные сварные соединения листов окрайка и центральной части днища;

- угловой уторный шов;
- вертикальные стыковые сварные соединения листов 1-го пояса стенки;
- горизонтальное стыковое сварное соединение листов 1- и 2-го поясов стенки;
- T-образные пересечения первого горизонтального шва с вертикальными швами 1- и 2-го поясов стенки.

Ультразвуковой контроль выполнен с помощью дефектоскопов USN-52 («Krautkramer», Германия) и УД2-12 (НПО «Волна», Молдова).

Для контроля применены прямые и наклонные раздельно-совмещенные преобразователи с рабочей частотой в диапазоне 2,5...5,0 МГц и углом ввода 45°, причем угловые преобразователи для контроля нахлесточных швов были специально изготовлены в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

Проверку основных параметров контроля проводили по контрольным образцам комплекта КОУ-2, настройка дефектоскопов и параметров контроля — на испытательных образцах с искусственными отражателями заданных размеров и местоположения.

Применены следующие способы контроля наклонным преобразователем:

- прямым лучом — для выявления дефектов в корне шва;
- однократно отраженным лучом — для выявления дефектов в середине и верхней части шва.

Для обеспечения акустического контакта преобразователя с поверхностью металла применена специальная гелеобразная смазка фирмы MR-Chemi (Германия).

- Настройка дефектоскопа включала:
 - настройку скорости развертки и глубиномера;
 - установку зоны контроля;
 - настройку чувствительности.

Нормы оценки качества в соответствии со СНиП 3.03.01–87 [14] приведены в табл. 1.

В результате ультразвукового контроля недопустимых дефектов в сварных соединениях стенки (на уровне 1-го пояса) и в уторном сварном соединении не выявлено.

К числу недопустимых дефектов по результатам УЗК отнесен один участок нахлесточного сварного соединения днища на листе № 13, протяженностью около 700 мм. Этот участок отремонтирован сваркой (после механической выборки металла шва) и проверен капиллярным и ультразвуковым контролем.

Капиллярный контроль. Капиллярный контроль проведен в соответствии с требованиями ГОСТ 18442–80 [15] и ОСТ 26–5–88 [16] для выявления невидимых или слабо видимых невооруженным глазом дефектов типа несплошностей материала, выходящих на поверхность (трещин, раковин, непроваров и т. п.).

Капиллярному контролю подвергнуты:



Таблица 1. Нормы оценки качества сварных соединений по результатам ультразвукового контроля

Сварные соединения	Толщина элемента, мм	Длина оценочного участка, мм	Фиксируемая эквивалентная площадь одиночного дефекта, мм ²		Допустимое число одиночных дефектов на оценочном участке, шт
			поисковая	браковочная	
Стыковые, угловые, тавровые, нахлесточные	6...10	20	5	7	1
	10...20	25	5	7	2
	20...30	30	5	7	3
	30...60	30	7	10	3

Таблица 2. Механические характеристики металла

Номер п/п	Номер образца	Дата испытания	Временное сопротивление разрыву, кгс/мм ²	Относительное сужение, %	Предел текучести, кгс/мм ²	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, кгс·м/см ²	Твердость <i>HВ</i>
1	636	21.06.04	44,0	84,0	32,0	37,0	28,5	131
2	637	21.06.04	44,0	85,0	31,0	36,0	25,7	131
3	640	23.06.04	44,0	82,0	30,0	39,0	> 12	131
4	641	23.06.04	44,5	84,0	31,5	37,0	> 12	131

сварные соединения мест врезки патрубков и люков — 100 %;

нахлесточные сварные соединения днища — выборочно, около 10 %;

стыковые вертикальные сварные соединения стенки — выборочно, около 25 %;

поверхность кольца люка, на которое устанавливается заглушка — 100 %.

Капиллярный контроль выполнен дефектоскопическими материалами фирмы MR-Chemie (Германия) в аэрозольной упаковке: пенетрант MR-68С; очиститель MR-85; проявитель MR-70.

Способ контроля — люминесцентно-цветной, люминесцентная лампа КД-33Л (НПО «Волна», Молдова). Чувствительность материалов проверяли на контрольном образце, изготовленном в соответствии с требованиями ГОСТ 23349–84 ([17], Приложение 3, образец № 2).

Капиллярный контроль включал последующие технологические операции:

очистку контролируемого участка;

нанесение на контролируемый участок пенетранта MR-68С (выдержка пенетранта на участке в течение не менее 20 мин);

удаление пенетранта с контролируемого участка ветошью, смоченной очистителем MR-85. Естественная сушка участка в течение 10...20 мин;

нанесение на контролируемый участок проявителя MR-70. Наблюдение за контролируемым участком в процессе высыхания проявителя — первые 5 мин. Второй осмотр контролируемого участка — через 20 мин после нанесения проявителя.

В результате капиллярного контроля в сварных соединениях стенки и днища недопустимые дефекты не выявлены. В нижней части кольцевого шва входного патрубка обнаружены раковины,

вскрытые при зачистке шва. Наплавленный металл шва в зоне раковин удален шлифованием абразивным кругом до полного исчезновения следов раковин. Затем произведены заварка шва и последующий капиллярный контроль.

Измерение механических характеристик металла. Механические характеристики металла измерены в лабораторных условиях на образцах, изготовленных из листов днища, по ГОСТ 6996–66 [18]. Испытания металла на разрыв выполнены на образцах типа I (Ø 3 мм) с помощью испытательной машины ИМ-4Р, на ударную вязкость — на образцах типа VII с V-образным надрезом с помощью маятникового копра МК-30М.

Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Металлографические исследования. Металлографические исследования проведены с целью изучения макро- и микроструктуры наплавленного металла шва и основного металла.

Металлографические исследования наплавленного металла шва и основного металла днища проведены в лабораторных условиях на шести образцах, изготовленных из пластин, вырезанных из днища внутреннего резервуара. Образцы приготовлены путем шлифования. Окончательная доводка поверхности выполнена алмазными пастами зернистостью 48/24, 14/10, 2/1. Травление шлифов 10 %-ным спиртовым раствором азотной кислоты.

При макроанализе наплавленного металла шва трещины, надрывы и другие дефекты в сварных соединениях не выявлены. Расстояние между пластинами нахлесточного сварного соединения составляет 0,2...1,5 мм, что отвечает требованиям ГОСТ 5264–80 (табл. 53, тип шва Н1).

Поверхность металла подвержена равномерной коррозии с глубиной язв 0,2...0,5 мм.

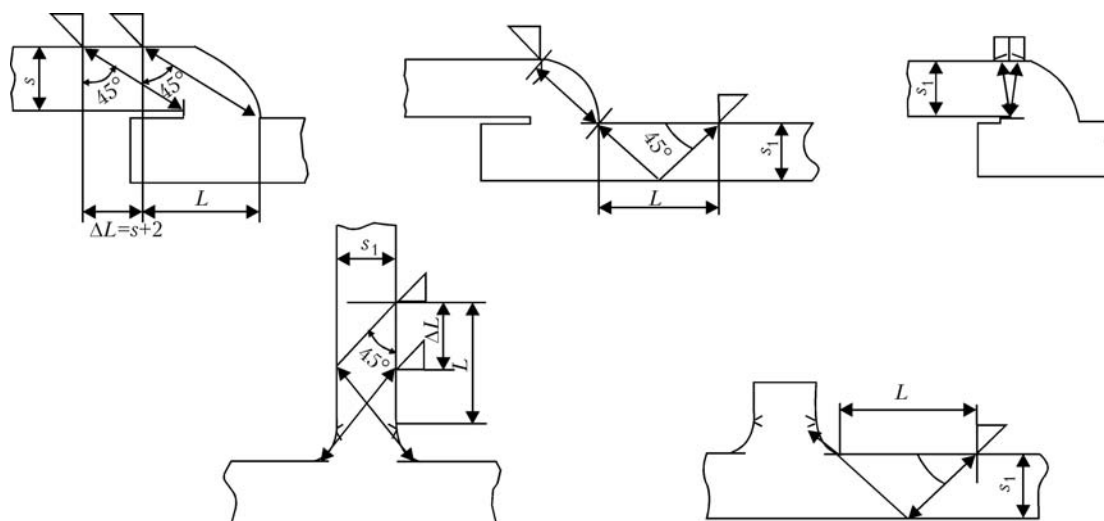


Рис. 5. Схема ультразвукового контроля сварных соединений

При изучении микршлифов сварных соединений на некоторых образцах в корне шва выявлены извилистые полости-«усы» глубиной до 0,8 мм. Их края имеют округлую форму, без образования трещин. Полости заполнены продуктами коррозии. Образовались полости-«усы», вероятнее всего, в процессе сварки, в результате выхода газов и паров металла из сварочной ванны.

Микроструктура наплавленного металла сварного шва — феррито-перлитная, мелкозернистая. В верхней части шва видны столбчатые кристаллы. Строение феррита игольчатое. В корне сварного шва микроструктура мелкозернистая.

В зоне термического влияния микроструктура металла — феррито-перлитная, переход от наплавленного металла к основному плавный. Микроструктура основного металла листов днища — феррито-перлитная. Величина зерен соответствует 9-10 балла по ГОСТ 6539–82. Наблюдается полосчатость структурных составляющих, соответствующая 2 баллу ГОСТ 6540–68.

Металлографические исследования наплавленного металла шва и основного металла стенки внутреннего резервуара проведены методом «оттиска» с поверхности с помощью полистирольных реплик и с помощью переносного микроскопа (без вырезания образцов со стенки). Для исследования были приготовлены девять зон (шлифов) в местах Т-образных пересечений вертикальных швов 1- и 2-го поясов стенки с горизонтальным швом.

Окончательная доводка поверхности шлифов выполнена алмазными пастами зернистостью 48/24, 14/10, 2/1. Использован микроскоп «Неофот-21», обеспечивающий увеличение $\times 100$ и $\times 250$.

При макроанализе шлифов размером 200×200 мм обнаружены неглубокие подрезы, расположенные по линии сплавления металла шва и основного металла, а также скопления микро-

пор. Эти незначительные дефекты образовались в процессе изготовления резервуара.

Микроструктура наплавленного металла сварных швов стенки — феррито-перлитная. В ряде образцов в зоне термического влияния сварного соединения обнаружены микронадрывы металла. Микроструктура основного металла стенки — феррито-перлитная. Величина зерен соответствует 8-9 баллу ГОСТ 5639–82. На одном из шлифов обнаружены поверхностные микротрещины, исчезнувшие при шлифовании на глубину 0,2 мм, а также скопление микропор; на другом — цепочка язв коррозионного происхождения.

В результате металлографических исследований установлено, что микроструктура, величина зерна, состояние межзеренных границ наплавленного металла шва и основного металла днища и стенки типичная для низкоуглеродистых сталей и их сварных соединений.

Химический анализ стали. Химический анализ образцов, вырезанных из днища внутреннего резервуара, показал, что металл соответствует отечественному аналогу сталь 10Г2 по ГОСТ 4543–71 (табл. 3). Химический анализ образцов металла днища на содержание водорода дал такие результаты: 0,0005...0,0006 % (мас.).

Выводы

По результатам неразрушающего контроля сварных соединений и основного металла внутреннего резервуара в ремонт переданы три участка: нахлесточного шва на листе № 13 (около 700 мм); нахлесточного шва на листе № 57 (около 100 мм); сварного шва входного патрубка (около 40 мм). Все названные участки отремонтированы и повторно проверены.

В сварных соединениях и основном металле внутреннего резервуара изотермического хранилища жидкого аммиака (позиция 1001-F, регистрационный номер 02652) средствами неразруша-



Таблица 3. Химический состав металла дна

Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
98,0	0,13	0,29	1,35	0,001	0,014	0,065	0,047	0,065	0,020	0,0007	0,013	0,037	0,022

ющего контроля недопустимых дефектов не обнаружено. Металлографические исследования, механические испытания образцов и химический анализ металла не выявили отклонений от требований к стали этого типа.

Внутренний резервуар изотермического хранилища жидкого аммиака (позиция 1001-F, регистрационный номер 02562) допущен к эксплуатации до 30 июня 2009 г.

1. ДСТУ 4046–2001. «Оборудование технологическое нефтеперерабатывающее, нефтехимических и химических производств. Техническое диагностирование. Общие технические требования».
2. РД 03-410–01. «Инструкция по проведению комплексного технического освидетельствования изотермических резервуаров сжиженных газов».
3. ДСТУ ISO 17637–2003. «Неразрушающий контроль сварных швов. Визуальный контроль соединений, выполненных сваркой плавлением».
4. ГОСТ 5264–80. «Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры».
5. ГОСТ 21105–87 «Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод».
6. ДСТУ 2954–94 «Сталь. Методы магнитного контроля».
7. ОСТ 26-01–84 «Швы сварных соединений стальных сосудов и аппаратов, работающих под давлением. Методика магнитопорошкового метода контроля».

8. Технологическая инструкция по магнитопорошковому контролю сварных соединений дна изотермического резервуара / Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2003 г. — 14 с.
9. Троицкий В. А. Магнитопорошковый контроль сварных соединений и деталей машин. — Киев: Феникс, 2002. — 300 с.
10. ГОСТ 14782–86 «Контроль неразрушающий. Швы сварные. Методы ультразвуковые».
11. ОСТ 26-2044–83 «Швы стыковых и угловых сварных соединений сосудов и аппаратов, работающих под давлением. Методика ультразвукового контроля».
12. «Технологическая инструкция по ультразвуковому контролю нахлесточных и угловых сварных соединений дна изотермического резервуара». — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2003. — 18 с.
13. Троицкий В. А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. — Киев, ИЭС им. Е. О. Патона, 1997. — 224 с.
14. СНиП 3.03.01–87. Несущие и ограждающие конструкции. — М.: 1988. — 190 с.
15. ГОСТ 18442–80 «Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования».
16. ОСТ 26-5–88 «Контроль неразрушающий. Цветной метод контроля сварных соединений, наплавленного и основного металла».
17. ГОСТ 18442–80 «Контроль неразрушающий. Дефектоскопы капиллярные. Общие технические требования и методы испытаний».
18. ГОСТ 6996–66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств».

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
 ЗАО «Северодонецкое объединение АЗОТ»
 ЗАО «Северодонецкий ОРГХИМ»

Поступила в редакцию
 07.07.2006

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Приглашаем Вас разместить рекламную информацию (ч/б или в цвете) в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» в 2006 г.

Редакция журнала принимает активное участие в конференциях по НК и специализированных выставках в качестве отдельного экспонента и распространяет дополнительные тиражи среди участников и посетителей конференций и выставок.

Будем рады Вашим предложениям.

Дополнительную информацию можно получить
 по тел.: (044) 271-23-90, 529-26-23; E-mail: journal@paton.kiev.ua



ВИХРЕТОКОВЫЕ МУЛЬТИДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

В. Н. УЧАНИН

Представлены новые вихретоковые преобразователи мультидифференциального типа, которые обеспечивают высокую чувствительность, разрешающую способность и селективность при выявлении поверхностных и подповерхностных дефектов разного типа. Представлены результаты исследования сигналов мультидифференциальных преобразователей и сформулированы их основные преимущества. Представлены примеры применения мультидифференциальных преобразователей для решения новых задач неразрушающего контроля.

New multidifferential type eddy current transducers are presented. Eddy current transducers provide high sensitivity, spatial resolution and selectivity in surface and subsurface different type flaw detection. The results of multidifferential eddy current transducers responses investigations are presented and main advantages are formulated. The examples of multidifferential eddy current probes application for solving of new tasks in nondestructive testing are presented.

Введение. В вихретоковой дефектоскопии широко используют дифференциальное включение измерительных обмоток вихретоковых преобразователей (ВТП). Это позволяет эффективно подавлять влияние мешающих факторов, в частности, изменений зазора между ВТП и контролируемой поверхностью, а также уменьшить влияние плавных изменения удельной электрической проводимости и толщины контролируемого изделия [1–3]. Ниже представлены ВТП, которые можно отнести к ВТП мультидифференциального типа. Такие ВТП используют дифференцирование второго порядка за счет получения выходного сигнала путем вычитания сигналов двух пар дифференциально включенных измерительных обмоток ВТП. В практике вихретоковой дефектоскопии такие ВТП используются относительно редко, что связано со сложной технологией их изготовления, в частности, с высокими требованиями к идентичности дифференциально включенных измерительных обмоток [4, 5]. В то же время наш многолетний опыт показывает, что на основе применения мультидифференциальных ВТП можно еще больше снизить влияние мешающих факторов и, соответственно, уменьшить отношение сигнал/шум. Особенно эффективно применение мультидифференциальных ВТП в низкочастотном диапазоне рабочих частот для выявления скрытых подповерхностных дефектов, что особенно актуально для авиации, энергетики и других отраслей. При этом получить хорошую чувствительность ВТП на низких рабочих частотах достаточно сложно, так как чувствительность индуктивных элементов ВТП зависит от рабочей частоты. В большинстве случаев для достижения хорошей глубины контроля увеличивают диаметры обмоток и общие размеры ВТП. Однако, при этом снижается разрешающая способность ВТП, что значительно ограничивает возможность

выявления локальных дефектов типа пор и коротких трещин. В представленных ниже мультидифференциальных ВТП хорошая глубина контроля достигается за счет увеличения расстояния между обмотками возбуждения и измерительными обмотками, которые для обеспечения высокой разрешающей способности выполнены относительно малого диаметра.

Параметры мультидифференциальных ВТП типа Леотест МДФ. Для решения ряда новых задач неразрушающего контроля в Центре «Леотест-Медиум» разработан комплект новых мультидифференциальных ВТП типа Леотест МДФ для контроля на разных рабочих частотах. ВТП отличаются размерами рабочей площадки, что обусловлено размерами используемых ферритовых сердечников. Использование ферритовых сердечников различного размера, в свою очередь, определяет различную глубину контроля и разрешающую способность. Обеспечение высокой чувствительности обмоток ВТП в диапазоне рабочих частот определяется выбором оптимального числа витков обмоток. Материал ферритового сердечника каждого ВТП выбран с высокой магнитной проницаемостью на конкретных рабочих частотах. Для обеспечения высокой чувствительности высокочастотных ВТП выбран материал ферритового сердечника с низкой электропроводностью. Разработанные ВТП с помощью стандартных разъемов типа Фишер или Лемо адаптированы для работы с дефектоскопами типа ELOTEST фирмы Rohmann и EddyMax фирмы Kontroltechnik GmbH, приборами Института Ферстера и фирмы Hocking NDT Ltd, MFEC-4 (Фраунгофер институт неразрушающего контроля, Саарбрюкен), прибором ОКО-1 (НПФ «Промпрылад», Киев). В табл. 1 представлены низкочастотные и высокочастотные мультидифференциальные ВТП типа Леотест МДФ.



