

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

№ 3, 2001

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

Издается с января 1989 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

<i>НЕДОСЕКА А.Я., НЕДОСЕКА С.А., ОЛЕЙНИК Р.А.</i> Распространение волн акустической эмиссии в пластинах от действия локального источника излучения	3
<i>РАДЫШ Ю.В., КИРЕЕВ А.С.</i> Совершенствование методов контроля геометрической формы стальных вертикальных резервуаров при техническом диагностировании	11
<i>СКАЛЬСЬКИЙ В.Р., ІВАНИЦЬКИЙ Я.Л.</i> Засоби для дослідження матеріалів у середовищі водню високих параметрів	15
<i>РОЙТМАН А. Б., АНПИЛОГОВ Д.И.</i> Диагностика повреждения свободно колеблющихся пологих цилиндрических оболочек	19
<i>МАКОВСКИЙ А.М.</i> Методология технической диагностики грузоподъемных кранов	25
<i>ГЕЛЬМАН Л.М., УДОВЕНКО Л.Н.</i> Новые признаки, основанные на преобразовании Фурье, для диагностики и распознавания образов	27

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

<i>РЫЖИКОВ В.Д., СТАРЖИНСКИЙ Н.Г., КОЗИН Д.Н., ГАЛЬЧИНЕЦКИЙ Л.П., ЛИСЕЦКАЯ Е.К., СВИЦ В.М., ОПОЛИН А.Д.</i> Детекторы сцинтиллятор фотодиод для инспекционных рентгеновских интроскопических систем	29
<i>ГИРЕНКО В.С., СЕМЕНОВ С.Е., ГОНЧАРЕНКО Л.В.</i> Деформационное старение трубных сталей	32
<i>ЦУРИКОВ О.Н.</i> Совершенствование методики диагностирования авиационных двигателей	36
<i>РАХИМОВ Н.Р., КАСЫМАХУНОВА А.М., УСМОНОВ Ш.</i> Оптоэлектронные средства неразрушающего контроля физико-химических параметров жидких сред	40
<i>ДУБРОВИН В.Н., СУББОТИН С.А., ЯЦЕНКО В.К.</i> Методика оценки коэффициента упрочнения деталей газотурбинных авиадвигателей	42
<i>ЕМЕЛЬЯНОВ О.А., ШЕПОТЬКО В.П., ЛУБЕНЕЦ, ПИХОТА Ю. В.</i> Силовое взаимодействие крана с путями. Влияние точности установки колес на движение крана	46
<i>КАПУСТИН А.Э., БАРДУСОВА И.И., ДЕЧКО М.М.</i> Оценка качества рентгеновских снимков сварных соединений	48
<i>БЕЛЫЙ Н.Г., ПАВЛИЙ А.В.</i> Обзор: современные технические радиографические пленки для неразрушающего контроля	50

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

Визит президента IC NDT Д.Нардони в Украину	52
Пятая конференция-выставка Ассоциации «ОКО» «Неразрушающий контроль-2001»	54
3-я Международная конференция «Диагностика трубопроводов»	58
Открыт сайт УО НКД в Интернете!	60
Рефераты	61

РЕКЛАМА	64
---------------	----

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. Ключев,
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. И. Степаненко,
В. А. Стрижало, А. Я. Тетерко,
А. Ф. Улитко, 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) 261-58-81, 269-26-23
Факс: (044) 268-04-86
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Научные редакторы

Ю. Н. Посыпайко, А. А. Грузд

Редактор

Г. В. Ольшевская

Электронная верстка

Н. Н. Кравченко, А. И. Сулима,
И. В. Петушков

Свидетельство

о государственной регистрации
КВ 4787 от 09.01.2001

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

Журнал издается при содействии:

Технического комитета по стандартизации «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»



Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики

TECHNICAL DIAGNOSTICS and NON-DESTRUCTIVE TESTING

№ 3, 2001

Founded in January, 1989

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

CONTENTS

TECHNICAL DIAGNOSTICS

<i>NEDOSEKA A.YA., NEDOSEKA S.A., OLEINIK R.A.</i> Propagation of acoustic emission waves in plates, induced by a local radiation source	3
<i>RADYSH YU.V., KIREEV A.S.</i> Improvement of the methods of control of the geometrical shape of vertical steel tanks in technical diagnostics	11
<i>SKALSKY V.R., IVANITSKY Ya.L.</i> Means for material investigation in high-parameter hydrogen medium	15
<i>ROITMAN A.B., ANPILOGOV D.I.</i> Diagnostics of damage in freely vibrating shallow cylindrical shells	19
<i>MAKOVSKY A.M.</i> Methodology of technical diagnostics of load-carrying cranes	25
<i>GELMAN L.M., UDOVENKO L.N.</i> New features based on Fourier transformation for image diagnostics and identification	27

NON-DESTRUCTIVE TESTING

<i>RYZHIKOV V.D., STARZHINSKY N.G., KOZIN D.N., GALCHINETSKY L.P., E.K.LISETSKAYA E.K., SVISHCH V.M., OPOLIN A.D.</i> Scintillator-LED detectors for inspection of X-ray introscopy systems	29
<i>GIRENKO V.S., SEMENOV S.E., GONCHARENKO L.V.</i> Deformational ageing of pipe steels	32
<i>TSURIKOV O.N.</i> Improvement of diagnostic procedure for aircraft engines	36
<i>RAKHIMOV N.P., KASYMAKHUNOVA A.M., USMONOV Sh.</i> Optical electronic means of nondestructive evaluation of physico-chemical parameters in liquid media	40
<i>DUBROVIN V.N., SUBBOTIN S.A., YATSENKO V.K.</i> Procedure for evaluation of strengthening coefficient of gas turbine aircraft engine parts	42
<i>EMELYANOV O.A., SHEPOTKO V.P., LUBENETS S.V., PIKHOTA Yu.V.</i> Force interaction of a crane with tracks. Influence of the accuracy of mounting the wheels on crane movement	46
<i>KAPUSTIN A.E., BARDUSOVA I.I., DECHKO M.M.</i> Assessment of the quality of X-ray photographs of welded joints	48
<i>BELYI N.G., PAVLIY A.V.</i> Review: Advanced technical radiographic Films for NDT	50

NEWS AND INFORMATION

Visit of Mr. D.NARDONI, IC NDT President, to Ukraine	52
«Non-Destructive Testing-2001» — 5th Conference-Exhibition of «OKO» Association	54
3rd International Conference on Pipeline Diagnostics	58
US NDT site is available	60
Abstracts of articles	61

ADVERTISING	64
-------------------	----

BOARD OF EDITORS

Editor-in-Chief

B. E. Paton

A. Ya. Nedoseka (vice-chief ed.),
V. A. Troitsky (vice-chief ed.),
Z. A. Mайдan (exec. secr.),
I. P. Belokur, Yu. K. Bondarenko,
V. L. Vengrinovich, E. F. Garf,
A. A. Gruzhd, 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. Ulitko,
T. M. Shvets, N. N. Zatsepin

Address:

The E. O. Paton Electric
Welding Institute
of the NAS of Ukraine,
11 Bozhenko str., 03680,
Kyiv, Ukraine

Tel.: (38044) 261 58 81,
261 54 03, 269 26 23
Fax: (38044) 268 04 86

E-mail: journal@paton.kiev.ua
office@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Scientific editors

Yu.N.Posypaiko, A.A.Gruzhd

Editor G. V. Olshevckay

Electron galley

N. N. Kravchenko,
A. I. Sulima, I. V. Petushkov

State Registration Certificate
KV 4787 of 09.01.2001

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ПЛАСТИНАХ ОТ ДЕЙСТВИЯ ЛОКАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, Р. А. ОЛЕЙНИК

Создание и совершенствование современных технологий акустико-эмиссионной диагностики невозможно без точного знания законов распространения упругих волн в материалах. В последнее время этому вопросу посвящен ряд публикаций [1–17]. Теория упругости дает возможность получить аналитическое решение волновых задач. Затем, используя вычислительную технику, можно провести его всесторонний анализ с различными входными данными и представить результаты в графическом виде.