Таблица 1. Низкочастотные и высокочастотные мультидифференциальные ВТП

Тип ВТП	Диаметр рабочей площадки, мм	Диапазон частот, кГц	Применение
Леотест МДФ 0501	5	500,0...6000,0	Выявление поверхностных трещин, пор, локальной коррозии и пр., в том числе в материалах с низкой электропроводностью (титановые сплавы, углеволоконные композиционные материалы).
Леотест МДФ 0502	5	20,0...150,0	Выявление поверхностных и приповерхностных трещин, пор, локальной коррозии в разных материалах. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности.
Леотест МДФ 0701	7	1,0...200,0	Выявление поверхностных и подповерхностных трещин, пор, локальной коррозии в разных материалах. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности. Выявление дефектов на глубине до 3 мм в неферромагнитных материалах.
Леотест МДФ 0901	9	0,4...300,0	Выявление поверхностных и подповерхностных трещин, пор, локальной коррозии в разных материалах. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности. Выявление дефектов на глубине до 5 мм в неферромагнитных материалах.
Леотест МДФ 1201	12,5	0,1...300,0	Выявление поверхностных и подповерхностных трещин, пор, локальной коррозии в разных материалах. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности. Выявление дефектов на глубине до 8 мм в неферромагнитных материалах.
Леотест МДФ 1202	12,5	1,0...1000,0	Выявление поверхностных трещин, пор, локальной коррозии в разных материалах. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности. Выявление дефектов в ферромагнитных материалах через зазор или слой защитного покрытия толщиной до 7...10 мм.
Леотест МДФ 1501	15	0,05...200,0	Выявление поверхностных и подповерхностных трещин, пор, локальной коррозии в разных материалах. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности. Выявление дефектов на глубине до 12 мм в неферромагнитных материалах.
Леотест МДФ 1502	15	1,0...800,0	Выявление поверхностных трещин, пор, локальной коррозии в разных материалах при автоматическом и ручном контроле с зазором относительно поверхности. Сочетание высокой разрешающей способности с большой шириной зоны контроля. Выявление дефектов в ферромагнитных материалах через зазор или слой защитного покрытия толщиной до 10...12 мм.
Леотест МДФ 1701	17	0,05...200,0	Выявление поверхностных и подповерхностных трещин, пор, локальной коррозии в разных материалах. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности. Выявление дефектов на глубине до 15 мм в неферромагнитных материалах.
Леотест МДФ 3301	33	0,05...200,0	Выявление поверхностных и подповерхностных трещин, пор, локальной коррозии в разных материалах. Автоматический и ручной контроль с зазором относительно поверхности. Выявление дефектов на глубине до 20 мм в неферромагнитных материалах.

Исследование сигналов мультидифференциальных ВТП. Представленные выше ВТП были успешно применены для решения многих сложных (в том числе авиационных) задач неразрушающего контроля. В частности, при их помощи проводится механизированный контроль колес самолетов «БОИНГ» на авиаремонтном заводе гражданской авиации и в аэропорту «Борисполь». Комплекс исследований мультидифференциальных ВТП был проведен в Отто-фон-Герике Магдебургском университете, в Уппсала университете (Швеция), Фраунгофер институте неразрушающего контроля (Саарбрюкен, Германия), фирме Тест Maschinen Technik (ТМТ) (Швармштедт, Германия) [10–12]. Во время этих исследований были определены основные преимущества разработанных ВТП, в частности:

- 1) высокая чувствительность к мелким длинным и коротким трещинам, а также к локальным дефектам типа поры или питинг;
 - 2) хорошее подавление первичного электромагнитного поля;
 - 3) хорошее подавление влияния зазора;
 - 4) высокая разрешающая способность;
 - 5) широкая зона контроля при высокой разрешающей способности;
 - 6) большая глубина контроля на низких рабочих частотах (при этом обеспечивается хорошее соотношение размеров к глубине контроля);
 - 7) высокая чувствительность при контроле через воздушный зазор или диэлектрический слой.
- На рис. 1 представлена типовая трехмерная презентация сигнала от мультидифференциального ВТП типа Леотест МДФ 1201 от локального

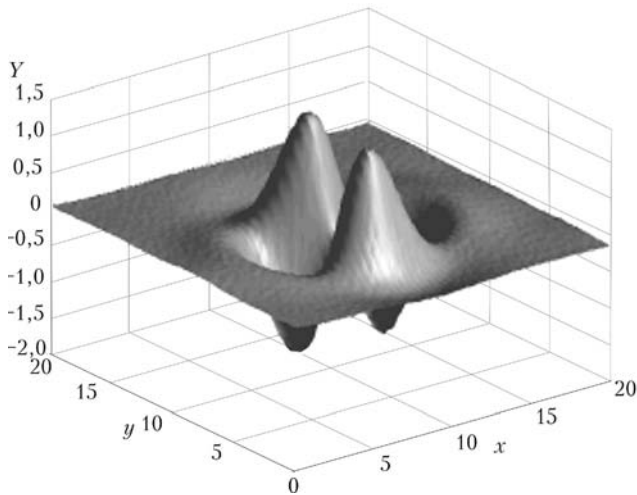


Рис. 1. Распределение сигнала мультидифференциального ВТП от локального дефекта

дефекта, имитированного сверлением диаметром 1мм [1]. Соответствующие двумерные дефектограммы от локального дефекта имеют вид четырехлепесткового изображения, каждый из лепестков которого отвечает зоне чувствительности соответствующей измерительной обмотки ВТП. Необходимо отметить, что благодаря несимметричному (относительно оси ВТП) распределению сигнала он будет сильно зависеть от направления сканирования и ориентации ВТП. В тоже время благодаря двойному дифференцированию сигнал мультидифференциального ВТП от дефекта, длина которого больше размеров ВТП, близок по форме к сигналу, характерному для абсолютного ВТП. Важным свойством мультидифференциальных ВТП является широкая зона контроля, так как такие ВТП по сути являются многоэлементными и захватывают при сканировании достаточно широ-

кую зону контроля. При этом реализуется достижение двух противоречивых и тяжело совместимых требований: высокая разрешающая способность и соответственно высокая чувствительность к локальным дефектам сочетается с большой шириной зоны, которая контролируется при одной траектории сканирования, что позволяет повысить производительность контроля. В практике это позволяет также уменьшить число каналов при построении многоканальных систем вихретокового контроля и, соответственно, их стоимость [11, 12, 15].

Во время исследования мультидифференциальных ВТП проводили сравнение их с известными низкочастотными ВТП типа MDK 33 фирмы Rohmann (Германия) на образцах с дефектами в виде подповерхностных пор разного диаметра и глубины залегания из меди при помощи универсального вихретокового дефектоскопа ELOTEST PL.E и системы двумерной визуализации на основе двухкоординатного сканирующего устройства [10]. Разрешающая способность и локальность контроля оценивалась по диаметру зон чувствительности на двумерной дефектограмме. Ставилась задача не только выявлять дефекты типа поры, но и обеспечить возможность измерять их параметры. Результаты сравнения приведены в табл. 2.

Таким образом, ВТП типа Леотест МДФ 1201 позволяет обеспечить выявление всех локальных дефектов диаметром 0,8 мм и более на глубине 4 мм при соотношении сигнал/шум больше 6 дБ. Стандартный ВТП такой дефект выявляет только на глубине 3 мм, на глубине 4 мм выявляет только дефект 1,5 мм. Кроме того, ВТП типа Леотест МДФ 1201 имеет значительно меньшие размеры, что особенно важно при контроле авиационных конструкций, и лучшую разрешающую способность.

На рис. 2 приведены примеры сигналов, полученных с помощью ВТП типа Леотест МДФ 1201 и дефектоскопа ELOTEST B1 (фирма Rohmann) на рабочей частоте 2 кГц [10]. Другие настройки прибора приведены на рис. 2. Трециноподобные подповерхностные дефекты смоделированы с помощью стандартного образца из алюминиевого сплава фирмы ATG (Прага, Чехия), с разных сторон которого были заложены дефекты с глубиной залегания $H_3 = 3$ и

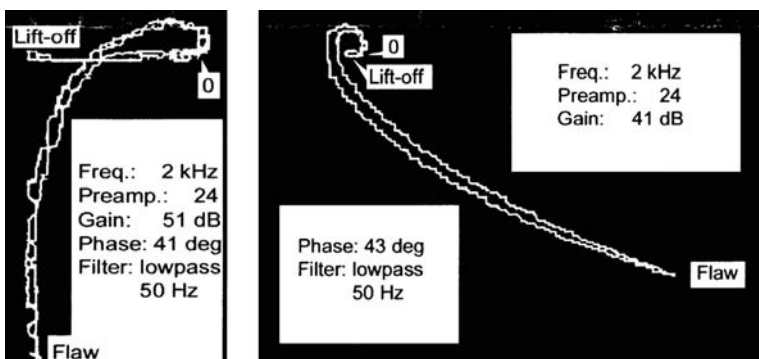


Рис. 2. Сигналы от подповерхностных дефектов в алюминиевой пластине с глубиной залегания 3 и 1 мм, а также от изменений зазора

Таблица 2. Сравнительные данные двух типов ВТП

Тип ВТП	Форма и размер рабочей площадки, мм	Чувствительность		Разрешающая способность (локальность), мм
		остаточная глубина при выявлении поры $\varnothing 0,8$ мм	поры, выявляемые на глубине 4 мм, мм	
Леотест МДФ 1201	Окружность $\varnothing 12$	Под пластиной толщиной 4 мм	$\varnothing 0,8$	≈ 3
MDK 33	Квадрат 25×25	Под пластиной толщиной 3 мм	$\varnothing 1,5$	$\approx 5,5$

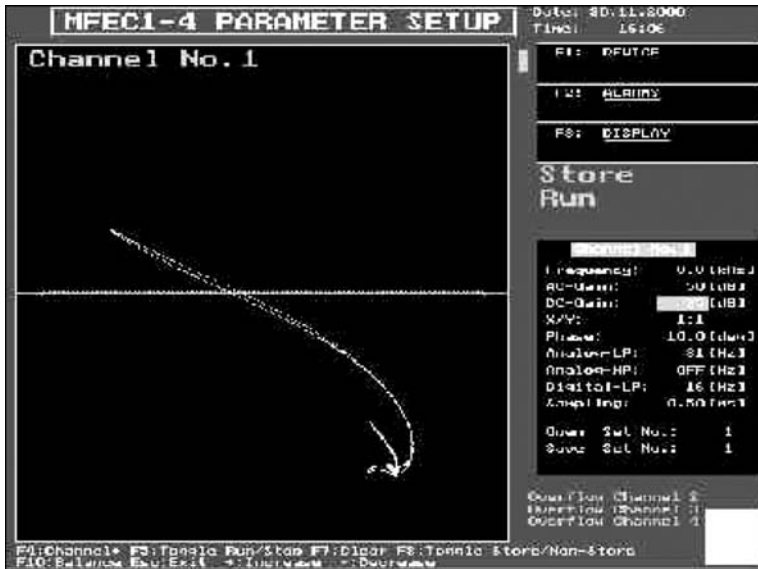


Рис. 3. Сигналы от подповерхностных дефектов в пластине из аустенитной стали с глубиной залегания 2 и 4 мм, а также от изменения зазора

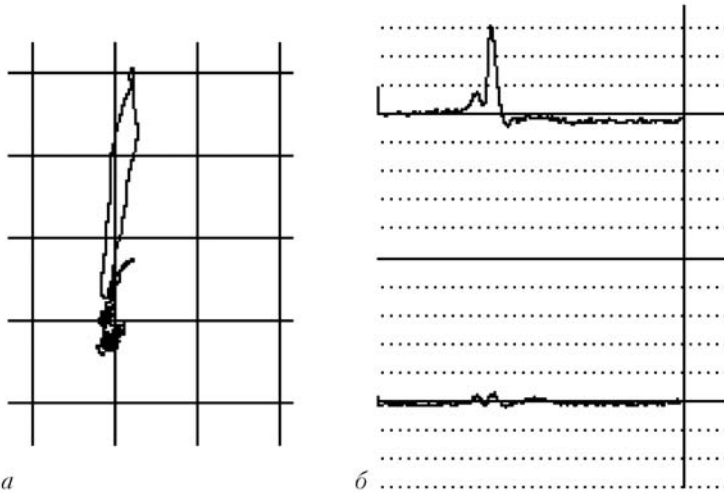


Рис. 4. Сигналы ВТП от дефекта типа трещина при контроле через слой покрытия толщиной 7 мм

1 мм. Для выявления дефектов с разной глубиной залегания было применено различное усиление. На этих рисунках сигнал от подповерхностных дефектов сравнивался с сигналом от полного (подъем ВТП на высоту более 100 мм) сигнала от зазора между ВТП и контролируемой поверхностью. На приведенных дефектограммах четко виден сигнал от подповерхностных дефектов и незначительный сигнал от изменения зазора (для $H_3 = 1$ мм и соответствующего усиления этот сигнал почти незаметен). Поворотом комплексной плоскости сигнал от изменений зазора был ориентирован в горизонтальном направлении в соответствии со стандартной методикой. При этом соотношение сигнала от дефекта к сигналу от изменений зазора (lift-off на рис. 2) даже для $H_3 = 3$ мм больше 6 дБ. Кроме того, они отличаются по фазе (направлению годографа сигнала в комплексной плоскости),

что дает дополнительные возможности для их разделения.

Подобные результаты были получены с помощью ВТП типа Леотест МДФ 1201 при подключении к управляемому компьютером дефектоскопу типа MFEC1-4 (Фраунгофер институт НК, Саарбрюкен) [10]. На рис. 3 показан экран компьютера с комплексной плоскостью сигналов ВТП. Сигналы получены с помощью образца из аустенитной стали толщиной 6 мм на рабочей частоте 8,8 кГц. На дефектограмме сверху до низу против часовой стрелки приведены сигналы от двух поверхностных тонких прорезей (первая — 4 мм глубиной и соответственно с глубиной залегания дефекта 2 мм и вторая — прорезь глубиной 2 мм и глубиной залегания 4 мм) и сигнала от полного изменения зазора (отрегулировано поворотом комплексной плоскости в горизонтальном направлении).

В практике неразрушающего контроля существуют задачи, где применению вихретоковых методов нет альтернативы. В частности, большой проблемой является задача обнаружения дефектов, скрытых под слоем защитного диэлектрического покрытия. В этом случае ультразвуковой метод непригоден из-за затухания сигналов в материале защитного покрытия. Капиллярный и рентгеновский методы тоже не применяются из-за ограниченного доступа к контролируемой поверхности. Нами показано, что вихретоковый метод может иметь высокую чувствительность к дефектам при контроле через слой диэлектрического покрытия толщиной до 10 мм [11].

На рис. 4 приведены сигналы, полученные с помощью ВТП типа Леотест МДФ 1202, при контроле образца из ферромагнитного материала (сталь 45) с поверхностной трещиной глубиной 0,5 мм через диэлектрическую пластину толщиной 7 мм. Параметры усиления — предварительный усилитель 32 дБ, усиление по X и Y каналам — 56 дБ. Дефектограммы получены на рабочей частоте 100 кГц с помощью компьютерной системы вихретокового контроля на основе платы EddyMax (фирма ТМТ, Германия). На рис. 4, а приведены сигналы в комплексной плоскости, а на рис. 4, б — компонента Y (вверху) и компонента X сигнала во временной развертке.

Приведенные результаты показали, что вихретоковый метод имеет достаточно высокую чувствительность к дефектам типа трещина при контроле через слой покрытия толщиной 7 мм. В этом



примере применялся малогабаритный мультидифференциальный ВТП, который обеспечивает обнаружение не только трещин, но и локальных дефектов типа язвенная коррозия или поры. При применении мультидифференциальных ВТП большего диаметра (например, типа Леотест МДФ 1501 или МДФ 1701) существует возможность контроля через более толстые слои или зазоры. Но разрешающая способность и локальность контроля при этом снижаются.

Применение мультидифференциальных ВТП. Рассмотрим примеры применения мультидифференциальных ВТП в практике неразрушающего контроля.

Описанные выше исследования показали перспективу использования мультидифференциальных ВТП для выявления дефектов под обшивкой в многослойных конструкциях и дефектов под слоем герметика. Это дало возможность с успехом применять их для обнаружения дефектов в неразъемных узлах авиационных конструкций без их демонтажа. Соответствующие методики были разработаны ранее на основе применения дефектоскопов типа ПОЛЕТ [6–8]. Но этот опыт актуален и сейчас, тем более, что для реализации соответствующих методик можно применять современные универсальные дефектоскопы [16].

Оригинальная методика была предложена для обнаружения дефектов под ремонтной накладкой на средней части крыла самолета ТУ-154. Особенность состоит в том, что возможные дефекты надо было обнаруживать на дне закругленной выборки глубиной 1 мм, которая образовалась после удаления поверхностного дефекта с целью уменьшения концентрации напряжений. Для усиления ослабленного узла на соответствующую зону наклеивали по специальной технологии ремонтную накладку толщиной 2 мм. Эксплуатация ослабленной конструкции допускалась только при условии периодического контроля с целью обнаружения возможных дефектов на дне выборки через каждые 300 посадок самолета. Сложность задачи состояла не только в необходимости обнаружения дефектов на глубине 2 мм, но и в необходимости селективно выявлять трещины на дне выборки, которая сама по себе также является дефектом. Проведенные исследования показали возможность раздельного выявления дефектов на дне выборки с отстройкой от влияния самой выборки. В этом случае возможны два варианта методик: разделение сигналов по амплитудному признаку (для чего необходимо знать амплитуду сигнала от выборки известных размеров) и амплитудно-фазовый способ, базирующийся на различии глубин залегания выборки и трещины, которая может образоваться на дне выборки. При использовании амплитудно-фазового метода удается полностью заглушить влияние выборки. Для настройки дефектоскопа

необходимо подготовить два контрольных образца, которые имитируют ситуацию (рис. 5). Один образец имитирует бездефектную (только с выборкой) обшивку 3 с накладкой 1 (рис. 5, а), второй — обшивку со сквозным дефектом типа трещина 4 на дне выборки (рис. 5, б).

Длительное время вихретоковый метод считали неперспективным для дефектоскопии ферромагнитных материалов, что можно объяснить влиянием неоднородности магнитной проницаемости большинства конструкционных сталей. Однако в настоящее время вихретоковый метод все шире применяется для контроля ферромагнитных материалов. Показано, что влияние неоднородности материала можно заглушить даже для сильно неоднородных ферромагнитных материалов, в частности, в зоне сварных соединений. Это можно обеспечить, например, на основе применения нескольких рабочих частот или подмагничиванием зоны контроля постоянным магнитным полем. Хорошие результаты дает также применение мультидифференциальных ВТП [7]. В частности, решена задача контроля штоков амортизаторов шасси самолета ТУ-154, изготовленных из стали ЭИ643 и покрытых слоем хрома. Внешний вид штоков и характер расположения типовых дефектов показаны на рис. 6.