Как правило, при решении волновых задач такого рода ограничиваются случаем толстых пластин без учета влияния второй поверхности. На практике сигналы, зарегистрированные датчиками акустической эмиссии (АЭ) в тонкой пластине, существенно отличаются от полученных при прочих равных условиях для толстой пластины, а влияние второй поверхности на движение волны тем сильнее, чем меньше толщина пластины. Естественно, при расчете тонких пластин такое влияние необходимо учитывать, поскольку наличие еще одной поверхности приводит к появлению новых составляющих волны, ее многократному переотражению и значительно усложняет общую картину ее распространения. К сожалению, расчет поля перемещений в этом случае более сложен, и формулы получаются более громоздкими и менее удобными для использования.

Рассмотрим пластину толщиной δ , в которой на глубине z_0 возник сигнал АЭ (рис. 1). Предположим, что дефект возник в виде микровзрыва V_0^* с симметричным во всех направлениях движением АЭ волны. Величину и характер распределения источника АЭ представим в виде произведения δ_+ -функций. Тогда уравнения, описывающие распространение упругих волн в пластине, можно записать в виде

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

где $\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial}{\partial r}) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$; C_1, C_2 — скорость распространения соответственно продольной и поперечной волны; v — коэффициент Пуассона.

Следует обратить внимание на то, что в первом уравнении системы (1) в правой части присутствует составляющая связи между частотой волны ω_0 , скоростью ее распространения C и волновым числом α , как это было в случае полупространства. Однако

в случае тонких пластин в связи с множеством скоростей распространения волн значение величины C не постоянно, а изменяется непрерывно в пределах от C_3 (скорость распространения волн Рэлея) до C_1 .

Решим систему (1), предполагая, 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 $\delta_+(t)$, что указывает на то, что при $t = +0$ возник и исчез источник излучения.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial z^2} - \left(\alpha^2 - \frac{\omega_0^2}{C_1^2} \right) \bar{\varphi} &= -\frac{1+v}{1-v} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{V_0^*}{2\pi} \delta_+(z-z_0) \delta_+(\omega_0 - \alpha C); \\ \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial z^2} - \left(\alpha^2 - \frac{\omega_0^2}{C_2^2} \right) \bar{\psi} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Граничные условия примут вид

$$\begin{aligned} \frac{1}{G} \bar{\tau}_{rz} &= 2 \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial z} + \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial z^2} + \alpha^2 \bar{\psi} = 0; \\ \frac{1}{G} \bar{\sigma}_z &= \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) \bar{\varphi} - \alpha \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial z} = 0 \text{ при } z = 0; \delta. \end{aligned} \quad (3)$$

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

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

где

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{1+v}{1-v} \frac{V_0^*}{2\pi\sqrt{2\pi}} \delta_+(\omega_0 - \alpha C), \\ \beta_1 &= \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2/C_1^2}; \quad \beta_2 = \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2/C_2^2}. \end{aligned}$$

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

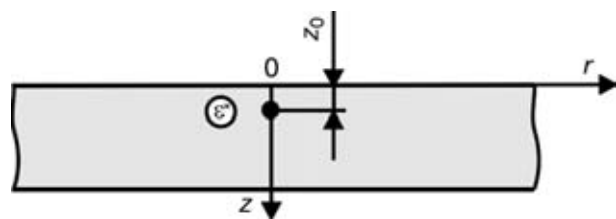


Рис. 1. Образование сигнала АЭ в пластине (обозначения см. в тексте).

$$\begin{aligned}
 & 2C\beta_1 + (A + B)(\alpha^2 + \beta_2^2) - 2P_1 \exp(-z_0\beta_1) = 0; \\
 & 2C\beta_1 \exp(\delta\beta_1) + [A \exp(-\delta\beta_2) + B \exp(\delta\beta_2)](\alpha^2 + \beta_2^2) - \\
 & \quad - 2P_1 \exp[-(\delta - z_0)\beta_1] = 0; \\
 & \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) C + (A - B)\alpha^2 \beta_2^2 = -\frac{P_1}{\beta_1} \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) \exp(-z_0\beta_1); \quad (5) \\
 & \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) C \exp(\delta\beta_1) + \alpha^2 \beta_2 [A \exp(-\delta\beta_2) - B \exp(\delta\beta_2)] + \\
 & \quad + \frac{P_1}{\beta_1} \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) \exp[-(\delta - z_0)\beta_1] = 0.
 \end{aligned}$$

Решив систему (5) для трех первых уравнений относительно A, B, C , получим

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{4P_1}{\Delta} \left[-2\alpha^2\beta_1\beta_2 \operatorname{ch}[(\delta - z_0)\beta_1] + \operatorname{sh}[(\delta - z_0)\beta_1](\alpha^2 + \right. \\
 & \left. + \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) + \exp(-z_0\beta_1) \exp(\delta\beta_2)(\alpha^2 + \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) \right]; \\
 B &= \frac{4P_1}{\Delta} \left[2\alpha^2\beta_1\beta_2 \operatorname{sh}[(\delta - z_0)\beta_1] + \operatorname{ch}[(\delta - z_0)\beta_1](\alpha^2 + \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) - \right. \\
 & \quad \left. - \exp(-z_0\beta_1) \exp(\delta\beta_2)(\alpha^2 + \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) \right]; \\
 C &= \frac{P_1}{\Delta\beta_1} (\alpha^2 + \beta_2^2) \left\{ 4\alpha^2\beta_1\beta_2 \exp[-(\delta - z_0)\beta_1] - \right. \\
 & \quad - \exp(-z_0\beta_1) \exp(\delta\beta_2) \left[2\alpha^2\beta_1\beta_2 + (\alpha^2 + \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) \right] - \\
 & \quad \left. - \exp(-z_0\beta_1) \exp(-\delta\beta_2) \left[2\alpha^2\beta_1\beta_2 - (\alpha^2 + \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) \right] \right\},
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 \Delta &= 2(\alpha^2 + \beta_2^2) \left\{ 2\alpha^2\beta_1\beta_2 [\exp(\delta\beta_1) - \operatorname{ch}(\delta\beta_2)] + \right. \\
 & \quad \left. + \operatorname{sh}(\delta\beta_2)(\alpha^2 + \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) \right\}.
 \end{aligned}$$

Подставляя полученные значения A, B, C в систему (4), для Φ и Ψ получим:

$$\begin{aligned}
 \bar{\Phi} &= \frac{P_1}{\Delta\beta_1} (\alpha^2 + \beta_2^2) \left\{ 4\alpha^2\beta_1\beta_2 \exp[-(\delta - z_0)\beta_1] - \exp(\delta\beta_2) \exp(-z_0\beta_1) \times \right. \\
 & \quad \times \left[2\alpha^2\beta_1\beta_2 + (\alpha^2 + \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) \right] - \exp(-\delta\beta_2) \exp(-z_0\beta_1) \times \\
 & \quad \times \left[2\alpha^2\beta_1\beta_2 - (\alpha^2 + \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) \right] \left. \right\} \exp(z\beta_1) + \frac{P_1}{\beta_1} \exp(-|z - z_0|\beta_1); \\
 \bar{\Psi} &= \frac{4P_1}{\Delta} \left\{ \left[-2\alpha^2\beta_1\beta_2 \operatorname{ch}[(\delta - z_0)\beta_1] + \operatorname{sh}[(\delta - z_0)\beta_1](\alpha^2 + \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) + \exp(-z_0\beta_1) \exp(\delta\beta_2)(\alpha^2 + \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) \right] \exp(-z\beta_2) + \left[\operatorname{ch}[(\delta - z_0)\beta_1](\alpha^2 + \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) + \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + 2\alpha^2\beta_1\beta_2 \operatorname{sh}[(\delta - z_0)\beta_1] - \exp(-z_0\beta_1) \exp(-\delta\beta_2)(\alpha^2 + \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2 \right) \right] \right\}.
 \end{aligned}$$

Подставляя значения Φ и Ψ во второе из условий (3) при $z = \delta$, получим уравнение, обеспечивающее четвертое граничное условие и определяющее отношение между волновыми числами α , скоростями движения элементарных волн C и их частотными характеристиками ω_0 . Это так называемое **спектральное уравнение** пластины.