Обычно контроль штоков при эксплуатации авиационной техники проводится магнитопорошковым методом с помощью дефектоскопа ПМД-70. Недостаток этого метода — высокая трудо-

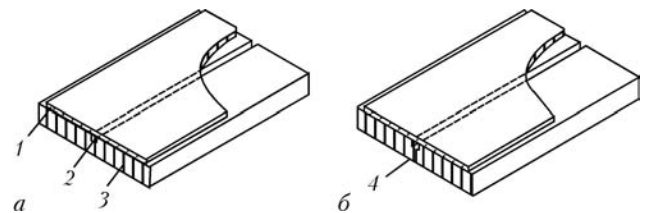


Рис. 5. Контрольные образцы для настройки дефектоскопов при выявлении дефектов на дне выборки под ремонтной накладкой: а — образец без дефекта для отстройки от влияния выборки; б — образец с дефектом для проверки чувствительности дефектоскопа

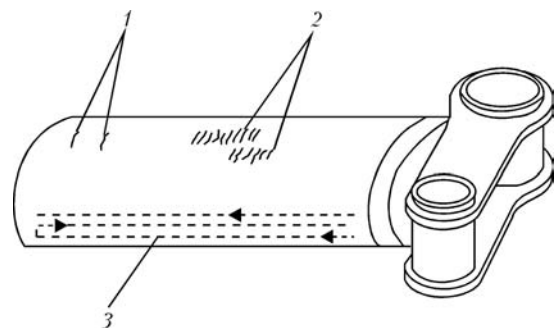


Рис. 6. Шток амортизаторов и характер расположения дефектов: 1 — одиночные трещины; 2 — скопление трещин; 3 — траектория сканирования

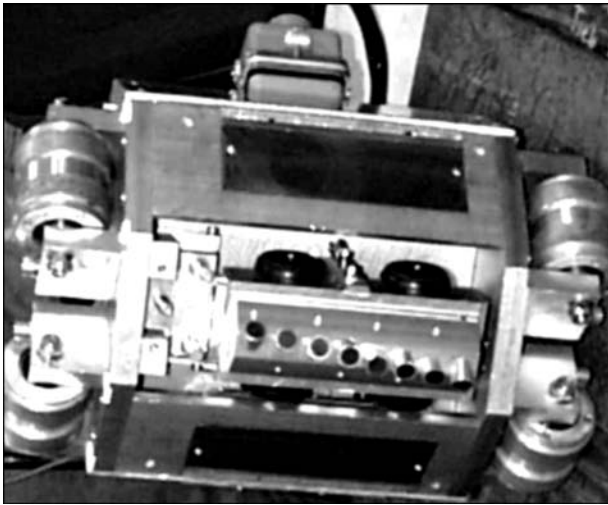


Рис. 7. Внешний вид восьмиканального сканера для контроля угловых сварных швов

емкость, обусловленная необходимостью намагничивания и размагничивания штоков, а также применения магнитных суспензий. Более того, для проведения контроля необходимо участие не менее двух операторов. При применении вихревого метода выявляются прижоговые трещины длиной более 2 мм и глубиной более 0,4 мм под слоем хрома толщиной 100 мкм, которые образовались в процессе эксплуатации штоков из-за высоких контактных нагрузок и местного нагрева материала. Контроль проводится на частоте 3 кГц амплитудным или амплитудно-фазовым методом. Амплитудно-фазовый метод применяется для отстройки от помех, обусловленных неоднородностью магнитных свойств материала. Производственные испытания подтвердили более высокую эффективность вихревого контроля, трудоемкость которого в 8...10 раз меньше трудоемкости контроля магнитным методом [7].

Предложенные Центром «Леотест-Медиум» технологии и ВТП применены фирмой Test Maschinen Technik GmbH (Германия) для создания двух вариантов многоканальных механизированных установок на базе дефектоскопа EddyMax для выявления дефектов в зоне сварных швов через слой защитного покрытия (один вариант для контроля угловых сварных швов, второй — для свар-

ных швов, выполненных внахлест). В каждой установке используются по восемь ВТП типа Леотест МДФ 1202, сигналы от которых обрабатываются при помощи независимых измерительных каналов. На рис. 7 показан внешний вид блока ВТП и сканера для контроля угловых сварных швов. На рисунке видно восемь ВТП типа Леотест 1202, развернутых под разным углом (крайние ВТП развернуты на 90°) для контроля всего сечения шва и околошовной зоны.

Еще один интересный пример применения низкочастотного мультидифференциального ВТП касается задачи выявления дефектов на внешней и внутренней сторонах труб, изготовленных из нержавеющей стали 40X25H20. Диаметр труб — 102,0 мм, толщина стенки — 15,0 мм. Специфика задачи состоит в большой структурной неоднородности материала труб, из-за чего возникает большое затухание и рассеивание ультразвуковых колебаний. Поэтому применение ультразвукового метода для обнаружения дефектов неэффективно. Проведенные исследования показали возможность решения задачи вихрековым методом на базе применения ВТП типа Леотест МДФ 3301 (см. табл. 1), который обеспечивал выявление внутренних дефектов глубиной, равной 30 % толщины на обратной стороне пластин из нержавеющей стали толщиной 15 мм. При этом за счет интегрирующих свойств самого ВТП (который фактически реализует пространственную фильтрацию [15]) обеспечивается меньший уровень структурных шумов на образцах реальных труб из стали марки 40X25H20 в сравнении с другими ВТП. Исследования проводили на образцах фрагментов трубы с искусственными дефектами, выполненными тонкой фрезой толщиной 0,8 мм. На рис. 8 показаны сигналы ВТП в комплексной плоскости при сканировании внешнего продольного дефекта глубиной 21 % и внутреннего поперечного дефекта глубиной 53 % на разных рабочих частотах.

Представленный ВТП типа Леотест МДФ 3301 применяли для решения поставленной задачи в составе, разработанной НПФ «Промприлад» (г. Киев), специализированной автоматизированной системы вихревого

контроля типа КРАБ [15]. Система КРАБ обеспечивает четырехканальный двухчастотный автоматизированный контроль труб и состоит из сканирующего устройства, промышленного компьютера, четырех идентичных вихрековых плат и платы управления сканером. Каждая плата обрабатывает сигналы от одного ВТП на двух рабочих частотах 1,5 и 5 кГц. Это необ-

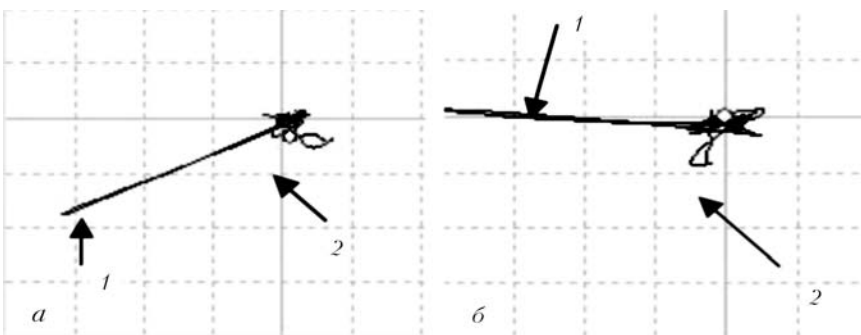


Рис. 8. Сигналы от внешних (1) (21 % толщины) и внутренних (2) дефектов (51 % толщины) на рабочих частотах 1,5 (а) и 3,0 кГц (б)

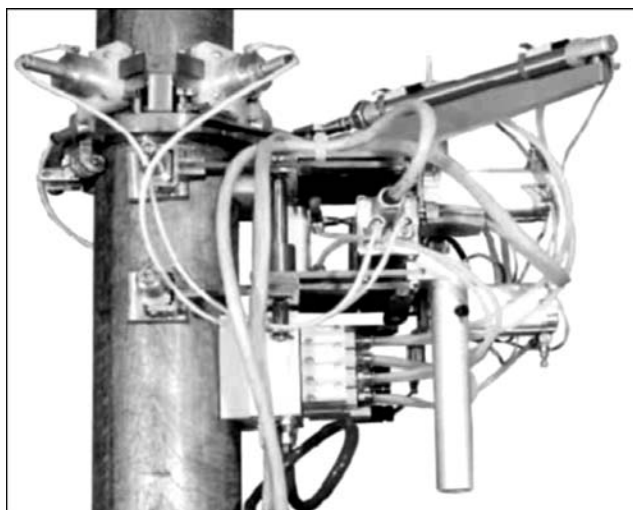


Рис. 9. Сканирующее устройство с ВТП типа Леотест МДФ 3301 системы КРАБ для автоматизированного вихретокового контроля цилиндрических объектов

ходимо для обеспечения возможности идентифицировать дефекты на внешние и внутренние. Система обеспечивает оценку глубины выявленного дефекта в процентах от толщины стенки трубы независимо от его расположения. Внешний вид сканирующего устройства с ВТП типа Леотест МДФ 3301, установленного на трубе, показан на рис. 9.

Сканирующее устройство обеспечивает одновременное перемещение четырех ВТП, каждый из которых контролирует свой сектор трубы по траектории типа меандр. После контроля участка трубы все ВТП перемещаются на следующий участок. Конструкция сканера позволяет фиксировать его на цилиндрической поверхности не с торца, а с боковой поверхности, что дает возможность обеспечить автоматический контроль смонтированных деталей во время ремонтов.

Пример применения высокочастотного ВТП типа Леотест МДФ 0501 в составе компьютеризованного дефектоскопа типа MFEC1-4 предоставлен Фраунгофер институтом неразрушающего контроля (Саарбрюкен). На базе этих преобразователей разрабатывалась технология выявления внутренних и внешних дефектов трубок из специальной низкопроводящей керамики (удельная электропроводность менее 0,1 МСм/м). Внешний диаметр трубок 21 мм при толщине стенки 2,2 мм. Дополнительными источниками возможных помех при контроле этих трубок были также слабая намагниченность материала трубок и их небольшая овальность.

На рис. 10 показаны результаты контроля образца трубок с внутренним искусственным дефектом глубиной 1,5 мм (остаточная толщина 0,7 мм) и внешним дефектом глубиной 0,5 мм. Контроль проводили в динамическом режиме путем вращения ВТП вокруг трубы на рабочей частоте 4 МГц. Искусственные дефекты типа трещины выполнены

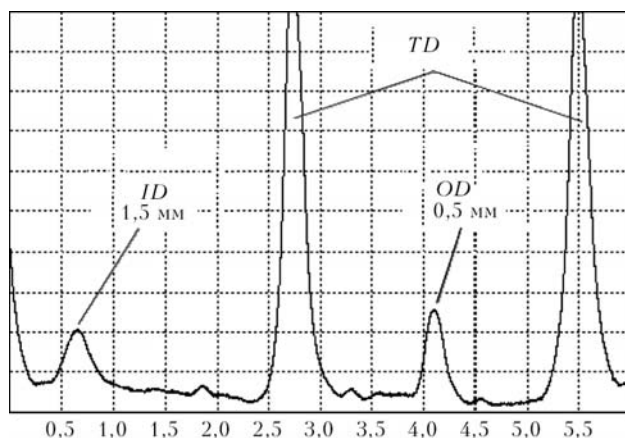


Рис. 10. Сигналы от внутренних ID, внешних OD и технологических дефектов TD в низкопроводящей керамике на рабочей частоте 4 МГц

в виде пропилов длиной более 15 мм и шириной 0,5 мм. При изготовлении образца трубки разрезали на две половины, которые после нанесения дефектов склеивали. Таким образом образовались технологические сквозные дефекты, сигналы от которых также видны на дефектограмме (TD на рис. 10).

Выводы

Мультидифференциальные вихретоковые преобразователи типа Леотест МДФ позволяют решать принципиально новые задачи неразрушающего контроля за счет высокой чувствительности к дефектам разного типа, хорошего соотношения сигнал/шум в условиях воздействия мешающих факторов, высокой разрешающей способности и большой глубины контроля (для низкочастотных ВТП).

1. Дорощев А. Л., Казаманов Ю. Г. Электромагнитная дефектоскопия. — М.: Машиностроение, 1980. — 232 с.
2. Libby H. L. Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods. — New-York etc: Wiley-Interscience, 1971. — 365 p.
3. Mook G., Bauke H., Uchanin V. Wirbelstromprüfung mit hohen Eindringtiefen — Theorie und Praxis. Abstracts of the DACH (DGZfP, ЦГfZP, SGZP) Jahrestagung Innsbruck, Mai 29–31, 2000 (см также сайт: www.ndt.net. Интернет журнал NDTnet. 2000, august. — 5, № 8).
4. Пат. № 2541772 (Франция). G 01 N 27/90. Procédé et dispositif pour l'examen non destructif de junctions rivetées ou analogues au moyen d'une sonde a courants de Foucault / J.-L. Arnaud, M. Floret (Франция). — № 8303043; заявл. 24.02.1984. — Оpubл. 31.08.84. — 22 с.
5. А.с. 1767409 СССР. МКИ G 01 N 27/90. Вихретоковый преобразователь / В. Н. Учанин, Ю. С. Грабский (СССР). — № 4869272/28; заявл. 19.07.90. — Оpubл. 07.10.92, Бюл. № 37. — 3 с.
6. Учанин В. Н. Вихретоковый метод обнаружения скрытых дефектов усталостного и коррозионного происхождения. — Киев: Об-во «Знания» УССР, 1988. — 20 с.
7. Учанин В. Н., Цирг В. Н. Опыт применения низкочастотных вихретоковых дефектоскопов для выявления скрытых дефектов усталостного и коррозионного происхождения // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1989. — № 4. — С. 71–75.
8. Учанин В. Н., Цирг В. Н. Обнаружение скрытых коррозионных повреждений авиационных конструкций вихре-



- токовым методом // Физ.-хим. механика материалов. — 1990. — № 4. — С. 103–104.
9. *Uchanin V.* New type multidifferential eddy current probes for surface and subsurface flaw detection // *Zeszyty problemowe Badania nieniszczace*. Warszawa. — 2001. — № 6. — С. 201–204 (см. также сайт: www.usndt.com.ua).
 10. *Uchanin V., Mook G., Stepinski T.* The investigation of deep penetrating high resolution EC probes for subsurface flaw detection and sizing, 8-th Europ.Conf. for NDT, Barcelona. 2002 (див. також сайт: www.ndt.net. Интернет журнал NDTnet. — 2003, February, — 8. — № 2).
 11. *Учанин В. Н.* Применение вихретокового метода для обнаружения дефектов в ферромагнитных материалах через слой защитного покрытия // Мат. Одиннадцатой ежегодной международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». — Ялта. — 2003. — С. 180–182.
 12. *Учанин В. М., Яшан А. В., Беккер Р., Диске М.* Возможность підвищення продуктивності вихрострумової дефектоскопії при застосуванні мультидиференційних перетворювачів // Мат. 4-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика» (НКТД-2003). — Київ. — 2003. — С. 121–124.
 13. *Uchanin V.* The investigation of low frequency eddy current probes with super high penetration (THP04). Abstracts of 16-th world conference on non-destructive Testing, Montreal. — 2004, August 30–September 3. — P. 145.
 14. *Учанин В. Н.* Развитие вихретоковых методов обнаружения подповерхностных дефектов // Праці 3-ї Наук.-техн. конф. «Приладобудування 2004: стан і перспективи». — Київ: ПФ НТТУ «КП». — 2004. — С. 190–191.
 15. *Луценко Г. Г., Учанин В. Н., Гозуля В. Н.* Автоматизированная многоканальная вихретоковая система для выявления и идентификации дефектов глубокозалегающих и поверхностных труб из неферромагнитных сталей / Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів (серія). — Вип. 10: Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів: Зб. наук. праць. — Львів: Фіз.-мех. інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. — 2005. — С. 108–111.
 16. *Гозуля В. Н., Учанин В. Н.* Создание универсального вихретокового дефектоскопа ОКО-01 и его применение для контроля элементов авиационных конструкций и продуктопроводов // Тр. Первой всерос. науч.-техн. конф. «Неразрушающий контроль и техническая диагностика при производстве и эксплуатации авиационной и космической техники» (выпущено на компактном диске). — Санкт-Петербург, 5–7 октября 2005 г.

Физ.- мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины,
Центр «Леотест-Медиум»,
Львов

Поступила в редакцию
26.12.2005

Ремонт кузовов, котлов и модернизация железнодорожных вагонов и цистерн.

Экспертное техническое диагностирование сосудов работающих под давлением, в том числе котлов, цистерн и других ответственных металлоконструкций.

Продление ресурсного срока железнодорожных грузовых вагонов и цистерн, в том числе подведомственных Госнадзорохрантруда.

Производство резервуаров и сосудов различного объема, в том числе работающих под давлением.

Предприятие имеет все необходимые лицензии и разрешения.



ООО "СЕРЕП"











Наши координаты:
Почтовый адрес: 87500, г. Мариуполь,
 ул. Университетская, 7
Тел.: 10-38 (0629) 33-43-85, 33-70-90
Факс: 10-38 (0629) 33-65-23, 53-00-85
E-mail: serep@azov.net
<http://www.serep.azov.net>



ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА СТАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Г. Я. БЕЗЛЮДЬКО, С. А. ВОЛОХОВ, Р. Н. СОЛОМАХА

Методы анализа и моделирования магнитного гистерезиса сформировались еще в первой половине прошлого века преимущественно трудами немецких исследователей. В 60-е годы советские корабельщики развили этот аппарат для учета намагниченности статически и циклически нагружаемых металлоконструкций в естественном и искусственном магнитных полях. Это дало все необходимое — от физики явления и до терминологии — для практического анализа магнитных свойств механически нагружаемого в приложенном магнитном поле ферромагнетика — т. е. для столь актуального сейчас неразрушающего контроля усталостного состояния и ресурса металлоконструкций. Приведены примеры исследования магнитных характеристик в зависимости от приложенных полей и механических нагружений магнитных характеристик металла.

Methods of analysis and simulation of the magnetic hysteresis were formed already in the first half of the previous century mostly by the works of German researchers. In the 60s the Soviet shipbuilders developed this apparatus to allow for magnetization of the statically and cyclically loaded metal structures in the natural and artificial magnetic fields. This provided all the necessary elements — from the phenomenon physics up to terminology — for practical analysis of magnetic properties of a ferromagnetic mechanically loaded in the applied magnetic field, i.e. for non-destructive testing of the fatigue state and remaining life of metal structures, which is so urgent now.