Итак, после подстановки Φ и Ψ в граничные условия (3) и выполнения обратных преобразований по α и ω получим следующее спектральное уравнение:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{P_0\alpha^7}{4\gamma_1\Delta_1} \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2} \right)^2 e^{\delta\alpha\gamma_1} \left\{ e^{\delta\alpha\gamma_2} e^{-z_0\alpha\gamma_1} \left[4\gamma_1\gamma_2 - \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2} \right)^2 \right] + \right. \\
 & \quad \left. + 8\gamma_1\gamma_2 e^{-|\delta-z_0|\alpha\gamma_1} - e^{-\delta\alpha\gamma_2} e^{-z_0\alpha\gamma_1} \left[4\gamma_1\gamma_2 + \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2} \right)^2 \right] \right\} - \\
 & -\frac{P_0\alpha}{2\gamma_1} e^{-|\delta-z_0|\alpha\gamma_1} \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2} \right)^2 - \frac{P_1\alpha^7\gamma_2}{\Delta_1} e^{-\delta\alpha\gamma_1} \left\{ 2e^{\delta\alpha\gamma_2} e^{-z_0\alpha\gamma_1} \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2} \right)^2 + \right. \\
 & \quad \left. + e^{-|\delta-z_0|\alpha\gamma_1} \left[4\gamma_1\gamma_2 - \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2} \right)^2 \right] + e^{\delta\alpha\gamma_2} e^{-z_0\alpha\gamma_1} \left[4\gamma_1\gamma_2 + \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2} \right)^2 \right] \right\} - \frac{P_0\alpha^7\gamma_2 e^{\delta\alpha\gamma_2}}{\Delta_1} \left\{ 2e^{-\delta\alpha\gamma_2} e^{-z_0\alpha\gamma_1} \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2} \right)^2 - \right. \\
 & \quad \left. - e^{-|\delta-z_0|\alpha\gamma_1} \left[4\gamma_1\gamma_2 + \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2} \right)^2 \right] + e^{\delta\alpha\gamma_2} e^{-z_0\alpha\gamma_1} \left[4\gamma_1\gamma_2 - \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2} \right)^2 \right] \right\} = 0,
 \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned}
 \Delta_1 &= \alpha^6 \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2} \right) \left[4\gamma_1\gamma_2 e^{\delta\alpha\gamma_1} - 4\gamma_1\gamma_2 \operatorname{ch}(\delta\alpha\gamma_2) - \operatorname{sh}(\delta\alpha\gamma_2) \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2} \right)^2 \right]; \\
 \gamma_1 &= \sqrt{1 - \frac{C^2}{C_1^2}}; \quad \gamma_2 = \sqrt{1 - \frac{C^2}{C_2^2}}; \quad P_0 = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \frac{V_0^*}{2\pi^2}.
 \end{aligned}$$

В терминах Φ и Ψ перемещение w выражается следующим образом:

$$\bar{w}(z) = \delta\bar{\Phi}/\partial z + \alpha^2\bar{\Psi}. \quad (7)$$

Используя выражения (4), формулу (7) можно записать в таком виде:

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

$$\bar{w}(z) = \beta_1 C \exp(z\beta_1) - P_1 \exp[-(z_0 - z)\beta_1] + \alpha^2 [A \exp(-z\beta_2) + B \exp(z\beta_2)] \quad \text{при } z > z_0, \quad (9)$$

где, как и ранее, $P_1 = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \frac{V_0^*}{2\pi\sqrt{2\pi}} \delta_+(\omega_0 - \alpha C)$.

Величины перемещений w на поверхности пластины ($z = 0$) определим после подстановки значений Φ и Ψ в выражение (8).

Следует отметить, что уравнение (6) в промежулке скоростей волн от 0 до C_2 при $\delta \rightarrow \infty$ допускает существование лишь одной волны, распространяющейся со скоростью C_3 , — волны Рэлея. Это уравнение определяет также и то, что все элементарные волны с волновыми числами α , составляю-

щие волну Рэлея, при $\delta \rightarrow \infty$ двигаются с одной скоростью, равной C_3 . Это позволяет, как и в случае полупространства, принять зависимость между ω_0 и α в виде дельта-функции $\delta_+(\omega_0 - C_3)$. Тогда с учетом сказанного после выполнения обратного преобразования Ханкеля по α и Фурье по ω_0 , с учетом начального условия для ω получим

$$\begin{aligned} w = & \int_0^\infty \alpha J_0(\alpha r) [1 - \cos(\alpha C_3 t)] \times \\ & \times \left\{ \frac{P_0 \alpha^6}{\Delta_1} \left(2 - \frac{C_3^2}{C_2^2}\right) \left\{ -\exp(-z_0 \alpha \gamma_1) \exp(\delta \alpha \gamma_2) [4\gamma_1 \gamma_2 - \left(2 - \frac{C_3^2}{C_2^2}\right)^2] + \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + 8\gamma_1 \gamma_2 \exp[-\alpha(\delta - z_0)\gamma_1] - \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - \exp(-z_0 \alpha \gamma_1) \exp(-\delta \alpha \gamma_2) [4\gamma_1 \gamma_2 + \left(2 - \frac{C_3^2}{C_2^2}\right)^2] \right\} + \right. \\ & \quad \left. + P_0 \exp(-z_0 \alpha \gamma_1) - \frac{2P_0 \alpha^6}{\Delta_1} \left[\exp[-\alpha(\delta - z_0)\gamma_1] \left(2 - \frac{C_3^2}{C_2^2}\right) + \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + 4\gamma_1 \gamma_2 \exp[-(\delta - z_0)\gamma_1] + \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + 2\exp(-z_0 \alpha \gamma_1) \left(2 - \frac{C_3^2}{C_2^2}\right) \operatorname{ch}(\delta \alpha \gamma_2) \right] \right\} d\alpha. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь $\gamma_1 = \sqrt{1 - \frac{C_3^2}{C_1^2}}$; $\gamma_2 = \sqrt{1 - \frac{C_3^2}{C_2^2}}$.

Анализируя уравнение (6), нетрудно видеть, что оно имеет строгое решение в трех случаях: соответственно при $\delta = \infty$; $\alpha = \infty$; $\alpha\delta = \infty$.

Первый 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 (10) предельным переходом $\delta \rightarrow \infty$. Во втором случае волны в пластине отсутствуют, так как интегрирование по α в формуле (10) осуществляется в пределах от ∞ до ∞ .