Одним из развивающихся методов неразрушающего контроля механического состояния стальной конструкции является мониторинг ее магнитного состояния.

Магнитное состояние ферромагнетика обычно выражают с помощью кривых намагничивания и петель магнитного гистерезиса [1–3]. Однако сложившийся сейчас уровень прикладной теории петли магнитного гистерезиса не учитывает влияние на намагниченность действующих на изделие механических напряжений, хотя этот фактор является столь же существенным, как и действующее на изделие магнитное поле [4]. Для такой оценки ближе всего подходит известный в теории ферромагнетизма статистический метод анализа гистерезисных явлений. Он основан на использовании феноменологической модели Прейзаха. Последняя представляет ферромагнетик состоящим из участков, распределенных по внутренним полям и коэрцитивным силам, и учитывает магнитную структуру вероятностно-статистическим способом. К настоящему времени разработано несколько моделей Прейзаха и вариантов их представления на так называемых планах (двухмерных распределениях на плоскости) Прейзаха [5–7]. В подавляющем большинстве этих моделей намагничиваемый ферромагнетик рассматривается как преобразователь, вход которого представляет изменяющуюся напряженность внешнего поля, а выход — магнитную индукцию ферромагнетика. Такой вариант моделирования на основе концепции «черного ящика» удобен для прикладных исследова-

ований, т. е. для неразрушающего контроля, когда надо действовать по принципу «если — значит», не особенно вдаваясь в суть процессов, происходящих в контролируемом металле на микро- и макроуровне. Модель Прейзаха — это уравнение такого преобразователя, вход–выход которого связан через двойное интегрирование функции Прейзаха. Есть ряд моделей Прейзаха: классическая — по симметричным петлям; измененная — учитывает частные петли; нелинейная — с зависимостью весовой функции от напряженности поля и другие.

Классическая модель Прейзаха построена из бесконечного набора операторов гистерезиса $\gamma_{\alpha\beta}$, которые представлены элементарными прямоугольными петлями с «вверх» и «вниз» переключениями значений α и β соответственно. Выходные значения этих петель могут принимать только значения $\gamma_{\alpha\beta}u(t) = +1$ и $\gamma_{\alpha\beta}u(t) = -1$ для входного значения $u(t)$. Произвольный вес функции $v(\alpha, \beta)$, которая называется функцией Прейзаха или весовой функцией, связан с каждым оператором. Выход преобразователя $f(t)$ может тогда быть написан как

$$f(t) = \iint v(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta} u(t) d\alpha d\beta.$$

На основе этого уравнения предложено несколько планов (планиметрических моделей), у которых плоскость занята распределением весовой функции с соответствующим оператором гистерезиса, а координатные оси плана — значения напряженностей поля α и β : α — напряженность



поля при движении по восходящей ветви петли гистерезиса; β — напряженность поля при движении по нисходящей ветви.

На наш взгляд, наиболее приемлемый вариант модели Прейзаха предложен В. Т. Гузеевым и С. Т. Гузеевым [8], который нами взят в качестве исходной модели для рассмотрения процессов изменения магнитного состояния конструкции при воздействии механических напряжений. Ее особенность заключается в том, что в качестве параметров α и β обоснованно приняты внутренние поля смещения и коэрцитивные силы доменов, по которым и строятся планы, названные фазовыми диаграммами.

Понятие о фазовых диаграммах. Статистический метод анализа гистерезисных явлений предполагает, что ферромагнетик состоит из множества доменов, разделенных на две группы: безгистерезисные домены и домены Прейзаха. Последние имеют прямоугольную петлю гистерезиса с коэрцитивной силой $h_{кр}$. Каждый домен находится в своем поле смещения $h_{см}$ и ориентирован случайным образом. Результирующая намагниченность системы равна нулю. При приложении внешнего магнитного поля границы между доменами начинают смещаться таким образом, что домены, намагниченность которых совпадает с полем, будут расти, появится результирующая намагниченность. Внешнее магнитное поле удерживает границы в новом положении.

В безгистерезисном домене процесс смещения границ следует за изменением внешнего магнитного поля до насыщения, затем происходит его поворот от направления легкого намагничивания к направлению вектора поля (процесс вращения). При уменьшении магнитного поля процесс пойдет в обратном порядке: сначала вращение, затем смещение границ до первоначального равновесного состояния.

В домене Прейзаха при внешнем магнитном поле $H = h_{кр} \pm h_{см}$ (условие перемагничивания) происходит быстрое продвижение границы к новому равновесному состоянию. Такое быстрое продвижение границы создает в ферромагнетике электромагнитные силы и вихревые токи, растрачивающие энергию на механические колебания среды (эффект Баркгаузена) и нагрев металла. Поэтому при уменьшении внешнего магнитного поля границы не возвратятся в исходное положение, и останется некоторый избыток намагниченности в направлении действовавшего внешнего магнитного поля, называемый остаточной намагниченностью $J_{ост}$ или остаточной индукцией $B_{ост}$.

Фазовая диаграмма магнитных состояний ферромагнитной конструкции представляет план (условное поле) в координатах $h_{см}$ и $h_{кр}$, на котором размещены все ее домены и отображается их сос-

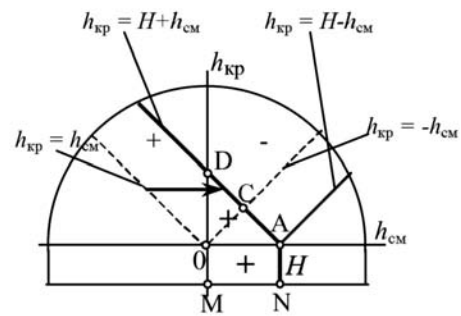


Рис. 1. План фазовой диаграммы

тояние в выбранном направлении. Поскольку внутренние поля смещения преодолеваются постоянным h_{\pm} намагничивающим полем, а коэрцитивные силы — знакопеременным h_{\pm} , спадающим от некоторого значения до нуля, планы часто строят в координатах этих полей: значения h_{\pm} — по горизонтальной оси; значения h_{\pm} — по вертикальной оси вверх. На рис. 1 представлен план фазовой диаграммы в исходном размагниченном состоянии и при действии намагничивающего поля H . План ограничен кривой линией (на рис. 1 полуокружностью), за которой увеличение h_{\pm} и h_{\pm} не приводит к изменению индукции (намагниченности), т. е. ферромагнетик находится в состоянии насыщения.

В верхней части плоскости от горизонтальной оси располагаются домены Прейзаха с индукциями $\pm B_S$ или намагниченностями $\pm J_S$, каждый из которых имеет свое критическое поле $h_{кр}$ и расположен в своем положительном или отрицательном внутреннем поле смещения $\pm h_{см}$. Для учета безгистерезисных доменов, которые не имеют критических полей, на фазовой диаграмме откладывается площадка вниз от оси абсцисс. Там критические поля равны нулю и каждый домен расположен в своем положительном или отрицательном для выбранного направления внутреннем поле смещения $\pm h_{см}$.

Как правило, план заполняется значениями индукций. Для практических целей эти значения усредняются по результатам измерений конкретного ферромагнитного материала. За исходное состояние принимается динамически размагниченное, при котором индукции имеют положительный знак участков слева от оси ординат и отрицательный — справа, как показано на рис. 1. Эти характерные знаки индукций для исходного размагниченного состояния на фазовую диаграмму обычно не наносятся, чтобы не перегружать ее, отмечая знаком лишь нехарактерную для данной области индукцию.

Линии, определяемые условиями перемагничивания, называются *фронтами перемагничивания*. В случае отсутствия внешнего поля при равных масштабах по осям фронты перемагничива-



ния определяются уравнениями $h_{кр} = \pm h_{см}$. Они представляют собой прямые линии, исходящие из начала координат под углом 45° к горизонтальной оси в области доменов Прейзаха и под углом 90° к горизонтальной оси в области безгистерезисных доменов.

Сумма площадей с положительным и отрицательным знаком, которая определяет суммарную индукцию или намагниченность, в размагниченном состоянии будет равна нулю.

При появлении внешнего, например, положительного поля H (см. рис. 1) фронты сместятся и займут положение, определяемое уравнением $h_{кр} = H \pm h_{см}$ в области доменов Прейзаха и уравнением $H = h_{см}$ в области безгистерезисных доменов. При указанном смещении фронтов изменится на положительный знак индукция участков в зоне $DANMD$, у которых внешнее поле H с добавкой поля смещения станет больше критического. Суммарная величина участков со знаком (+) и (-) не будет равна нулю, появилась положительная индукция + B . Если теперь снять внешнее поле H , фронты возвратятся на место, но положительная индукция участков в зоне $0CD0$ останется. Это и будет остаточная индукция после воздействия поля H .

Учитывая, что пластические напряжения, в отличие от упругих, оказывают влияние не только на магнитное состояние ферромагнетика, а и на его магнитные свойства [4], следует считать, что фазовая диаграмма устойчива только в пределах действия упругих напряжений. В результате действия пластических деформаций распределение плотности заполнения плана будет изменяться.

Действие механических нагрузок. Действие упругих механических напряжений на намагниченность ферромагнетика учитывается коэффициентом уменьшения критических полей k_σ [4]. Он изменяется от 1 при отсутствии напряжений до 0 при предельных воздействиях. С учетом этого в области доменов Прейзаха фронты перемагничивания при действии упругих волн механических напряжений σ будут определяться уравнением $h_{кр}k_\alpha = H \pm h_{см}$. Они представляют собой прямые

линии, исходящие из точки на горизонтальной оси, отстоящей от начала координат на величину H , и расположенные под углом α к горизонтальной оси, большим 45° и меньшим 90° . Этот угол α определяется уравнением $\alpha = \arctg 1/k_\sigma$. При увеличении интенсивности упругих волн механических напряжений угол поворота фронта α будет возрастать. На рис. 2 изображено изменение наклона фронтов перемагничивания на плане фазовой диаграммы: на рис. 2, а — при индуцированной намагниченности полем H ; на рис. 2, б — при остаточной намагниченности после снятия намагничивающего поля H .

Индуцированная намагниченность, наведенная внешним магнитным полем напряженностью H , при отсутствии механических нагрузок определяется на рис. 2, а площадью $DANMD$. При появлении механической нагрузки угол наклона фронта AD становится больше 45° и индуцированная намагниченность определяется площадью D_1ANMD_1 , которая больше предыдущей. При повышении механической нагрузки угол наклона фронта возрастает и при нагрузках, близких к предельным, индуцированная намагниченность определяется уже площадью KD_2ANMK , которая еще больше. Таким образом, индуцированная намагниченность ферромагнитной конструкции под действием механических нагрузок возрастает от первоначального значения до некоторой предельной величины, определяемой, с одной стороны — уровнем намагничивающего поля, а с другой — распределением плотности заполнения плана. При равномерном распределении плотности заполнения плана можно ожидать линейное изменение индуцированной намагниченности от уровня механического напряжения. Это подтверждается опытными зависимостями, приведенными на рис. 3 по данным [9].

Остаточная намагниченность при отсутствии механических нагрузок определяется на рис. 2, б площадью $0CD0$. При появлении механической нагрузки угол наклона фронта $0C$ становится больше 45° и остаточная намагниченность определяется площадью $0C_1D0$, которая меньше предыдущей. При повышении механической нагрузки угол наклона фронта возрастает и при нагрузках, близких к предельным, остаточная намагниченность определяется уже совсем небольшой площадью $0C_2D0$. Таким образом, остаточная намагниченность ферромагнитной конструкции под действием механических нагрузок уменьшается, практически разрушаясь при нагрузках, близких к пределу прочности материала конструкции. Подтверждением этого могут служить приведенные на рис. 4 экспериментальные зависимости по данным, приведенным в работе [10].

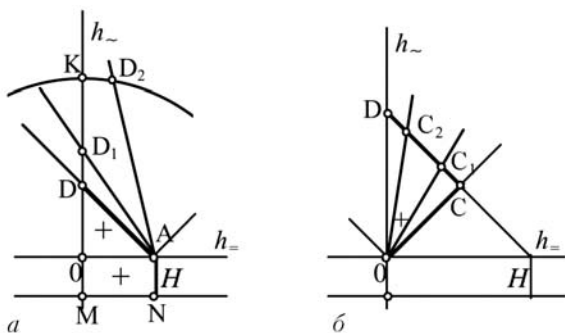


Рис. 2. Действие механических нагрузок: а — при индуцированной намагниченности; б — при остаточной намагниченности



Исследования на планах фазовой диаграммы стали Ст.3. На рис. 5 и 6 приведены планы фазовой диаграммы стали Ст.3. Фазовая диаграмма снята на вырезанном из трубы кольце: средний диаметр кольца — 74 мм, высота — 22 мм, толщина — 3 мм. Планы построены в координатах h_{\pm} , h_{\pm} и заполнены значениями индукции в мТл. Плотность заполнения плана в пределах ячейки считается равномерной. На рисунках приведены только правые части планов, так как левые являются зеркальным отражением правых. На рис. 5 штриховыми линиями показаны фронты перемагничивания при действии механических напряжений, соответствующих коэффициентам $k_{\sigma} = 1; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5$. При определении индукции от индуцированной намагниченности используются фронты перемагничивания, выходящие из точки на оси ординат с соответствующей напряженностью поля (на рис. 5 в качестве примера это точка с напряженностью поля $h_{\pm} = 400$ А/м). При определении остаточной индукции используются фронты, выходящие из начала координат.

Для диапазона упругих напряжений можно считать, что коэффициент $k_{\sigma} = 1 - \sigma_{\pm} / \sigma_{\text{пр}}$. Тогда из планов, представленных на рис. 5 и 6, можно получить зависимости магнитной индукции в образце от относительной механической нагрузки $\sigma_{\pm} / \sigma_{\text{пр}}$ в диапазоне упругих напряжений, т. е. в диапазоне значений $0 < \sigma_{\pm} / \sigma_{\text{пр}} < 0,5$ или $1 < k_{\sigma} < 0,5$.

На рис. 7 представлены основные кривые намагничивания (ОКН) стали Ст.3 при отсутствии механических напряжений ($k_{\sigma} = 1$) и при упругих напряжениях, близких к пределу текучести ($k_{\sigma} = 0,5$). Они могут быть переведены в зависимости намагниченности или магнитного момента по формулам: $J = B / \mu_0 - H$; $M = JV$, где V — объем образца.

Из рис. 7 следует, что упругие механические напряжения приводят к увеличению магнитной индукции, особенно в средних полях (напряженностью 200...1000 А/м), где это увеличение достигает 3-х раз при напряженности поля 300 А/м. С ростом напряженности поля приращение индукции от механических напряжений уменьшается, и индукция насыщения уже не зависит от них.

На рис. 8 представлены зависимости относительного приращения магнитной индукции от механических напряжений $\Delta B_{\sigma} / B_H = f(\sigma_{\pm} / \sigma_{\text{пр}})$. Здесь $\Delta B_{\sigma} = \Delta B_{H\sigma} - B_H$ — приращение магнитной индукции; $B_{H\sigma}$ — индукция при напряженности поля H и относительном механическом напряжении $\sigma_{\pm} / \sigma_{\text{пр}}$; B_H — индукция при напряженности поля H и отсутствии механических напряжений.

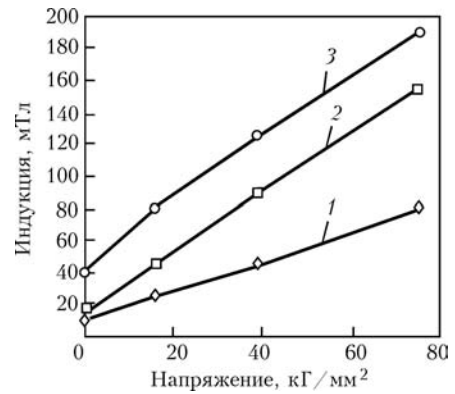


Рис. 3. Изменение намагниченности сплава Fe(85 %) + Ni(15 %) от растягивающего усилия при напряженности поля, А/м: 1 — 500; 2 — 750; 3 — 1000 (по данным [9])

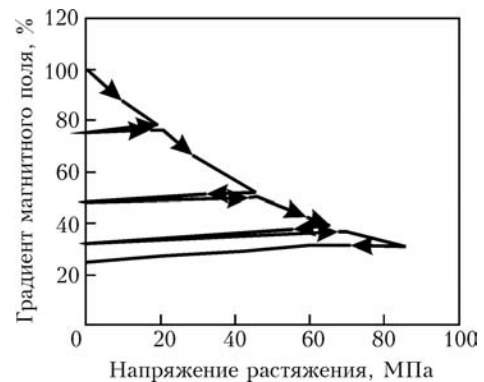


Рис. 4. Поведение остаточной намагниченности пятна при растяжении (по данным [10])