Особый интерес представляет третий случай, когда $\alpha\delta = \infty$. Следует отметить неопределенность понятия бесконечности в технических расчетах. Как правило, все процессы, рассматриваемые в технике, конечны, и лишь с определенными допущениями можно применить в них понятие бесконечности. Анализируя выражение (10), можно заметить, что все коэффициенты при сгруппированных членах есть функции, в которых достижение нуля или бесконечности осуществляется стремлением аргумента к бесконечности. Так, при стремлении толщины пластины к бесконечности мы имеем дело с полупространством. Но что такое полупространство для технической задачи? На этот вопрос ответить трудно.

Учитывая изложенное, предположим, что величина $\alpha\delta\gamma_1$ (третий случай, когда $\alpha\delta = \infty$), являющаяся аргументом в экспоненциальной функции в уравнении (6), стремится к очень большому значению, например, к 50. В этом случае $\exp(-50) = 1,928 \cdot 10^{-22}$, что практически является нулем для технической задачи. Предположим, что такой «технический» нуль обеспечивает образование в пластинах (тонких и толстых) упругих волн, двигающихся со скоростями в диапазоне $0 \dots C_2$.

Решая уравнение (6) при указанном предположении, можно показать, что в данном диапазоне скоростей в пластинах образуется и распространяется только одна волна со скоростью C_3 . На рис. 2 приведены графики функции $F(\alpha, C_\alpha)$ (левая часть уравнения (6)) для различных C_α . Из рисунка видно, что функция $F(\alpha, C_\alpha)$ стремится к 0 с увеличением числа α только для волны Рэлея, в то время как остальные функции $F(\alpha, C_\alpha)$ для волн, распространяющихся с другими скоростями, существенно отклоняются от оси α .

Итак, поскольку уравнение (6) имеет решение только для больших значений $\alpha\delta\gamma_1$, то формулу (10) можно существенно упростить и переписать следующим образом:

$$w = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \frac{V_0^*}{2\pi^2} \left(1 - \frac{1 + \gamma_2^2}{2\gamma_1\gamma_2}\right) \int_{\alpha_n}^\infty \alpha J_0(\alpha r) \cos(\alpha C_3 t) \exp(-\alpha z_0 \gamma_1) d\alpha. \quad (11)$$

Величина нижнего предела интегрирования в выражении (11) α_n есть значение волнового числа, при котором при заданной толщине пластины обеспечивается условный нуль в спектральном уравнении (11). На рис. 2 (кривая 1) это точка со значением $\alpha_n = 10,27 \text{ см}^{-1}$. При $\delta = \infty$ значение $\alpha_n = 0$ и выражение для w принимает тот же вид, что и для полупространства.

Интегрирование в выражении (9) затруднительно из-за бесконечного верхнего предела и цикличности подынтегральной функции. Для облегчения процедуры произведем замену функции Бесселя $J_0(\alpha r)$ ее интегральным представлением:

$$J_0(\alpha r) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \cos(\alpha r \sin \theta) d\theta.$$

Тогда после выполнения интегрирования по α в пределах от α_n до бесконечности окончательно для w получим

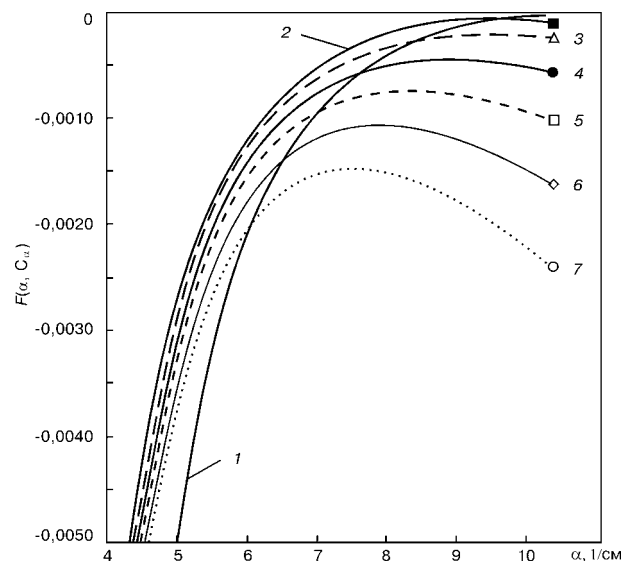


Рис. 2. Корни спектрального уравнения (6) в зависимости от скорости распространения упругой волны C_α (1 - 2986; 2 - 2996; 3 - 3006; 4 - 3016; 5 - 3026; 6 - 3036; 7 - 3046 м/с) и волнового числа α ($\delta = 1 \text{ см}$, $z_0 = 0,1 \text{ см}$).

$C(\alpha) \times 10^{-3}$, см/с

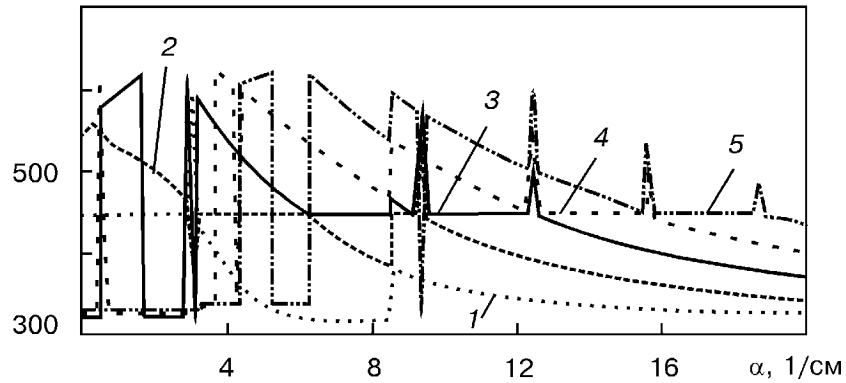


Рис. 3. Зависимость между величинами C и α , определенная спектральным уравнением (15) для корней 1–5-го порядков (соответственно кривые 1–5).

$$\omega = \frac{1 + v}{1 - v} \frac{V_0^*}{2\pi^3} \left(1 - \frac{1 + \gamma_1^2}{2\gamma_1 \gamma_2^2}\right) \times \int_0^{\pi/2} \left\{ \frac{2e^{-\alpha_n a}}{a^2 + b_1^2} \left[(\alpha_n a + \frac{a^2 - b_1^2}{a^2 + b_1^2}) \cos(\alpha_n b) - (\alpha_n b + \frac{2ab}{a^2 + b_1^2}) \sin(\alpha_n b) \right] - \frac{e^{-\alpha_n a}}{a^2 + b_1^2} \left[(\alpha_n a + \frac{a^2 - b_1^2}{a^2 + b_1^2}) \cos(\alpha_n b_1) - (\alpha_n b_1 + \frac{2ab_1}{a^2 + b_1^2}) \sin(\alpha_n b_1) \right] - \frac{e^{-\alpha_n a}}{a^2 + b_2^2} \left[(\alpha_n a + \frac{a^2 - b_2^2}{a^2 + b_2^2}) \cos(\alpha_n b_2) - (\alpha_n b_2 + \frac{2ab_2}{a^2 + b_2^2}) \sin(\alpha_n b_2) \right] \right\} d\theta.$$

Здесь $\gamma_1 = \sqrt{1 - C_3^2/C_1^2}$; $\gamma_2 = \sqrt{1 - C_3^2/C_2^2}$; $b = r \sin \theta$; $b_1 = r \sin \theta - C_3 t$; $b_2 = r \sin \theta + C_3$; $a = z_0 \gamma_1$.

Как видим, теперь выражение для ω интегрируется в конечных пределах, и интегрирование может быть легко реализовано на компьютере.

В случае, если скорости распространения элементарных волн превышают C_2 , то решение второго дифференциального уравнения (для ψ) системы (2) будет отличаться от представленного в системе (4). Это объясняется тем, что подкоренное выражение для величины b_2 становится отрицательным, а сама величина b_2 — комплексной. Решение для этого случая запишется в виде

$$\bar{\varphi} = C \exp(z\beta_1) + \frac{1 + v}{1 - v} \frac{V_0^* \exp(-|z - z_0 \beta_1|)}{2\pi \beta_1} \delta_1(\omega_0 - \alpha C);$$

$$\bar{\psi} = A \sin(z\beta_2) + B \cos \exp(z\beta_2).$$

Подставляя эти выражения для φ и ψ в уравнения граничных условий (3), получаем

$$2C\beta_1 + (\alpha^2 - \beta_2^2)B - 2P_1 \exp(-z_0 \beta_2) = 0;$$

$$2C\beta_1 \exp(\delta\beta_1) + (\alpha^2 - \beta_2^2)[A \sin(\delta\beta_2) + B \cos(\delta\beta_2)] - 2P_1 \exp[-(\delta - z_0)\beta_1] = 0;$$

$$\left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2\right)C - A\alpha^2\beta_2 + \frac{P_1}{\beta_1} \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2\right) \exp(-z_0 \beta_1) = 0;$$

$$\left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2\right)C \exp(\delta\beta_1) - A\alpha^2\beta_2 \cos(\delta\beta_2) + B\alpha^2\beta_2 \times \sin(\delta\beta_2) + \frac{P_1}{\beta_1} \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2\right) \exp[-(\delta - z_0)\beta_1] = 0.$$

Решив систему первых трех уравнений (14), найдем выражения для коэффициентов A , B и C :

$$A = \frac{2P_1}{\Delta} (\alpha^2 - \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2\right) \left\{ 2\cos(\delta\beta_2) \exp(-z_0 \beta_1) - \exp[-(\delta - z_0)\beta_1] - \exp(\delta\beta_1) \exp(-z_0 \beta_1) \right\};$$

$$B = \frac{4P_1}{\Delta} \left\{ \alpha^2 \beta_1 \beta_2 [\exp[-(\delta - z_0)\beta_1] - \exp(\delta\beta_1) \exp(-z_0 \beta_1)] - \sin(\delta\beta_2) \exp(-z_0 \beta_1) (\alpha^2 - \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2\right) \right\};$$

$$C = \frac{P_1}{\beta_1 \Delta} (\alpha^2 - \beta_2^2) \left\{ -2\alpha^2 \beta_1 \beta_2 \exp[-(\delta - z_0)\beta_1] + \cos(\delta\beta_2) \exp(-z_0 \beta_1) [2\alpha^2 \beta_1 \beta_2 - (\alpha^2 - \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2\right)] + \exp(-z_0 \beta_1) \sin(\delta\beta_2) [(\alpha^2 - \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2\right)] \right\}.$$

После подстановки значений коэффициентов A , B , C в выражения (13) получим

$$\bar{\varphi} = \frac{P_1}{\beta_1 \Delta} (\alpha^2 - \beta_2^2) \left\{ -2\alpha^2 \beta_1 \beta_2 \exp[-(\delta - z_0)\beta_1] + \exp(-z_0 \beta_1) \cos(\delta\beta_2) [2\alpha^2 \beta_1 \beta_2 - (\alpha^2 - \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2\right)] + \sin(\delta\beta_2) \exp(-z_0 \beta_1) \left[(\alpha^2 - \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2\right) \right] \right\} \exp(z\beta_1) + \frac{P_1}{\beta_1} \exp[-(z - z_0)\beta_1];$$

$$\bar{\psi} = \frac{2P_1}{\Delta} (\alpha^2 - \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2\right) \left\{ 2\cos(\delta\beta_2) \exp(-z_0 \beta_1) - \exp[-(\delta - z_0)\beta_1] - \exp(-z_0 \beta_1) \exp(\delta\beta_1) \right\} \sin(z\beta_2) + \frac{4P_1}{\Delta} \left\{ \exp[-(\delta - z_0)\beta_1] \alpha^2 \beta_1 \beta_2 - \alpha^2 \beta_1 \beta_2 \exp(\delta\beta_1) \exp(-z_0 \beta_1) - \exp(-z_0 \beta_1) \sin(\delta\beta_2) (\alpha^2 - \beta_2^2) \left(\frac{\omega_0^2}{2C_2^2} - \alpha^2\right) \right\} \cos(z\beta_2).$$

Подставляя выражения для φ и ψ в четвертое уравнение (10), получаем спектральное уравнение

пластины для случая, когда $C > C_2$. После выполнения обратного преобразования Ханкеля по α , Фурье по ω_0 и некоторых преобразований будем иметь

$$\begin{aligned} & \frac{P_0 \alpha^7}{\gamma_1 \Delta} \left\{ \exp[-\alpha(\delta - z_0)\gamma_1] \left[8\gamma_1 \gamma_2 \exp(\alpha\delta\gamma_1) \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2}\right)^2 - \right. \right. \\ & \left. \left. - \cos(\alpha\delta\gamma_2) \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2}\right) + \sin(\alpha\delta\gamma_2) \left(16\gamma_1^2 \gamma_2^2 - \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2}\right)^4\right) \right] + \right. \\ & \left. + 8\gamma_1 \gamma_2 \exp(-\alpha z_0 \gamma_1) \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2}\right)^2 - \right. \\ & \left. - \exp[-\alpha(\delta - z_0)\gamma_1] \left[\cos(\alpha\delta\gamma_2) \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2}\right) (8\gamma_1 \gamma_2 + \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2}\right)^2) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \sin(\alpha\delta\gamma_2) \left(16\gamma_1^2 \gamma_2^2 - \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2}\right)^4\right) \right] \right\} = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$\Delta_2 = \frac{\alpha^6}{2} \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2}\right) \left\{ 4\gamma_1 \gamma_2 [\cos(\alpha\delta\gamma_2) - \exp(\alpha\delta\gamma_1) + \sin(\alpha\delta\gamma_2) \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2}\right)^2] \right\};$$

$$\gamma_1 = \sqrt{1 - \frac{C^2}{C_1^2}}; \quad \gamma_2 = \sqrt{\frac{C^2}{C_2^2} - 1}; \quad P_0 = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \frac{V_0^*}{2\pi}.$$

Зная спектральное уравнение пластины (15), т. е. связь между волновым числом α и скоростью распространения элементарных волн C , можем определить перемещения w , возникающие в пластине при движении волн со скоростями, превышающими C_2 . Так, перемещения на поверхности пластины ($z = 0$) с принятыми начальными условиями после выполнения обратного преобразования Ханкеля по α и Фурье по ω_0 будут иметь вид

$$\begin{aligned} w = \int_0^\infty \alpha J_0(\alpha r) \cos(\alpha C t) & \left\{ \frac{P_0 \alpha^6}{2\Delta_2} \left[\gamma_2^2 \sin(\alpha\delta\gamma_2) \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2}\right)^2 \exp(-\alpha z_0 \gamma_1) + \right. \right. \\ & + 4\gamma_1 \gamma_2 \frac{C^2}{C_2^2} \exp[-\alpha(\delta - z_0)\gamma_1] - 2\gamma_1 \gamma_2 \exp(\alpha\delta\gamma_1) \exp(-\alpha z_0 \gamma_1) + \\ & \left. \left. + \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2}\right) \exp(-\alpha z_0 \gamma_1) \cos(\alpha\delta\gamma_2) (4\gamma_1 \gamma_2 + \left(2 - \frac{C^2}{C_2^2}\right)^2) \right] + \right. \\ & \left. + P_0 \exp(-\alpha z_0 \gamma_1) \right\} d\alpha. \end{aligned} \quad (16)$$

Перемещения поверхности пластины при распространении волн будут состоять из суммы перемещений, определяемых по формулам (12) (волна Рэлея) и (16) (волны Лэмба).