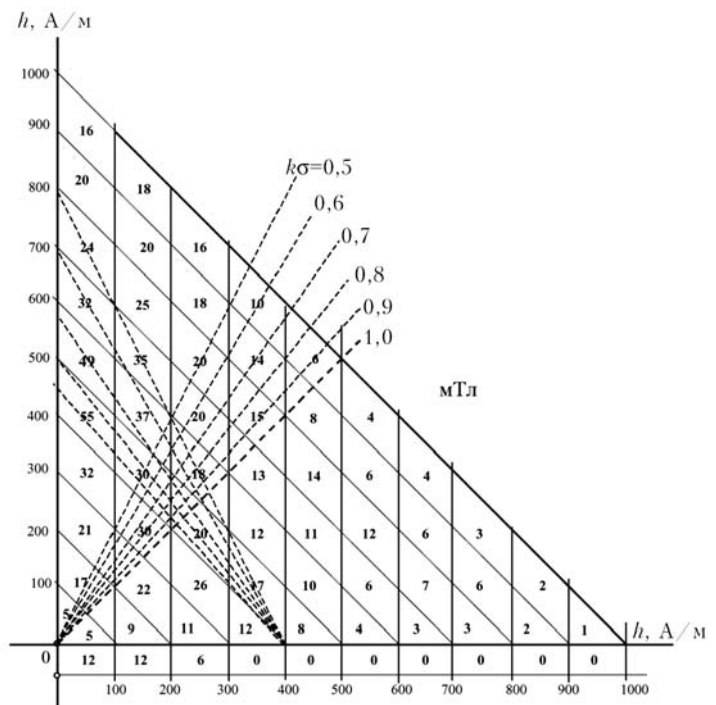


Рис. 5. План стали Ст.3 в средних полях

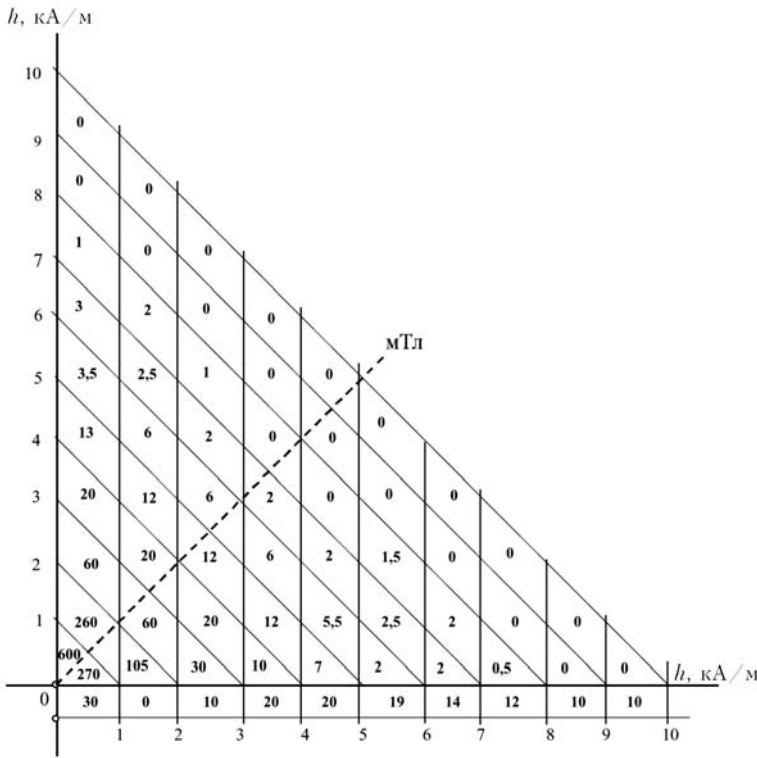


Рис. 6. План стали Ст.3 в сильных полях

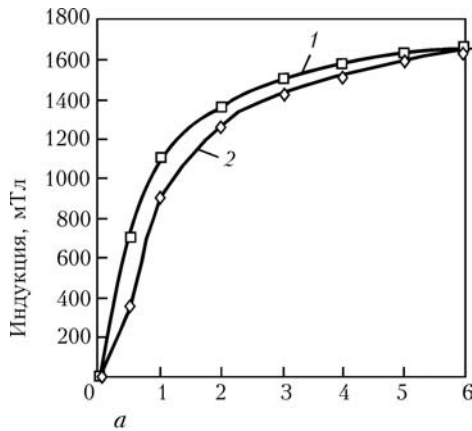


Рис. 7. Основные кривые намагничивания стали Ст.3 в сильных (а) и средних (б) полях: 1 — при $k_{\sigma} = 1$; 2 — при $k_{\sigma} = 0,5$

характер и возрастает с ростом напряжений, при напряженности поля 500...600 А/м оно практически линейно и находится на уровне 15 % при росте механического напряжения на каждые 10 % $\sigma_{пр}$.

На рис. 9 приведены зависимости от механических напряжений остаточной индукции в образце, полученной до его нагружения при выключении магнитного поля с различной напряженностью.

Из рис. 9 следует, что с нагружением образца остаточная индукция снижается, причем тем больше, чем больше нагрузка. При напряжениях, близких к пределу текучести, она снижается в 1,5...2 раза.

Подытожив сказанное выше, нельзя не заметить ряд практически важных моментов. Первое — это связь магнитных характеристик контролируемого металла с направлением и интенсивностью как приложенного магнитного поля, так и механических нагружений.

Поэтому несомненна предпочтительность ведения контроля именно в управляемых приложенных полях для сокращения неопределенности исходных данных.

Отметим, что только в таком варианте выполнения неразрушающего контроля возможно изготовление стандартных образцов напряженно-деформированного состояния, как это сделано нами в коэрцитиметрии. Второе — это повышенная чувствительность индуцированной намагниченности к механическим нагрузкам. Это реальная физическая предпосылка для неразрушающего контроля нагрузок в элементах металлоконструкций, причем как в упругой, так и в упругопластической областях. И на уровне альтернативы тензометрии, но с таким важным преимуществом, как учет полной

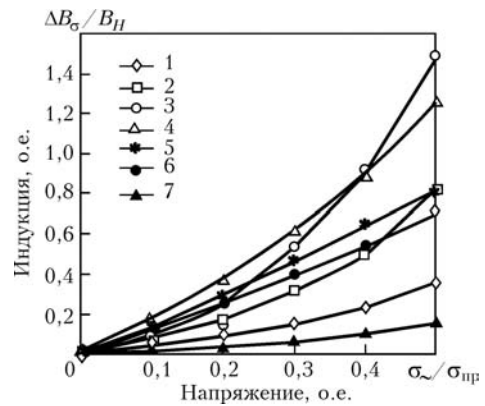


Рис. 8. Относительное изменение индукции в образце стали Ст.3 при упругих механических напряжениях и напряженности поля, А/м: 1 — 100; 2 — 200; 3 — 300; 4 — 400; 5 — 500; 6 — 600; 7 — 1000

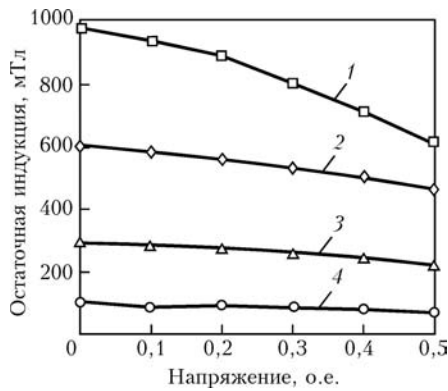


Рис. 9. Изменение от нагрузки $s \cdot s_{пр}$ остаточной индукции в образце из стали Ст.3, полученной до нагружения от магнитного поля напряженностью, кА/м: 1 — 10; 2 — 1000; 3 — 600; 4 — 400

нагрузки, а не только действующей с момента установки тензодатчика.

Из основополагающих работ наших предшественников правомерен и такой временно актуальный вывод, что физического явления, именуемого «магнитная память» металла, конечно же, не существует. Все, что под этим названием предлагается сейчас в неразрушающем контроле — это не более, чем частный случай работ многолетней давности. И в силу оторванности от контекста этому частному случаю ошибочно приписывают совершенно нереальные возможности и в дефектоскопии, и в оценке напряженно-деформированного состояния.

Выводы

Индукцированная намагниченность ферромагнитной конструкции под действием механических нагрузок возрастает от первоначального значения до некоторой предельной величины, определяемой направлением и уровнями намагничивающего поля и нагрузки.

ООО «Специальные Научные Разработки»,
НТЦ магнетизма технических объектов НАН Украины,
Харьков

Остаточная намагниченность ферромагнитной конструкции под действием механических нагрузок уменьшается, практически разрушаясь при нагрузках, близких к пределу прочности материала конструкции.

Изменения намагниченности столь значительны, что по ним можно уверенно судить об изменении механических напряжений.

Наглядность графического изображения процесса изменения магнитного состояния при механических воздействиях стимулирует совершенствование известных и создание новых методов неразрушающего контроля механического состояния стальной конструкции путем мониторинга магнитных характеристик металла.

1. Zirka S. E., Moros Yu. I. Hysteresis modeling based on transplantation // IEEE Trans. Magn. — 1995. — 31, № 6. — P. 3509–3511.
2. Зирка С. Е., Мороз Ю. И. Моделирование магнитного гистерезиса на основе обобщенных правил Маделунга // Техн. электродинамика. — 1999. — № 1. — С. 22–27; № 2 1999, С. 7–13.
3. Jiles D. C. Thoenke J. B. Theory of ferromagnetic hysteresis: determination of model parameters from experimental hysteresis loops // IEEE Transactions on Magnetics. — 1989. — 25, № 5. — P. 3928–3930.
4. Рейнбот Г. Магнитные материалы и их применение. — Л.: Энергия, 1974.
5. Preisach modelling of magnetisation changes in steel / S. F. H. Parker, C. A. Faunce, P. J. Grundy et al. // J. of Magnetism and Magnetic Materials. — 1995. — 145. — P. 51–56.
6. Красносельский М., Покровский А. Системы с гистерезисом. — М.: Наука, 1983. — 277 с.
7. Torre E. D. A Preisach Model for Accommodation // IEEE Trans. Magn. — 1994. — 30, № 5. — P. 2701–2707.
8. Гузев В. Т., Гузев С. Т. Основы судовой магнитоэлектродинамики. — М.: В/О «Мортехинформреклама», 1985. — 48 с.
9. Белов К. П. Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнитных материалах. — М.-Л.: ГИТТЛ, 1951.
10. Большаков В. Н., Горбаш В. Г., Кулик А. Ф. Прибор для контроля механических напряжений по измерению локальной остаточной намагниченности // Дефектоскопия: Ч. I. — 1999. — № 1. — С. 22–27. Ч. II. — 1999. — № 2. — С. 7–13.

Поступила в редакцию
11.07.2006



ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОТОВОЙ КОНСТРУКЦИИ НА ВЫЯВЛЯЕМОСТЬ ДЕФЕКТОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ИМПЕДАНСНЫМ МЕТОДОМ

А. Г. ПРОТАСОВ, А. С. ЮРЧЕНКО

Проведено аналитическое исследование механического импеданса сотовых конструкций. Получено и исследовано соотношение, описывающее влияние параметров изделия на результаты контроля. Сделаны выводы о границах применения метода для контроля сотовых панелей.

This paper presents the analytical investigation of honeycomb structure mechanical impedance. The correlation between object parameters and efficiency of impedance method is received and investigated. The conclusions, recommendations and limitations of using this method for examinations the honeycomb structure are given.

В современном авиастроении широко используются конструкционные материалы, к которым относят композиционные и сотовые структуры, отличающиеся высокой прочностью при малом удельном весе. В отдельных самолетах около 30 % площади фюзеляжа и крыла изготавливаются из таких материалов. Основными дефектами сотовых конструкций являются отслоения сот от обшивки, вследствие непрочности или смятия стенок ячеек. Подобные дефекты могут диагностироваться радиационными, тепловыми, акустическими методами неразрушающего контроля (НК), однако, учитывая ряд специфических особенностей данных конструкций, наибольшее применение получил импедансный метод НК [1].

В данной работе рассмотрены особенности импедансного метода для контроля сотовых панелей, а также влияние свойств контролируемого объекта на выявляемость дефектов. Представлена и проанализирована зависимость, позволяющая оценить влияние различных факторов на результативность контроля.

Математическая модель механического импеданса сотовой конструкции. Импедансный метод базируется на различии механических импедансов дефектных и доброкачественных участков многослойной конструкции и в общем случае представляется комплексной величиной [1]:

$$Z = \frac{\dot{F}}{\dot{v}} = R_H + jX_H = |Z|e^{j\varphi}, \quad (1)$$

где Z — механический импеданс конструкции; \dot{F} — комплексная амплитуда силы, приложенной к поверхности; \dot{v} — колебательная скорость в точке приложения силы; R_H, X_H — активная и реактивная составляющие импеданса.

Чувствительность метода тем выше, чем больше величина отношения механического импеданса в доброкачественной и дефектной зонах объекта контроля (ОК):

$$A = Z_2/Z_1, \quad (2)$$

где A — чувствительность импедансного метода; Z_2, Z_1 — механические импедансы изделия в доброкачественной и дефектной зонах соответственно.

Зная, какие параметры и каким образом влияют на величину A , можно существенно повышать эффективность и результативность контроля.

Для математического описания механического импеданса сотовой конструкции используют некоторые упрощения и рассматривают отделенный дефектом участок обшивки как пластину, закрепленную по контуру. Тогда размеры дефекта определяются размерами данной пластины и в отсутствии потерь входной механический импеданс такой пластины имеет вид [2]:

$$Z_1 = j\left[wm - \frac{1}{wK_1}\right], \quad (3)$$

где m — физическая масса пластины диаметра D ; K_1 — гибкость круглой пластины диаметра D , возбуждаемой в центре сосредоточенной силой; w — круговая частота.

На рис. 1 схематически изображена сотовая структура с дефектной зоной, где отсутствует соединение между обшивкой и сотовым наполнителем. В рамках модели этот участок приближенно будем считать окружностью диаметра D и размером минимального дефекта. В соответствии с моделью эта зона эквивалентна пластине, закрепленной по контуру, и имеет импеданс (3).

Физическую массу и гибкость пластины можно представить в виде [1]:



$$m = \frac{7}{256} \rho_1 \pi h_1 D^2, \quad (4)$$

$$X = w \rho_2 h_2, \quad (9)$$

$$K_1 = \frac{D^2}{64\pi L} = 3 \frac{(1 - \mu_1^2) D^2}{16\pi E_1 h_1^3}, \quad (5)$$

где l — толщина клеевого шва; d — величина, характеризующая упругость клея; E_2, μ_2 — модуль Юнга и коэффициент Пуассона для клея; ρ_2, h_2 — плотность материала и толщина сотовой ячейки соответственно.

где L — цилиндрическая жесткость круглой пластины диаметра D , закрепленной по контуру; ρ_1, h_1, E_1, μ_1 — плотность, толщина, модуль Юнга, коэффициент Пуассона материала обшивки соответственно.

Тогда общая формула для бездефектного клеевого соединения запишется в виде:

Тогда, подставив выражения (4) и (5) в (3), получим для импеданса дефектной зоны:

$$Z_2 = \frac{jw\rho_2 h_2}{1 - w^2 \rho_2 h_2 \frac{l(1 + \mu_2)(1 - 2\mu_2)}{E_2(1 - \mu_2)}}. \quad (10)$$

$$Z_1 = j \left[\frac{7}{256} S_1 \pi_1 h_1 D^2 w^{-1} - \frac{16\pi E_1 h_1^3}{3(1 - \mu_1^2) D^2 w} \right], \quad (6)$$

Как уже было сказано выше, для анализа влияния параметров контролируемого изделия на эффективность контроля важным представляется соотношение импедансов доброкачественных и дефектных зон. Подставим в выражение (2) полученные значения Z_1 и Z_2 :

т. е., зная параметры ОК в рамках данной модели (6), а также приняв приближенно минимальный и максимальный размеры дефекта, можно оценить численное значение механического импеданса дефектного участка.

$$A = \frac{D^2 w^2 \rho_2 h_2}{\left[\frac{7}{256} \rho_1 \pi h_1 D^4 w^2 - E_1 h_1^3 \frac{16\pi}{3(1 - \mu_1^2)} \right] \left[1 - w^2 \rho_2 h_2 \frac{l}{d} \right]}, \quad (11)$$

Входной импеданс бездефектной сотовой конструкции, когда слой клея соединяет ребро ячейки сотового заполнителя с обшивкой, можно записать в виде [3]:

$$Z_2 = \frac{jX}{1 - X w K_2}, \quad (7)$$

$$A = \frac{4\pi^2 D^2 f^2 \rho_2 h_2}{\left[\frac{7}{64} \pi^3 \rho_1 h_1 D^4 f^2 - 64\pi L \right]} \dots \frac{4\pi^2 D^2 f^2 \rho_2 h_2}{\left[1 - 4\pi^2 f^2 \rho_2 h_2 \frac{l}{E_2} \frac{(1 + \mu_2)(1 - 2\mu_2)}{(1 - \mu_2)} \right]}, \quad (12)$$

где X — механический импеданс грани сотовой ячейки; K_2 — удельная гибкость клеевого слоя.

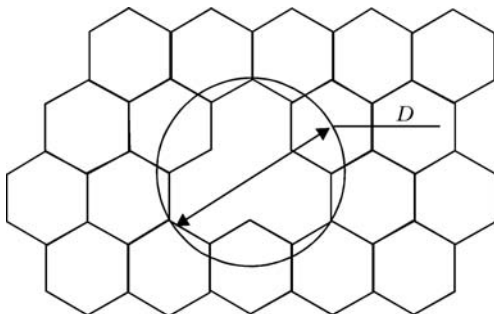
где L — цилиндрическая жесткость обшивки; f — частота.

Данное соотношение получено исходя из электромеханической аналогии в предложении, что клеевой шов представляется сосредоточенной гибкостью, параллельно соединенной с обшивкой, которая, в свою очередь, является системой с распределенными параметрами. Характеристику клеевого шва и импеданс сотовой ячейки можно представить в виде [3]

Как видно, данное соотношение определяется упругими свойствами обшивки L , ее плотностью и толщиной (ρ_1, h_1); плотностью и толщиной сотового наполнителя (ρ_2, h_2), размерами дефекта D ; толщиной и упругими свойствами клея (l, E_2, μ_2).

$$K_2 = \frac{l}{d} = \frac{l}{E_2 \frac{(1 - \mu_2)}{(1 + \mu_2)(1 - 2\mu_2)}}, \quad (8)$$

Анализ влияния параметров сотовой конструкции на результаты контроля. Проанализируем соотношение (12) и оценим влияние параметров объекта контроля на чувствительность импедансного метода.



Для проведения численного анализа будем использовать параметры наиболее распространенной в авиации сотовой панели из алюминия: толщина обшивки 0,5 мм; толщина слоя полимерного клея 0,4 мм; диаметр сотовой ячейки из алюминия 8 мм; высота сотовой панели 8 мм, вместе с обшивкой — 9,8 мм.