Следует отметить, что вычисления перемещений по формуле (16) затруднительно из-за необходимости определения корней спектральных уравнений для получения зависимости $f(\alpha, C)$. Это решение требует мощных вычислительных средств и много машинного времени для реализации счета, так как расчеты выполняются в пределах от 0 до бесконечности при изменяющихся α и C . Это же относится и к выражениям для w .

В то же время, анализируя представленные на рис. 3 графики зависимости корней $C(\alpha)$ для эле-

ментарных составляющих волн Лэмба (уравнение (15)), можно заметить, что функция $C(\alpha)$ имеет непрерывное значение по волновым числам и дискретна для различных порядков корней для C , то есть имеет место дискретность в значениях α и C по номерам порядков корней спектрального уравнения (14)¹. Таким образом, в случае распространения волн в тонких пластинах мы имеем дело с кусочно-непрерывными пространствами зависимостей между α и C .

Для реализации расчета перемещений w выполним интегрирование в выражении (16) с учетом дискретности значений C для непрерывных значений волнового числа α . При этом будем предполагать, что значения подынтегральной функции будет определяться в виде суммы ее значений для каждого C_i , найденного из выражения (15). Тогда

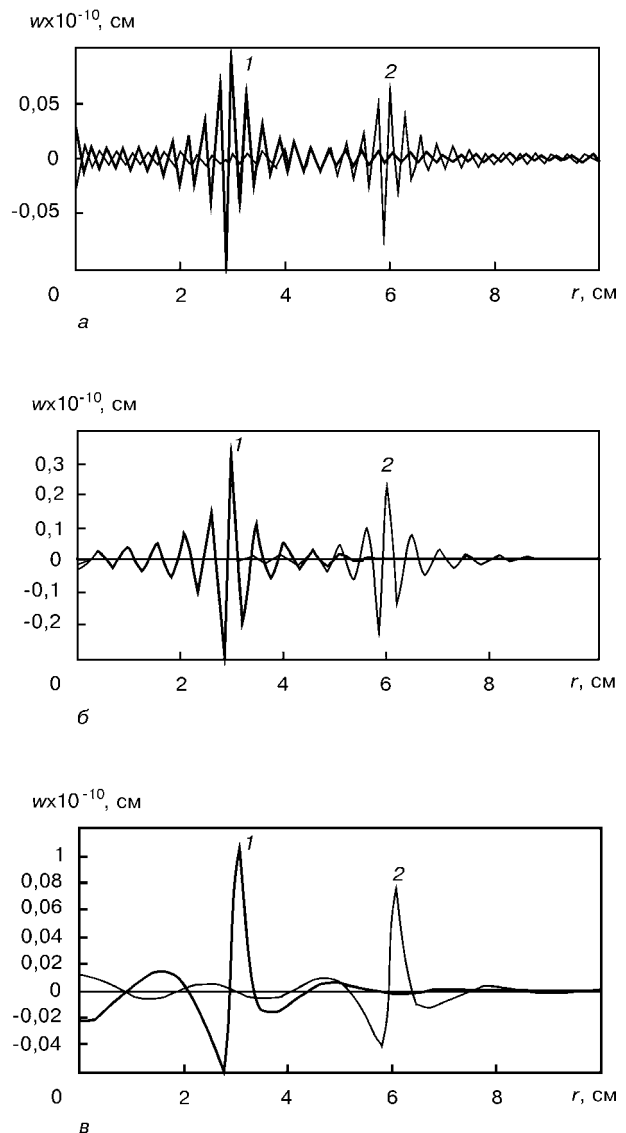


Рис. 4. Распространение волн Рэлея в пластинах толщиной 1 (а); 5 (б); 20 см (в) при $C_3 t = 3$ (1) и 6 см (2), $z_0 = 0,2$ см.

¹ Отметим, что на рис. 3, чтобы не загромождать изображение, приведены графики лишь для 5 значений порядков корней.

$$\begin{aligned}
 w = & \int_0^{\infty} \alpha J_0(\alpha r) \cos(\alpha C_i t) \left\{ \frac{P_0 \alpha^6}{2\Delta_2} \left[\gamma_2^2 \sin(\alpha \delta \gamma_2) \left(2 - \frac{C_i^2}{C_2^2} \right)^2 \exp(-\alpha z_0 \gamma_1) + \right. \right. \\
 & + 4\gamma_1 \gamma_2 \frac{C_2^2}{C_2^2} \exp[-\alpha(\delta - z_0)\gamma_1] - 2\gamma_1 \gamma_2 \exp(\alpha \delta \gamma_1) \exp(-\alpha z_0 \gamma_1) + \\
 & + \left. \left. \left(2 - \frac{C_i^2}{C_2^2} \right) \exp(-\alpha z_0 \gamma_1) \cos(\alpha \delta \gamma_2) (4\gamma_1 \gamma_2 + \left(2 - \frac{C_i^2}{C_2^2} \right)^2) \right] + \right. \\
 & \left. + P_0 \exp(-\alpha z_0 \gamma_1) \right\} d\alpha,
 \end{aligned} \tag{17}$$

где

$$\Delta_2 = \frac{\alpha^6}{2} \left(2 - \frac{C_i^2}{C_2^2} \right) \left\{ 4\gamma_1 \gamma_2 [\cos(\alpha \delta \gamma_2) - \exp(\alpha \delta \gamma_1)] + \left(2 - \frac{C_i^2}{C_2^2} \right)^2 \sin(\alpha \delta \gamma_2) \right\};$$

$$\gamma_1 = \sqrt{1 - \frac{C_i^2}{C_1^2}}; \quad \gamma_2 = \sqrt{\frac{C_i^2}{C_2^2} - 1}; \quad P_0 = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \frac{V_0^*}{2\pi^2}.$$

Здесь значения γ_1 и γ_2 становятся также i -ми. В приведенной формуле эти значки не проставлены во избежание излишнего загромождения выражения. Интегрирование выражения (17) возможно только численным методом и выполняется следующим образом:

1. Из спектрального уравнения (15) находим значения скоростей C_i для каждого заданного значения волнового числа α_i .

2. Для выбранного r_j строим по оси α_i для всех k порядков корней C_i суммарное по k значение подынтегральной функции.