Рис. 1. Схематическое изображение сотовой конструкции с дефектной зоной диаметром D

Все факторы, влияющие на результаты контроля, можно условно разделить на три группы: характеризующие ОК (обшивку, клеевое соединение, сотовый наполнитель); характеризующие де-

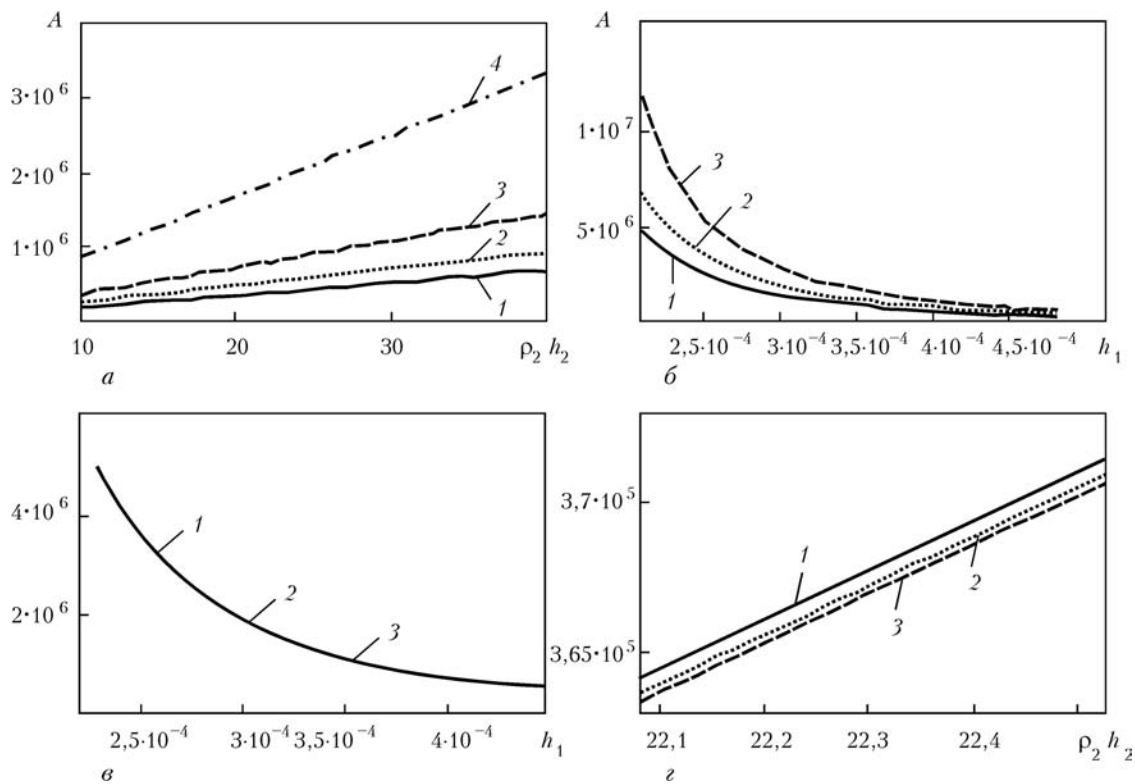


Рис. 2. Влияние параметров объекта контроля на выявляемость дефектов: а — влияние плотности и толщины (ρ_2, h_2) сотового наполнителя на коэффициент A для различных значений цилиндрической жесткости обшивки L : 1 — 0,08; 2 — 0,06; 3 — 0,04; 4 — 0,02; б — влияние толщины обшивки h_1 на коэффициент A для различных значений модуля Юнга материала обшивки E_1 , ГПа: 1 — 9; 2 — 69; 3 — 5; в — влияние толщины обшивки h_1 на коэффициент A для различных значений толщины клеевого соединения l : 1 — 0,0001; 2 — 0,001; 3 — 0,002; г — влияние плотности и толщины сотового наполнителя (ρ_2, h_2) на коэффициент A для различных значений толщины клеевого соединения l : 1 — 0,0002; 2 — 0,0004; 3 — 0,0008

фект (размер дефекта); связанные с условиями контроля (рабочая частота).

Результаты численного моделирования показаны на рис. 2–4.

На рис. 2 представлены графики, характеризующие влияние плотности и толщины сотового наполнителя (ρ_2, h_2) и толщины обшивки h_1 на чувствительность метода A .

Как видно из рис. 2, дефект выявляется тем легче, чем больше плотность и толщина сотового наполнителя и меньше цилиндрическая жесткость обшивки (соответственно ниже упругие свойства пластины). Кроме того, из рис. 2, б следует, что дефект выявляется лучше при меньших толщинах и модулях упругости обшивки.

Зависимость, представленная на рис. 2, в, показывает, что варьирование толщины и упругих свойств клеевого соединения мало влияет на результаты контроля (кривые практически совпадают). Это объясняется малостью модуля Юнга для клея в сравнении с материалом обшивки. Клеевой шов увеличивает импеданс бездефектной зоны тем больше, чем больше его толщина. Поэтому зоны повышенной толщины клеевого шва могут также быть обнаружены импедансным методом. Также видно, что с увеличением толщины обшивки влияние клеевого соединения уменьшается.

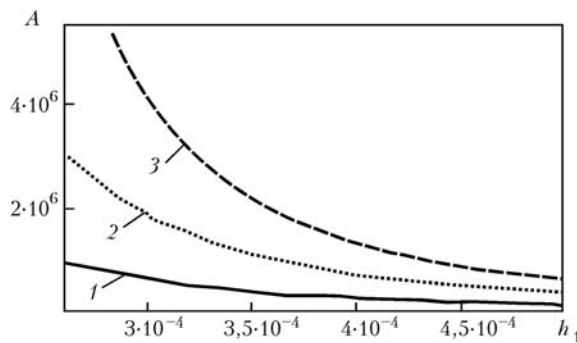


Рис. 3. Влияние диаметра дефекта D (1 — 0,01; 2 — 0,016; 3 — 0,02) и толщины обшивки h_1 на чувствительность импедансного метода A

Как следует из рис. 2, г, с уменьшением толщины, плотности и модуля Юнга сотового наполнителя, а также, при увеличении толщины клеевого шва выявляемость дефектов ухудшается. Это можно объяснить ростом контактной гибкости и, как следствие, ухудшением условий контроля.

На рис. 3 показано влияние размера дефекта на величину отношения импедансов дефектной и бездефектной зон.

Из кривых, представленных на рис. 3, следует, что наибольшая чувствительность метода наблю-

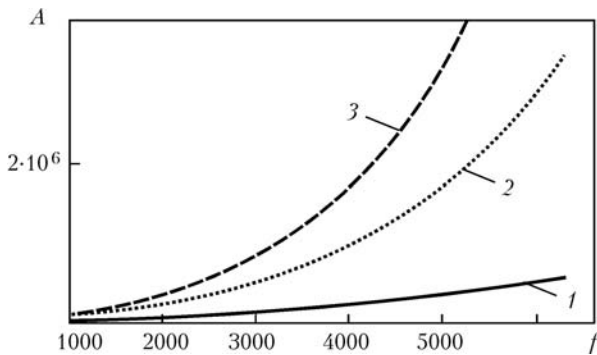


Рис. 4. Влияние частоты f и размера дефекта D (1 — 0,016; 2 — 0,032; 3 — 0,04) на чувствительность импедансного метода A

дается в случаях тонких обшивок и крупных дефектов. При толщинах больше 0,5 мм влияние размеров дефектов относительно мало.

На рис. 4 представлена зависимость величины отношения импедансов доброкачественной и дефектной зон от частоты и размера дефекта.

Как видно из рис. 4, увеличение частоты работы преобразователя в целом улучшает выявляемость дефектов и особенно это проявляется при больших их размерах. Однако здесь следует учесть, что импедансный метод основывается на возбуждении в ОК изгибных волн и, соответственно, верхнее значение частоты ограничено условием [4]:

$$fh_1 \leq \sqrt{\frac{E_1}{8\rho_1(1 + \mu_1)}}$$

Выводы

В результате теоретического исследования механического импеданса сотовой панели было получено аналитическое выражение для определения влияния параметров изделия на результаты контроля. Результаты численного моделирования, полученные на базе выведенного соотношения, продемонстрировали влияние параметров объекта на эффективность и результативность контроля и позволили сформулировать рекомендации по использованию импедансного метода для контроля сотовых конструкций.

1. Ланге Ю. В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. — М.: Наука, 1991. — 272 с.
2. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. — М.: Мир, 1971. — 557 с.
3. Ланге Ю. В. О физических основах ультразвукового метода неразрушающей оценки прочности клеевых соединений // Дефектоскопия. — 1974. — № 1. — С. 96–107.
4. Неразрушающий контроль: Справ.: В 7 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. — Т. 3: Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. — М.: Машиностроение, 2004. — 864 с.

Нац. техн. ун-т Украины «КПИ»,
Киев

Поступила в редакцию
21.12.2005

НОВЫЕ КНИГИ

Троицкий В. А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. — Киев: Феникс, 2006. — 320 с.

В пособии рассмотрены методы неразрушающего контроля (НК) и их классификация, изложены основные понятия и физические основы, приведены технические характеристики основных видов оборудования и вспомогательных средств для визуальной, ультразвуковой, радиационной, магнитной, капиллярной дефектоскопии и контроля герметичности. Классифицированы основные типы дефектов сварных соединений, выполненных дугowymi, контактными и другими видами сварки. Изложены вопросы статистической обработки результатов контроля, управления качеством сварки, примеры ведомственных норм на дефектность сварных соединений.

Приведены примеры использования средств НК в трубопроводном транспорте, в нефтегазовой и строительной промышленности, при производстве труб магистральных трубопроводов.

Методические рекомендации рассчитаны на инженерно-технических работников, дефектоскопистов и могут быть полезны студентам вузов. Издание третье, дополненное.

Ультразвуковой контроль: дефектоскопы, нормативные документы, стандарты по УЗК / Составитель В. А. Троицкий. — Киев: Феникс, 2006. — С. 240.

Справочное пособие, содержащее сравнительный анализ современных ультразвуковых дефектоскопов, нормативные документы и стандарты по этому виду неразрушающего контроля качества.

Предназначено для инженеров, занимающихся контролем качества, диагностикой энергетического и другого ответственного оборудования. Дополняет учебно-методический материал, изложенный в книге В. А. Троицкого «Краткое пособие по контролю качества сварных соединений», издание третье, дополненное, 2006 г.

По вопросам приобретения обращаться:

**03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11, отд. № 4.
Тел.: 287-26-66; факс: 289-21-66; e-mail: usndt@ukr.net**



ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ СОСУДОВ С ВМЯТИНАМИ И ВЫПУЧИНАМИ

В. М. ДОЛИНСКИЙ, В. И. ЧЕРЕМСКАЯ, Д. И. БЕРЕСТОВ, М. В. КРАВЕЦ

Получены расчетные зависимости, позволяющие оценить работоспособность сосудов с вмятинами и выпучинами. Эксперименты, выполненные на моделях сосудов, дают хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных. Приведен пример расчета работоспособности сосудов промышленного оборудования.

Dependencies were calculated, which allow evaluation of the performance of vessels with dents and bulges. Experiments made on vessel models, show a good agreement of the design and experimental data. An example of calculation of the performance of vessels of industrial equipment is given.

В ряде действующих нормативных материалов [1] регламентируются возможные искажения формы сосудов. Отступление от принятых норм рассматривается в качестве дефекта, который следует устранить в процессе ремонта.

Существуют расчетные методы оценки несущей способности сосудов, содержащих указанные дефекты. Результаты расчетов приводят к необходимости снижения допускаемого давления [2]. В то же время имеющийся опыт работы технологического оборудования с рассматриваемыми дефектами показал, что возможна безопасная эксплуатация сосудов без снижения нормативного давления.

В УкрНИИХиммаше выполнен комплекс расчетных и экспериментальных исследований, который позволил прогнозировать работоспособность сосудов, работающих под давлением и имеющих выпучины и вмятины.

Работоспособность сосуда определяется статической и циклической прочностью. Условие статической прочности принято определять на основе теории предельного равновесия. Сохраняя консервативный подход, предположим, что вмятины и выпучины вытянуты вдоль цилиндрической обечайки, так что длина вмятины больше ширины. В этом случае задача может быть сведена к оценке несущей способности бесконечной цилиндрической панели. Приняв жесткопластическую диаграмму деформирования, рассмотрим два варианта опирания цилиндрической панели: шарнирное и жесткая заделка по краям [3].

В первом случае предельное состояние достигается при образовании линии пластических шарниров в центре панели, во втором предельное состояние будет достигнуто, когда образуются три линии пластических шарниров в центре и на краях (рис. 1, точки 1, 2).

Уравнения равновесия для вмятины

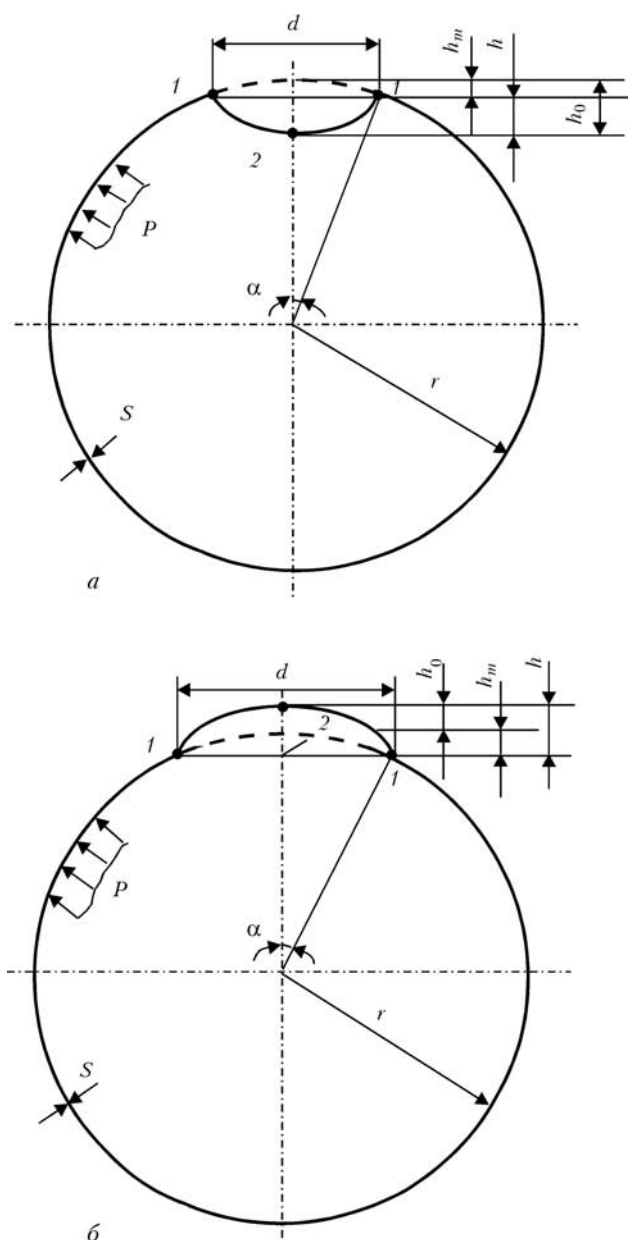


Рис. 1. Обечайки с дефектами формы: а — вмятина; б — выпучина



$$N_1 = Pr \cos \alpha, N_2 = N_1 - Ph, Q = Pr \sin \alpha, \\ M_2 = \frac{QL}{2} - \frac{PL^2}{8} + N_1 h - \frac{Ph^2}{2} - M_1. \quad (1)$$

Уравнения равновесия для выпучины

$$N_1 = Pr \cos \alpha, N_2 = N_1 + Ph, Q = Pr \sin \alpha, \\ M_2 = \frac{QL}{2} - \frac{PL^2}{8} - N_1 h - \frac{Ph^2}{2} - M_1. \quad (2)$$

Уравнения предельного состояния [3]

$$\left(\frac{N_i}{N_0}\right)^2 + \frac{M_i}{M_0} = 1, \quad i = 1, 2.$$

Здесь $N_0 = R_e S, M_0 = \frac{R_e S^2}{4}, P$ — давление среды;

N_i, Q — горизонтальные и вертикальные составляющие внутренних сил; M_i — изгибающие моменты; R_e — предел текучести; r — радиус обечайки; S — толщина стенки.

Решая системы (1)–(3) и (2)–(3), получаем

$$\lambda = \pm \frac{h_0}{S} (A) + \frac{\sqrt{\left[\frac{h_0}{S} (A)\right]^2 + 2[\cos^2 \alpha + (B)^2]}}{\cos^2 \alpha + (B)}, \quad (4)$$

где $A = 2 + \frac{h_0}{\gamma S}, B = 1 + \frac{h_0}{\gamma S}, h_0 < 0$ — для вмятины; $h_0 > 0$ — для выпучины; знак «+» относится к вмятине, «-» — к выпучине; $\lambda = P/P_e$ — относительное предельное давление; $P_e = R_e/\gamma$ — предельное давление для круглой цилиндрической

обечайки; $\gamma = r/S, h_0, \alpha$ — параметры вмятины (рис. 1).

Зависимость (4) прошла экспериментальную проверку. Испытания выполнялись на баллонах, изготовленных из стали 09Г2С с различными вмятинами. Диаметр сосуда — 315 мм; длина 500 мм; толщина стенки — 2,8...2,9 мм; глубина вмятин 15...40 мм; ширина — 115...130 мм; длина — 150 мм.

В различных точках моделей устанавливались часовые индикаторы, которые фиксировали перемещения конструкции по мере повышения давления внутри сосуда. На рис. 2 представлены перемещения (изменение глубины вмятин) с двумя начальными значениями глубин вмятин $h_0/S = 14,2$ и $h_0/S = 6,42$. Там же приведены результаты расчетов по формуле (4).

При малых нагрузках (область упругих деформаций) расчетные данные, основанные на модели жесткопластического тела, не позволяют описать деформирование сосуда в области вмятин. По мере роста нагрузки согласование теоретических и экспериментальных результатов становится вполне удовлетворительным и отражает постепенное ужесточение конструкции в процессе рихтовки вплоть до нагрузки полной рихтовки, когда несущая способность конструкции становится равной предельному давлению круглой цилиндрической оболочки ($\lambda = 1$).

Получено достаточно хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных в случае протяженных вмятин: длина вмятины больше диаметра. В случае коротких вмятин имеет место

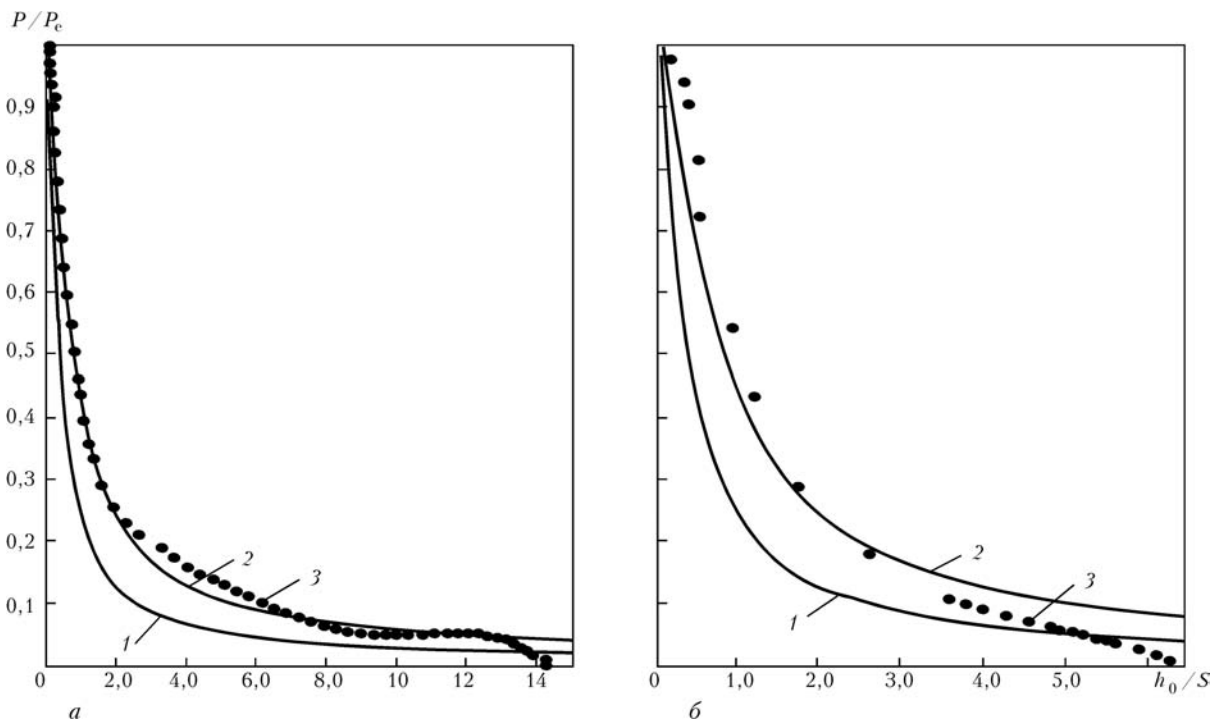


Рис. 2. Зависимость относительного предельного давления ($\lambda = P/P_e$) от относительной глубины вмятины (h_0/S): 1 — шарнирное опирание; 2 — заделка на края; 3 — экспериментальные точки (а — $h_0/S = 14,2$; б — $h_0/S = 6,42$)



консервативная оценка. Давление рихтовки, как и следовало ожидать, больше теоретического значения. Следует отметить, что в случаях длинных и коротких вмятин несущая способность сосуда в целом остается неизменной. Местная потеря несущей способности сосуда приводит лишь к уменьшению дефектов формы сосуда.

Опасность процесса рихтовки возможна в зонах значительного изменения радиуса кривизны, на краях вмятины, что может оказаться существенным при циклическом нагружении. Размах циклических напряжений можно оценить, зная радиус кривизны R_i в центре и на краях вмятины

$$\sigma = \frac{ES}{2} \left(\frac{1}{R_i} - \frac{1}{r} \right). \quad (5)$$

Здесь E — модуль Юнга; R_i — радиус кривизны в точках 1, 2.

Таким образом, по количеству циклов нагружения можно оценить циклическую прочность на основании нормативного документа [4].

Рассмотрим предложенную методику оценки работоспособности сосудов на примере расчета колонны, установленной на ОАО «УКРТАТНАФТА», на обечайке которой при вакуумировании образовалась вмятина.

Исходные данные для расчета:

расчетное внутреннее давление и расчетная температура $P = 0,2$ МПа; $t = 360$ °С;

давление гидроиспытаний $P_{пр} = 0,35$ МПа; внутренний радиус и толщина стенки $r = 2500$ мм; $S = 15,4$ мм; ширина и глубина вмятины $d = 1000$ мм; $h_0 = 50,5$ мм;

радиусы кривизны в точках 1, 2 (см. рис. 1) $R_1 = \infty$; $R_2 = 500$;

предел текучести материала при расчетной (комнатной) температурах $R_e = 206$ (300) МПа;

модуль Юнга при расчетной (комнатной) температурах $E = 1,62 \cdot 10^5$ ($1,99 \cdot 10^5$) МПа;

материал сталь 16ГС; параметр $\gamma = r/S = 162$; предельное давление для круглой цилиндрической обечайки $P_e = R_e/\gamma = 1,27$ (1,85) МПа;

относительное предельное давление $\lambda = P/P_e = 0,157$ (0,189) МПа;

относительная начальная глубина вмятины $h_0/S = 3,28$.

По формуле (4) определяем значение относительной глубины вмятины при рихтовке расчетным давлением $h_0/S = 3,12$, при рихтовке давлением гидроиспытаний $h_0/S = 2,56$. При расчетном давлении вмятина уменьшается на 2,5 мм и ее глубина составит 48 мм; при гидроиспытаниях — на 11,1 мм и ее глубина составит 39,4 мм. Т. е., если гидроиспытания предшествовали рабочему режиму, то уменьшения вмятины не наблюдается.

Размах циклических напряжений (формула (5)) $\sigma = 500$ МПа (точка 1); $\sigma = 2000$ МПа (точка 2). Допускаемое количество циклов нагружения, определяемое напряжениями в точке 2, составляет $[N] = 175$ [4].

Выводы

Вмятины и выпучины не снижают несущую способность сосудов при статическом нагружении; повышение давления приводит к частичному или полному исправлению дефектов формы.

Оценка циклической прочности сосудов с дефектами геометрической формы в виде вмятин может быть выполнена по методу, изложенному в ГОСТ [4].

1. ГСТУ 3-17-191-2000. Посудини та апарати сталні зварні. Загальні технічні умови.
2. РД 26-6-87. Методические указания. Сосуды и аппараты. Методы расчета на прочность с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек.
3. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1968.
4. ГОСТ 25859-83. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках.

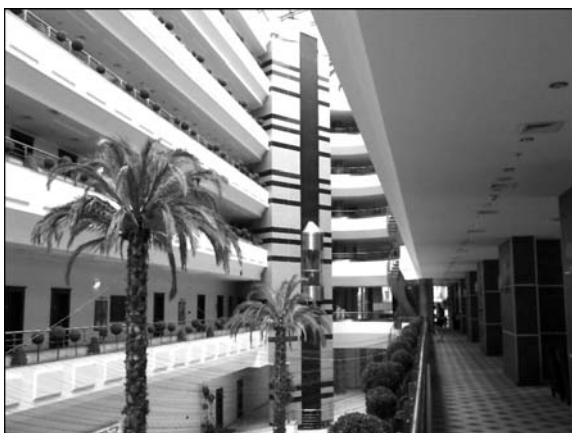


4-я КОНФЕРЕНЦИЯ «ОРГАНИЗАЦИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

7–14 мая 2006 г.

Кемер, Турция

С 7 по 14 мая 2006 г. состоялась 4-я Научно-практическая конференция «**Организация неразрушающего контроля качества продукции в промышленности**». Конференция проходила в пятизвездочном отеле **Grand Haber** в г. Кемер, Турция.



Место проведения конференции — отель Grand Haber, г. Кемер

Организаторами конференции выступили *Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики*, НПФ «*Диагностические приборы*», НПФ «*Ультракон*». Основной объем работы по подготовке и проведению конференции взяли на себя сотрудники ЧП «*ДП-Тест*».

В четвертый раз ведущие специалисты в области НК могли напрямую пообщаться как между собой, так и с руководителями предприятий – потребителей средств неразрушающего контроля. В конференции приняли участие представители известных в Украине и за ее пределами предприятий и организаций: Арматор (Днепропетровск); Госпромгорнадзор Украины (Одесса); Диагностические приборы (Киев); ДП-Тест (Киев); Инжиниринговые технологии (Киев); Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАН Украины (Киев); Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины (Харьков); Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (Киев); Национальный техни-



В зале заседаний конференции

ческий университет нефти и газа (Ивано-Франковск); Кодак (Москва, Россия); Крымский Титан (Армянск); Нижнеднепровский трубопрокатный завод (Днепропетровск); Молдоватрансгаз (Молдова); Одесский припортовый завод (Южный); ОКТЬ ИЭС им. Е. О. Патона (Киев); АС Подводтрубопровод (Киев); Прикарпатзападтранс (Ровно); Пульсар (Донецк); Розен ЮРОП Б. В. (Киев); Техдиагаз (Киев); Укргазпроект (Киев); Укртрансгаз (Киев), Укртранснафта (Киев); Ультракон (Киев); Ультрасоник (Киев); Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины (Львов).

Более 80 специалистов и сопровождающих лиц из Украины, России, Молдовы стали участниками конференции. В научной программе конференции было представлено 32 доклада, среди участников конференции — 6 докторов наук, 7 кандидатов наук.

С большим интересом были встречены слушателями доклады академика **Л. М. Лобанова** (ИЭС им. Е. О. Патона), проф. **В. А. Троицкого** (ИЭС им. Е. О. Патона), проф. **О. М. Карпаша** (НТУНГ), проф. **Л. А. Матвеевой** (Институт физики полупроводников), проф. **Р. Г. Джала** (Физико-механический институт), канд. техн. наук Н. Г. Белого (ИЭС им. Е. О. Патона), **В. Л. Найды** (ОКТЬ ИЭС им. Е. О. Патона), канд. техн. наук **Е. К. Лисецкой** (Институт сцинтилляционных материалов), **А. В. Павлия** (Диагностические приборы), **А. А. Мозжухина** (ОКТЬ ИЭС им. Е. О. Патона), **В. А. Нарижного** (Арматор), И. В. Павлия (Ультракон), **О. В. Бакаева** (Розен ЮРОП Б. В.), **А. Н. Козина** (ДП-Тест) и др.

Внимание участников конференции привлекли представленные результаты исследований и разработок по вихретоковой и ультразвуковой дефектоскопии, рентгеноскопии, рентгенографии, которые показали современное состояние и перспективы этих методов.

Проблемные вопросы технического диагностирования объектов энергетического комплекса и продлению установленного срока службы металлических конструкций были рассмотрены в докладах **Л. М. Лобанова**, **О. М. Карпаша**, **Р. М. Джала**.

Доклад проф. В. А. Троицкого, президента Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики, был посвящен вопросам разработки и использования оборудования для электромагнитного преобразования ультразвуковых волн, которое привлекает все большее внимание для решения задач автоматизации ультразвукового контроля листов, труб, сварных швов небольшой толщины.

Высокую оценку присутствующих получили достижения ОКТЬ ИЭС им. Е. О. Патона по автоматизации ультразвукового контроля труб большого диаметра и вихретоковому контролю труб теплообменных агрегатов атомных электростанций, представленные в докладах **В. Л. Найды** и **А. А. Мозжухина**. Повышенный интерес вызвал цветной, звуковой фильм о новейших разработках ИЭС им. Е. О. Патона для Выксунского металлургического завода, который сделан на очень



Морская прогулка на яхте

высоком уровне и наглядно продемонстрировал высокий уровень техники для автоматизированного неразрушающего контроля в линиях трубного производства.

На таком же высоком уровне прошла презентация представителей компаний **Розен ЮРОП Б. В.** и **ДП-Тест**, которые являются ведущими поставщиками в своих сферах деятельности. Розен ЮРОП Б. В. предоставляет самые современные услуги внутритрубной диагностики магистральных трубопроводов, а ДП-Тест яв-

ляется ведущим украинским поставщиком импортного оборудования и материалов для неразрушающего контроля — от материалов для капиллярного контроля и рентгеновской пленки до рентгентелевизионных комплексов и автоматизированных систем ведущих компаний с мировыми брендами.

Нередкими были случаи, когда докладчики намеренно отходили от заявленной темы выступления, чтобы обсудить наиболее актуальные проблемы организации неразрушающего контроля и технического диагностирования.

Комфортные условия пребывания, теплая погода, ласковое Средиземное море в окружении Таурских гор, интересная культурная программа, включившая посещение симфонического концерта в древнеримском амфитреатре Аспендос, морская прогулка на яхте, дружеский ужин в непринужденной обстановке способствовали активному общению и продолжению дискуссий за пределами конференц-зала. Участники конференции набрались сил и новых впечатлений и выразили желание встретиться снова на 5-й конференции в мае следующего года.

*А. Н. Козин,
исполнительный директор Оргкомитета*



П'ЯТА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ»

25–26 квітня 2006 р.

Київ, НТУУ «КПІ»

25–26 квітня 2006 року в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» відбулася П'ята науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Метою конференції було спілкування фахівців з питань перспективних розробок, прецизійних технологій, нових рішень в приладобудуванні; зустріч з керівниками провідних підприємств, формування спільних проектів, пошук партнерів для співпраці.

Роботу конференції розпочали урочистою промовою заступник проректора з наукової роботи НТУУ «КПІ» **Воронов С. О.** та голова програмного комітету, декан приладобудівного факультету НТУУ «КПІ» **Тимчик Г. С.** На пленарному засіданні виступили науковці університету та гості з підприємств та організацій, діяльність яких пов'язана з приладобудівною галуззю. Серед гостей пленарного засідання конференції: **Лихоліт М. І.**, перший заступник генерального директора КП ЦКБ «Арсенал»; **Дашковський О. А.**, голова правління ЗАТ «Украналіт»; **Міхєєва І. Л.**, **Орлов М. А.**, ЗАТ «Украналіт»; **Крук І. С.**, заст. директора НАК «Нафтогаз України» ДК «Укртрансгаз» та ін.

В межах конференції на кафедрі приладів та систем неруйнівного контролю НТУУ «КПІ» працювала секція «*Неруйнівний контроль, технічна та медична діагностика*». В роботі секції взяли участь більше тридцяти фахівців у галузі неруйнівного контролю з різних міст

України. На пленарному засіданні від секції виступив головний конструктор ВО «Київприлад» **Кульбачний В. П.**

Доповідачі у своїх виступах висвітлювали такі актуальні в наш час питання, як діагностика стану високовольтних ізоляторів під напругою (Серебренников С. В., Сіріков О. І., Кротовський В. П., НТУ, м. Кіровоград), дослідження розвитку мікротріщин у напружено-деформованих конструкціях (Чеховський С. А., Габльовська Н. Я., ІВНТУ, м. Івано-Франківськ), вплив факторів оточуючого середовища на проведення теплового контролю енергообладнання (Петрик В. Ф., Юрченко Г. С., НТУУ «КПІ», м. Київ), тепловізія діагностика електронних вузлів телекомунікаційної апаратури (Стороженко В. А., Малик С. Б., Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків) та багато інших.

Значну частину доповідей надали науковці НТУУ «КПІ», в тому числі викладачі, студенти і магістранти кафедри приладів та систем неруйнівного контролю. Своє бачення проблем неруйнівного контролю, технічної та медичної діагностики, а також можливі шляхи їх вирішення представили старший викладач кафедри **Лігоміна С. М.** та асистент **Галаган Р. М.**, а також студенти IV–VI курсів.

Оргкомітет конференції



Международные специализированные выставки



НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ (NDT)

ЛАБОРАТОРНЫЙ КОНТРОЛЬ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ (LAB)

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И АВТОМАТИЗАЦИЯ (МЕРАТЕК)



16-19 мая, 2006 г., Москва, СК «Олимпийский»

16–19 мая 2006 года в СК «Олимпийский» в Москве с успехом прошли 5-я Международная специализированная выставка и конференция NDT — «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности», а также выставки LAB (Лабораторный контроль в промышленности) и МЕРАТЕК (Измерительные приборы и автоматизация).

Организаторы выставок — международные выставочные компании «ПРИМЭКСПО» и GTE Group Pie при содействии РОНКТД (Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике).

Официальная поддержка:

Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору

Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии

Федеральное космическое агентство

ОАО «Российские железные дороги»

Международный комитет по неразрушающему контролю (ICNDT)

Европейская Федерация по неразрушающему контролю (EFNDT).

По словам руководителя Федерального космического агентства А. Н. Перминова: «*Опыт прошлых лет подтвердил на практике, что выставка NDT является демонстрацией лучших образцов и способствует внедрению в промышленности передовых методов и средств неразрушающего контроля и технической диагностики, направленных на повышение качества и безопасности применения продукции.*

«*Сегодня исключительно важно уделять внимание реализации промышленной, научно-технической и инновационной политики в целях совершенствования структуры экономики и достижения ее устойчивого роста. Надеюсь, что ставшие ежегодными выставки и конференция NDT и выставка МЕРАТЕК познакомят представителей российской промышленности с наиболее современными и эффективными средствами и методами контроля качества продукции и безопасности производства.*» — В. И. Якунин, Президент ОАО «РЖД».

В этом году свои достижения на выставке представили 172 компании. Количество посетителей превысило 7 500 человек.

ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВОК

Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности

- Акустический контроль
- Ультразвуковой контроль
- Вихретоковый контроль
- Визуальный и оптический контроль
- Лазерные технологии НК
- Магнитопорошковый контроль
- Электромагнитный контроль
- Инфракрасный и термический контроль
- Вибрационный контроль
- Капиллярный контроль
- Течеискание
- Радиографический контроль
- Электрический контроль
- Радиационный контроль
- Контроль трубопроводов
- Обучение и сертификация персонала
- Аттестация лабораторий
- Экспертиза и диагностика опасных производственных объектов

Лабораторный контроль в промышленности

- Лабораторное оборудование и приборы
- Контрольно-измерительное оборудование
- Весоизмерительная техника
- Приборы и оборудование для электрохимии
- Лабораторное оборудование для нагрева и охлаждения
- Лабораторные мешалки, встряхиватели
- Оборудование для подготовки проб к анализу



- Системы и оборудование для очистки воды
- Лабораторное оборудование для биотехнологии
- Лабораторная мебель, вытяжные и ламинарные шкафы
- Оборудование для исследования растворимости
- Газовые и жидкостные хроматографы, оборудование для хроматографии
- Фильтры и фильтрационные материалы
- Оборудование для метеорологических исследований
- Технологии и оснащение чистых помещений
- Оборудование для дозирования жидкости

- Оптические приборы для лабораторий
- Приборы и инструменты для спектроскопии
- Оборудование для мобильной лаборатории
- Аналитическое оборудование и приборы
- Защитные приборы и спецодежда
- Резино-технические изделия
- Приборы и оборудование для испытания и контроля свойств материалов
- Химические реактивы, сверхчистые вещества и катализаторы
- Приборы для химического анализа
- Программное обеспечение для лабораторий

Измерительные приборы и автоматизация

ПРОМЫШЛЕННАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ

- Комплексная автоматизация промышленных предприятий
- Промышленные компьютеры и сети
- Оборудование для встраиваемых и бортовых систем сбора данных и управления
- Электронные модули для жестких условий эксплуатации

- Услуги по системной интеграции в области АСУ ТП
- SCADA-системы, MES-системы и системы реального времени
- Взрывозащищенное электрооборудование
- Датчики, системы идентификации, первичные преобразователи, электроприводы
- Испытательные системы и тренажеры для САУ

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

- Средства измерения различных физических величин и технологических параметров промышленного и научного назначения
- Приборы и системы для испытаний, сертификации и контроля качества материалов и готовой продукции
- Сенсоры и сенсорные системы, измерительные преобразователи
- Измерительные информационные системы и системы обработки данных измерений и испытаний

- Лабораторная и аналитическая техника
- Приборы и системы учета и контроля энергоресурсов
- Средства метрологического обеспечения в промышленности и в науке
- Измерительные приборы и системы, основанные на использовании лазерной и оптоволоконной техники

ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА ВЫСТАВКИ

16 мая прошла пресс-конференция, посвященная открытию выставки и конференции. В пресс-конференции приняли участие:

Клюев В. В. — Президент Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД).





Хапонен Н. А. — заместитель начальника управления Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору.