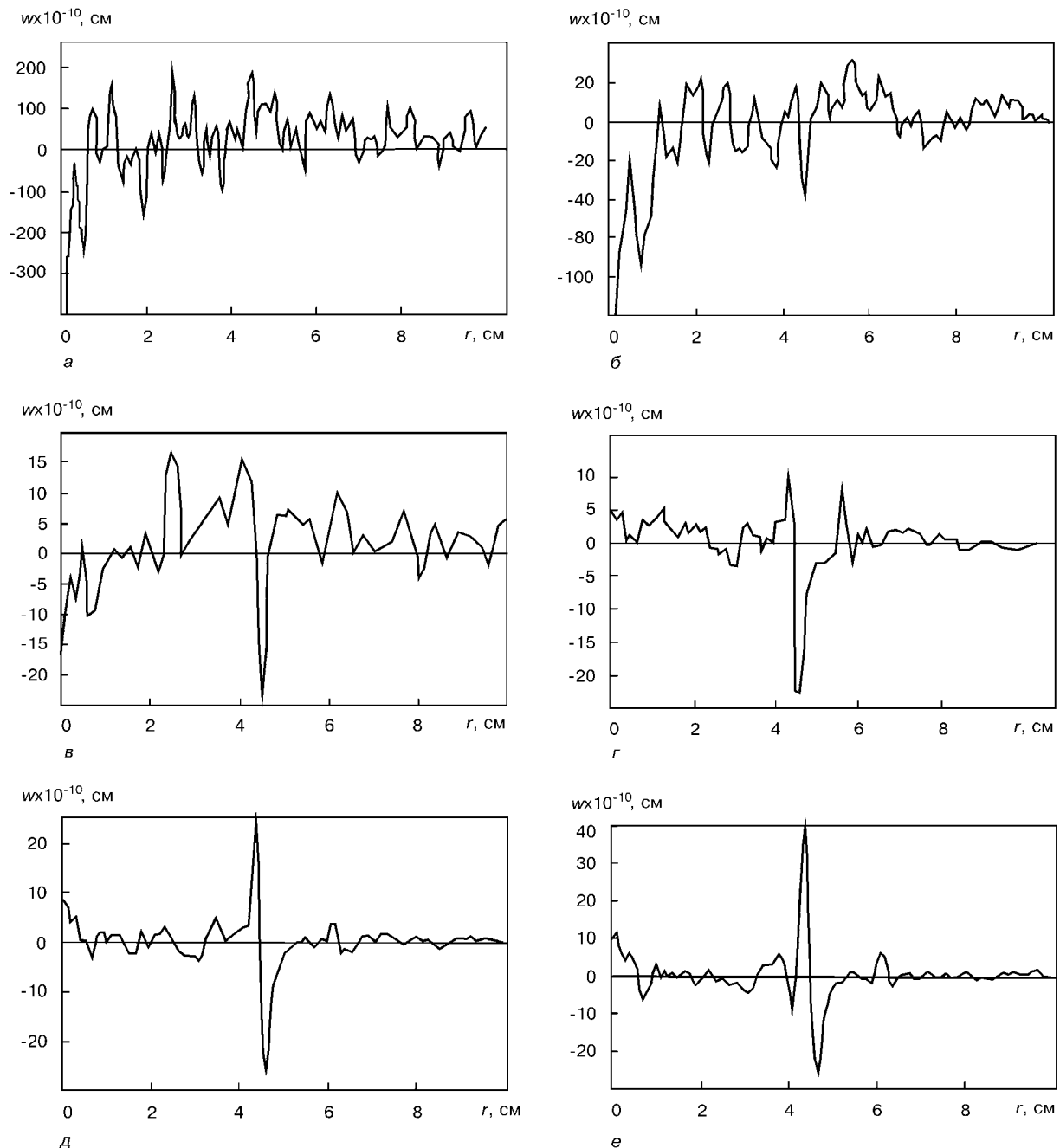


Рис. 5. Упругая волна АЭ, распространяющаяся в пластине толщиной 0,3 (а); 0,6 (б); 1 (в); 5 (г); 10 (д) и 20 см (е) от источника АЭ, возникшего на глубине $z_0 = 0,2$ см в момент времени $t = 10^{-3}$ с.

3. Интегрируем выражение (17) для полученных значений подынтегральной функции и переходим к следующему значению r_{j+1} .

4. Повторяем действия пп. 1–3 для всех значений r_j .

Теперь, используя принятую методику, рассчитаем сначала для волн Рэлея, а затем Лэмба перемещения в пластинах из сплава АМгб при возникновении в них внутреннего локального источника излучения. Импульс возмущения локального объема материала на глубине z_0 от поверхности пластины найдем из следующей зависимости:

$$V_0^* = \frac{4}{3} \pi R^3 t_0 = \frac{4}{3} \pi \cdot 0,05^3 \cdot 10^{-6} = 5,24 \cdot 10^{-10}, \text{ см}^3 \cdot \text{с}.$$

Здесь мы предположили, что локальное возмущение протекает в рамках одного зерна размером 1 мм за 1 мкс.

Распространяющиеся в этих пластинах волны Рэлея, рассчитанные по формуле (12) для пластин толщиной 1; 5; 20 см, представлены на рис. 4. Анализируя графики, можно заметить, что движущаяся волна имеет четко выраженную конфигурацию, и с увеличением толщины пластины эта конфигурация приближается к конфигурации волны Рэлея в полупространстве. С увеличением толщины пластины незначительно растут амплитуды волны.

Последнее объясняется тем, что при $\alpha_n \rightarrow 0$ с увеличением толщины пластины в формировании суммарной волны принимают участие все большее число элементарных волн.

Для этих же пластин и условий рассчитаем возмущение их поверхности, вызванное распространяющимися в них упругими волнами Лэмба. Расчеты проведем для пластин толщиной 0,3; 0,6; 1; 5; 10 и 20 см. На рис. 5 приведены эпюры этих волн. Анализируя их, необходимо отметить существенное различие в амплитудах и характере распространения волн Лэмба по сравнению с волнами Рэлея. Распространяющаяся волна в тонких пластинах имеет большое количество незначительно отличающихся друг от друга максимумов и минимумов. И только с увеличением толщины пластины общая картина начинает меняться, наблюдается формирование ограниченного числа пиков амплитуд перемещений.

В пластинах толщиной 1 см и более резкий пик появляется на расстоянии 4,5 см от центра излучения. Этот пик соответствует волне, двигающейся со скоростью 4451 м/с. Перемещения ближайшей к этой волне части поверхности пластины продолжают носить хаотический характер. С дальнейшим увеличением толщины пластины в процесс формирования суммарной волны вовлекаются все новые элементарные волны, и характер волновой поверхности меняется. При этом сохраняется пик волны, распространяющейся со скоростью 4451 м/с, и более четкие очертания приобретают два пика с меньшей амплитудой, расположенные позади и впереди этой волны. Скорость их распространения составляет 3300 и 6300 м/с. Эти скорости приближенно соответствуют скоростям распространения поперечной C_2 и продольной C_1 волны.

Следует отметить, что наличие второй поверхности в пластине играет существенную роль в формировании волн. Поэтому с увеличением толщины

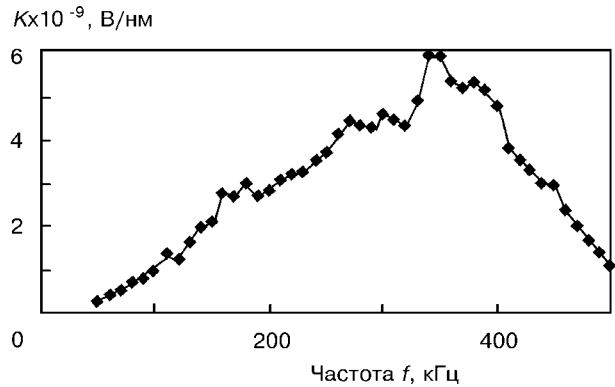


Рис. 6. Коэффициент электроакустического преобразования K для датчика АЭ типа ДАЭ-002Р.

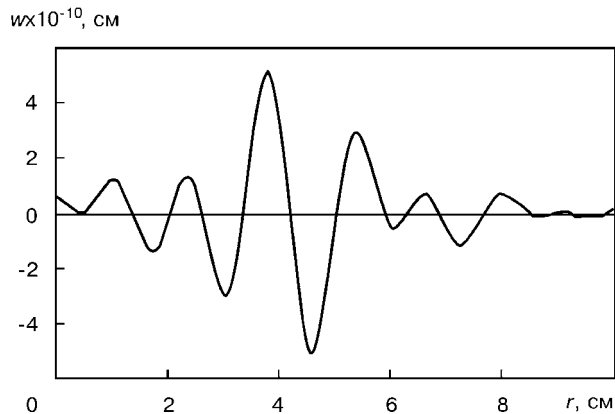


Рис. 7. Распространение упругой волны по поверхности пластины из сплава АМгб толщиной 1 см в диапазоне волновых чисел от 0 до 5 см^{-1} ($z_0 = 0,2 \text{ см}$, $t = 10^{-5} \text{ с}$).