Муравская Н. П. — заместитель директора ВНИИ ОФИ (Ростехрегулирование).

Кузелев Н. Р. — Генеральный директор ВНИИТФА (Минатом России). Бадах М. — директор выставок NDT, LAB, MERATEK.

«Сейчас в России обсуждаются 4 национальные программы. На мой взгляд, главная из них — по безопасности. Выставка NDT — фактически выставка,

посвященная безопасности, и это очень важно». — Клюев В. В.

На официальной церемонии открытия выставки участников и гостей приветствовали **Клюев В. В., Хапонен Н. А., Власов С. Е.** (заместитель начальника управления Федерального агентства по атомной энергии), **Строен Э.** (член совета директоров ГТЕ Group).

В рамках выставки прошла конференция NDT — «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности».

Торжественный вечерний прием по случаю открытия выставки и конференции

На вечернем приеме в ресторане «Одесса» гостиницы «Ренессанс» организаторы наградили памятными дипломами лучшие компании-участницы.

Впервые в этом году были награждены компании, представившие на выставке NDT новейшие разработки

приборов неразрушающего контроля. Продукцию участников оценивало компетентное жюри.

«Мы приветствуем введение нового оборудования в эксплуатацию. Надеемся, что выставка NDT положительно повлияет на безопасность в российской промышленности», — Хапонен Н. А. (Ростехнадзор).



НОМИНАЦИЯ	ПОБЕДИТЕЛЬ
За серию бетатронов	НИИ Интроскопии (Томск)
За радиационную систему комплексного контроля	ВНИИ Автоматики им. Н. Л. Духова
За универсальный видеозендоскоп IP-LEXmx	OLYMPUS
За магнитный сканер швов Скм-Ш	АВТОГАЗ
За сканирующие системы УЗ-контроля	НПЦ КРОПУС
За серию УЗ-преобразователей	АМАТИ-АКУСТИКА
За вихретоковый дефектоскоп БД-70	НПК ЛУЧ
За АЭ-систему мониторинга	ДИАПАК/PHYSICAL ACOUSTIC
За высокоточный трассоискатель ОНИКС	АКА-ГЕО
За серию пенетрантов	БИКОТЕСТ

В 2007 г. выставки NDT, LAB и MERATEK пройдут 15–18 мая в СК «Олимпийский» в Москве.

ОРГКОМИТЕТ:

ООО ПРИМЭКСПО
<http://www.primexpo.ru>
<mailto:journal@primexpo.ru>
 190000 Санкт-Петербург, ул. Малая Морская, 23
 Тел.: +7 (812) 380-6010
 Факс: +7 (812) 380-6001



УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПЛАКАТЫ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ

С целью популяризации достижений в области неразрушающего контроля сварных соединений в **Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (ИЭС)** разработан комплект учебно-методических плакатов по основным проблемам неразрушающего контроля. Они посвящены наиболее актуальным задачам дефектоскопии таким, как:

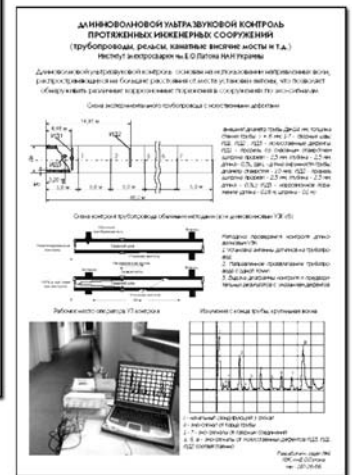
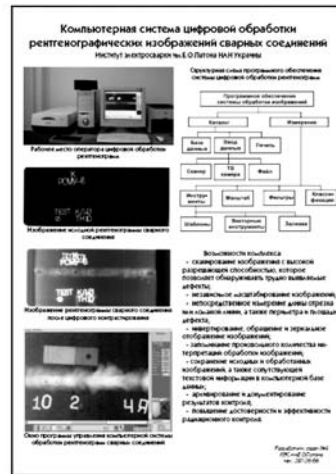
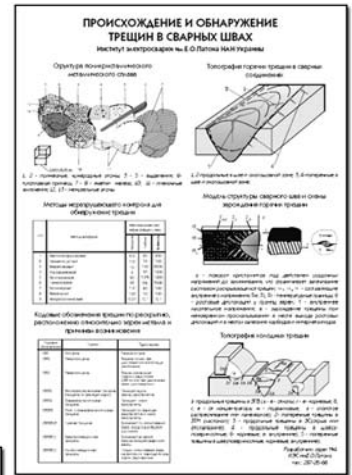
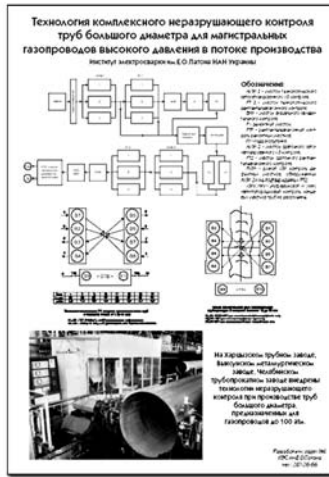
- происхождение и обнаружение различного рода трещин в сварных швах;
- обнаружение дефектов в сварных швах изделий из пластмасс;
- использование ультразвуковых волн дифракции для точного определения размеров внутренних трещин (метод TOFD);
- длинноволновой низкочастотный ультразвуковой контроль протяженных инженерных сооружений;
- компьютерная система цифровой обработки рентгенографических изображений сварных соединений;
- определение утонений металла, наличия зазоров, инородных наслоений методом тангенциального просвечивания;
- технология комплексного неразрушающего контроля труб для магистральных газопроводов;
- акустическая эмиссия — перспективный метод неразрушающего контроля;
- намагничивающие устройства на основе постоянных магнитов;
- вихретоковый контроль, новые технологические возможности.

Плакаты выполнены на формате А1, частично в псевдоцвете, имеют краткие локаничные пояснения, рассчитанные на массового читателя.

Учебно-методические плакаты рассчитаны на слушателей учебных и аттестационных центров подготовки специалистов по неразрушающему контролю.

Более подробную информацию по каждой теме можно найти в учебных пособиях, изданных в ИЭС:

1. **Троицкий В. А., Радько В. П., Демидко В. П.** и др. Неразрушающий контроль качества сварных конструкций. — Киев: Техника, 1986. — 320 с.



2. **Троицкий В. А.** Магнитопорошковый контроль сварных соединений и деталей машин. — Киев: Феникс, 2002. — 300 с.

3. Ультразвуковой контроль: дефектоскопы, нормативные документы, стандарты по УЗК / Составитель Троицкий В. А. — Киев: Феникс, 2006. — 224 с.

4. **Троицкий В. А.** Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. — Киев: Феникс, 2006. — 320 с.

Заявки на поставку комплекта плакатов (11 шт.) и указанной литературы можно сделать по тел./факсу: (044) 289-21-66.



**VII-й научно – технический семинар
«БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОМПРЕССОРНОГО
И НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

9-13 октября 2006 года

Организаторы семинара:



Одесский Припортовый завод, г. Южный



«ТРИЗ» ЛТД ООО, г. Сумы

Тематика семинара:

- современные технологии, комплектующие, материалы и вспомогательные системы для повышения надежности компрессорного и насосного оборудования,
- диагностика, мониторинг, определение остаточного ресурса,
- энерго- и ресурсосберегающие технологии,
- модернизация оборудования с целью повышения производительности и экономичности,
- усовершенствование системы обслуживания и управления ремонтами,
- деловое общение.

На семинар по традиции приглашаются ведущие специалисты технических служб предприятий химической и нефтехимической промышленности.

Впервые на семинаре планируется работа секций для технических специалистов газовой, металлургической промышленности, энергетики и приглашаются ведущие специалисты технических служб этих отраслей.

Для предприятий - поставщиков имеется возможность организации выставок и презентаций.

Место проведения семинара: Оздоровительный комплекс «Чабанка», пгт. Черноморское, Коминтерновский район, Одесская обл., Украина

Информационные спонсоры: журнал «Химическая техника» г. Москва; журнал «Компрессорная техника и пневматика» г. Москва; журнал «Химическое и нефтегазовое машиностроение» г. Москва; журнал «Мир техники и технологий» г. Харьков; журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» г. Киев; журнал «Вибрация машин: измерение, снижение, защита» г. Донецк; журнал «Новини енергетики» г. Киев

Оргкомитет семинара: «ТРИЗ» ЛТД ООО, ул. Машиностроителей, 1, 40020, г. Сумы, Украина.

Для корреспонденции: а/я 1241.

Тел.: (0542) 349-076, 349-075, 349-829, факс (0542) 212-801, 349-075,

e-mail: economist@triz.sumy.ua, peleshuk@triz.sumy.ua, triz@triz.sumy.ua



**Украинский информационный Центр
«НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ»**

02094, г. Киев, ул. Минина, 3, к. 47

☒ : 02094, г. Киев, а/я 41; Тел./факс: +38 (044) 573-30-40 с 8.00–14.00, моб.: 067 708 93 95;

E-mail: office@conference.kiev.ua, www.conference.kiev.ua

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в работе ежегодных научно-практических конференций, семинаров, круглых столов, выставок, организуемых Украинским информационным Центром «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ».

**Четырнадцатая ежегодная международная конференция и выставка
«Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»**

16–20 октября 2006 г.

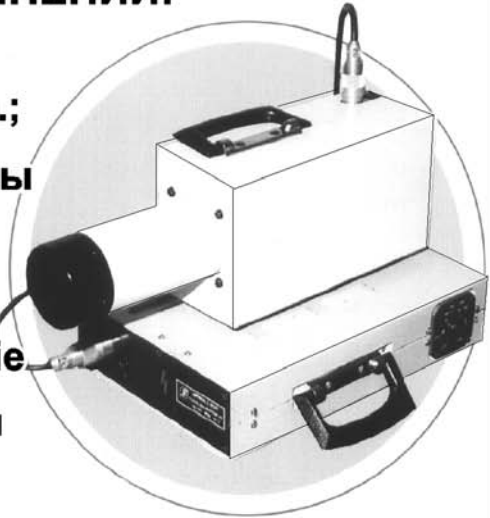
г. Ялта

Тематика конференции:

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

**ІЗОТОП****КОМПЛЕКСНЫЕ ПОСТАВКИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ
КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ТРУБОПРОВОДОВ
И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ:**

- рентгеновские аппараты серии "АРИНА", "САРМА", "РАТМИР" и др.;
- рентгеновская пленка, химреактивы и проявочная техника AGFA NDT;
- расходные материалы для капиллярной и магнитопорошковой дефектоскопии ARDROX, MR-Chemie
- принадлежности для радиографии



03680, ГСП, г. Киев, ул. Горького, 152, телефон/факс: (044) 528-90-00
E-mail: ndt@izotop.kiev.ua

**НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА
«ПРОМСЕРВІСДІАГНОСТИКА»**

Тел./факс: (044) 200-88-13 ❖ Тел.: (044) 200-84-74 ❖ E-mail: promsdiag@ukr.net

Наша фірма на протязі багатьох років, використовуючи власну матеріальну базу та сучасні методи неруйнівного та руйнівного контролю й оцінки результатів випробувань, проводить роботи з неруйнівного та руйнівного контролю, технічного діагностування та чергового і позачергового технічного огляду посудин, що працюють під тиском, в тому числі цистерн; резервуарів для зберігання нафти та нафтопродуктів; вантажопідіймальних механізмів; парових і водогрійних котлів, трубопроводів пари та гарячої води; технологічного обладнання та трубопроводів хімічних, нафтохімічних та нафтогазопереробних виробництв; систем газопостачання; АГНКС; магістральних газо- та нафтопроводів; криогенного обладнання; несучих та огорожуючих конструкцій (Дозволи на продовження робіт № 1447.04.30-74.30.0; 1894.0430-74.30.0; 1930.04.30-74.30.0; П46.05.30-74.30.0 Держнаглядохоронпраці України та Ліцензія Держбуду України № 105368 від 7 червня 2005 р.).

Нашою фірмою розроблено комплекс акустично-емісійного контролю об'єктів підвищеної небезпеки Міністерства політики України «АКОРД», що пройшов державні випробування та метрологічну атестацію в 2005 р. і є значно дешевшим за аналоги зарубіжного виробництва.

Ми тісно співпрацюємо з фахівцями ІЄЗ ім Є. О. Патона НАН України та іншими субпідрядниками і за час діяльності провели спільно з ними дослідження характеру розшарувань газових сепараторів; дослідження причин руйнування підземних магістральних трубопроводів, посудин, що працюють під тиском з технологічними об'язками, резервуарів для зберігання нафти та нафтопродуктів, технологічного обладнання, газорозподільних станцій ВАТ «Укрнафта» (НГВУ «Охтирканафтогаз»), ДП «Харківтрансгаз» та інших підприємств, виявили десятки одиниць обладнання, що мало небезпечні дефекти і усунули їх.

При виникненні у Вас пропозицій щодо неруйнівного та руйнівного контролю, технічного діагностування, технічного огляду (опосвідчення) названих вище об'єктів, придбання комплексу акустично-емісійного контролю ми готові до співпраці.



ОАО «ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «УКРЭНЕРГОЧЕРМЕТ»

УЧЕБНЫЙ И АТТЕСТАЦИОННЫЙ ЦЕНТРЫ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ

пр. Ленина, 58, г. Харьков, 61072
тел. (057) 763-03-26, 763-03-27, 763-03-23; факс (057) 340-44-40
E-mail: acnk@energochermet.com, http://www.ndt-vostok.com.ua

ПРОВОДЯТ ПОДГОТОВКУ И АТТЕСТАЦИЮ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ:

- ◆ на I, II и III уровень квалификации согласно требований Международного стандарта ДСТУ EN 473-2001 «Квалификация и сертификация персонала в области неразрушающего контроля»;
- ◆ на I и II уровень квалификации в соответствии с Правилами ДНАОП 0.00-1.27-97 «Правила аттестации специалистов по неразрушающему контролю».

ПО СЛЕДУЮЩИМ МЕТОДАМ НК:

- | | |
|-----------------------|-----------------------------|
| ✓ Радиационный (RT)* | ✓ Капиллярный (РТ) |
| ✓ Ультразвуковой (УТ) | ✓ Визуально-оптический (VT) |
| ✓ Магнитный (МТ) | |

* - аттестация только согласно ДНАОП 0.00-1.27-97

Компетентность Учебного и Аттестационного центров подтверждена аудитом **Немецкого головного органа по аккредитации (TGA)**.

Преподавательский состав, экзаменаторы и аттестационные комиссии центров укомплектованы высококвалифицированными специалистами по НК, имеющими II и III уровень квалификации по НК и аттестованными в соответствии с международными нормами.

Учебный и Аттестационный центры оснащены современными приборами и оборудованием, национальной и европейской нормативно-технической и методической базой по неразрушающему контролю.

Свидетельство об аккредитации **DAR TGA** (Германия) регистрационный №TGA-ZP-06-98-70.

Сертификат компетентности Органа по сертификации персонала Ассоциации «Укрэксперт» №01.ОСП.05.EN

Разрешения Органа по сертификации персонала Ассоциации «Укрэксперт» №001.ОСП.03.A №002.ОСП.03.Y

ГП «АТТЕСТАЦИОННЫЙ ЦЕНТР НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ» ПРИ ИНСТИТУТЕ ЭЛЕКТРОСВАРКИ ИМ. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ

ПРОВОДИТ

неразрушающий контроль (визуально-измерительный, ультразвуковой, радиационный, капиллярный, магнитопорошковый, контроль герметичности); техническое диагностирование и техническое освидетельствование следующего оборудования:

- ✦ металлоконструкций и строительных конструкций
- ✦ паровых и водогрейных котлов
- ✦ сосудов, работающих под давлением
- ✦ трубопроводов пара и горячей воды
- ✦ грунтоподъемных кранов
- ✦ технологических трубопроводов и оборудования
- ✦ магистральных трубопроводов
- ✦ резервуаров для хранения нефтепродуктов
(Разрешение на начало работ № 32.03.30–31.62.3)



АТТЕСТУЕТ

специалистов неразрушающего контроля по следующим методам:

- ✦ визуально-оптическому
- ✦ ультразвуковому
- ✦ радиационному
- ✦ магнитопорошковому
- ✦ капиллярному
- ✦ контролю герметичности



ИЗГОТАВЛИВАЕТ

стандартные образцы предприятия с зарубками, боковыми и плоскостными сверлениями в соответствии с требованиями нормативных документов

03680, г. Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 17
Тел.: (044) 200-81-83; 490-71-19



ПОДПИСКА – 2007 на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

<i>Стоимость подписки через редакцию*</i>	Украина		Россия		Страны Дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
	60 грн.	120 грн.	600 руб.	1200 руб.	26 долл. США	52 долл. США
*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.						

Если Вас заинтересовало наше предложение, заполните, пожалуйста, купон и отправьте заявку по факсу или электронной почте.

Телефоны и факсы редакции журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»: тел.: (38044) 271-23-90, 271-24-03, 529-26-23, факс: (38044) 528-34-84, 529-26-23.

ПОДПИСНОЙ КУПОН

Адрес для доставки журнала _____

Срок подписки с _____

200 г. по

200 г. включительно

Фамилия И. О. _____

Компания _____

Должность _____

Тел., факс, E-mail _____

Подписку на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» можно оформить также: в Украине: подписные агентства «Пресса», «Идея», «Саммит», «Прессцентр», KSS, «Блиц-Информ»; в России: подписные агентства «Роспечать», Пресса России.

РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Обложка наружная, полноцветная

Первая страница обложки (190×190 мм) — 500 \$

Вторая страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

Третья страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

Четвертая страница обложки (200×290 мм) — 400 \$

Обложка внутренняя, полноцветная

Первая страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

Вторая страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

Третья страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

Четвертая страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

Четвертая страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

Внутренняя вставка

Полноцветная (200×290 мм) — 300 \$

Полноцветная (разворот А3) (400×290 мм) — 500 \$

Полноцветная (200×145 мм) 150 \$

Черно-белая (170×250 мм) — 80 \$

Черно-белая (170×125 мм) — 50 \$

Черно-белая (80×80 мм) — 15 \$

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу.

- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу.

- Статья на правах рекламы — 50% стоимости рекламной площади.

- При заключении рекламных контрактов на сумму, превышающую 1000 \$,

предусмотрена гибкая система скидок.

Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290 мм.

- 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 IBM PC

- Corell Draw, версия до 10.0

- Adobe Photoshop, версия до 7.0

- QuarkXPress, версия до 5.0

- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi.

Подписано к печати 25.07.2006. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 7,3. Усл. кр.-отт. 7,6. Уч.-изд. л. 8,3 + 2 цв. вклейки.

Цена договорная.