пластины, как видно из графиков, представленных на рис. 5, волновое поле пластины не стремится к образованию одной волны, как в случае полупространства (волна Рэлея). В пластинах больших толщин одновременно существуют несколько типов волн, распространяющихся с различными скоростями. Перемещения поверхности для пластин очень большой толщины определяются по формуле, полученной из выражения (17) путем предельного перехода, когда $\delta \rightarrow \infty$:

$$\omega = \frac{1-v}{1+v} \frac{V_0^*}{2\pi^2} \int_0^k \sum_{i=1}^k \alpha J_0(\alpha r) \cos(\alpha C_i t) (1 + \frac{1}{2 - C_i^2/C_2^2}) \exp(-\alpha z_0 \gamma_i) d\alpha.$$

Следует более подробно остановиться на характере распространения упругих волн в тонких пластинах. Характерным волновым полем для этих пластин является поле, представленное на рис. 5, а, б. В то же время распространяющаяся по пластине волна с увеличением расстояния от источника излучения теряет в спектре. Более короткие элементарные составляющие волны затухают с увеличением расстояния более интенсивно, чем длинные. Прошедшая большое расстояние волна Лэмба имеет более узкий спектр по сравнению с исходной. Динамическая задача теории упругости с учетом сопротивления среды много сложнее, и ее решение выходит за рамки настоящей статьи.

Для приближенной оценки влияния исчезновения коротких волн из спектра исходной волны на ее форму и амплитуды рассмотрим поле волн в пластине толщиной 1 см в спектре АЭ датчика типа ДАЭ-002Р, работающего в диапазоне волновых чисел $2 \leq \alpha \leq 5 \text{ см}^{-1}$ (рис. 6).

На рис. 7 представлена эпюра волны, распространяющейся от источника излучения, который находится на глубине 0,2 см от поверхности пластины толщиной 1 см. Сравнивая параметры этой волны с аналогичной в широком диапазоне частот (рис. 5, в), видим достаточно существенную разницу. Таким образом, наличие ограниченной полосы частот, в которой работают датчики АЭ, может привести к существенному искажению формы волны АЭ и, как следствие, к улучшению или ухудшению регистрации волн, точности определения координат источников АЭ.

Таким образом, получены теоретические зависимости, описывающие генерирование упругих волн в материалах с дефектами, локально развивающимися в них при деформировании. Движение одиночного микродефекта, например, дислокации, в приведенных выше выкладках моделируется движением точечного источника. Если перемещение источника не заканчивается одиночным скачком, то картина волнового поля, образованная перемещающейся дислокацией или развивающейся трещиной, может быть получена путем суперпозиции квантов каждого единичного источника с расчетом наложения их действия друг на друга.

1. Бобров В. Т., Свиридов Ю. Б. Трансформация импульсов рэлеевских волн в нормальные волны в упругом стержне, контактирующем с полупространством // Аннот. докл. XI Всесоюз. акустич. конф. (Москва, 1991 г.). — М.: Акустич. ин-т, 1991. — С. 18.
2. Буденков Г. А., Недзвецкая О. В. Волны Рэлея, излучаемые моделями источников акустической эмиссии // Дефектоскопия. — 1992. — № 4. — С. 8–16.
3. Вахавиолос С. Дж., Вонг В. Девид. Совершенствование метода и средств акустическо-эмиссионного контроля работающего оборудования. Оценка возможности дальнейшей эксплуатации (ВДЭ) и неразрушающий контроль на основе анализа рисков (ОВДЭ/КОАР) // Тез. докл. 3-й междунар. конф. «Диагностика трубопроводов», Москва, 21–26 мая 2001 г. — С. 217.

4. Галазюк В. А., Недосека А. Я., Чумак А. К. Исследование зависимости волнового процесса на поверхности упругого слоя от размеров и скорости возникновения внутреннего дефекта типа трещины // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1989. — № 3. — С. 3–10.
5. Использование многофункциональной акустико-эмиссионной системы МАЭС для контроля процесса сварки / В. А. Гумешюк, А. В. Яковлев, В. А. Сульженко, Н. А. Казаков // Тез. докл. 3-й междунар. конф. «Диагностика трубопроводов», Москва, 21–26 мая 2001 г. — С. 210.
6. Дослідження вкладу хвиль Релея в акустичне поле, що виникає при розвитку внутрішнього дефекту / О. Є. Андрейків, О. М. Сергієнко, М. В. Лисак, В. Р. Скальський // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 1993. — № 2. — С. 12–19.
7. Иванов В. И. Акустическая эмиссия в процессе когерентного разрушения // Докл. АН СССР. — 1986. — 287, № 2. — С. 302–306.
8. Иванов В. И. Применение метода акустической эмиссии для неразрушающего контроля и исследования материалов (Обзор основных проблем и задач) // Дефектоскопия. — 1980. — № 5. — С. 65–84.
9. Кожаринов В. Перспективы применения акустико-эмиссионного метода неразрушающего контроля в производстве // Тез. докл. 3-й междунар. конф. «Диагностика трубопроводов», Москва, 21–26 мая 2001 г. — С. 221.
10. Лыков Ю. И., Панин В. И., Шулатов А. В. Излучатель волны Рэлея импульсный точечный ИВРИТ-1 // Тез. докл. 3-й междунар. конф. «Диагностика трубопроводов», Москва, 21–26 мая 2001 г. — С. 229.
11. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Киев: Индпром, 2001. — 816 с.
12. Ceranoglu A. N., Pao Y.-H. Propagation of Elastic Pulses and Acoustic Emission in a Plate // Applied Mechanics. — 1981. — Vol. 48. — P. 125–132.
13. Pao Y.-H., Gajewski R. R., Ceranoglu A. N. Acoustic emission and transient waves in an elastic plate // Acoustical Society of America. — 1979. — 65, № 1. — P. 96–105.
14. Pao Y.-H., Gajewski R. R. Generalized ray theory and transient response of layered elastic solids // Physical acoustics. — 1977. — 13, № 6. — P. 184–265.
15. Weaver R. L., Pao Y.-H. Spectra of transient waves in elastic plates // Acoustical Society of America. — 1982. — 72, № 6. — P. 1933–1941.
16. Gillis P. P. Dislocation motions and acoustic emissions // Proc. of symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials on acoustic emission. Bal Harbour, Florida, 7–8 December 1971. — P. 20–29.
17. Tetelman A. S., Chow R. Acoustic emission testing and microcracking processes // Там же. — P. 30–40.

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

Поступила в редакцию
03.07.2001

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ СТАЛЬНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ДИАГНОСТИРОВАНИИ

Ю. В. РАДЫШ, А. С. КИРЕЕВ

Программа инструментального обследования резервуаров после монтажа и в процессе эксплуатации, изложенная в нормативных документах [1–5], включает контроль геометрической формы корпуса (стенки) резервуара по требованиям [6]. В соответствии с ними предусматриваются следующие измерения:

диаметра стенки на уровне днища (в контрольных осевых сечениях);

радиальных отклонений стенки от цилиндрической поверхности B_1 , образованной вертикалями, восстановленными из нижнего контура стенки (в контрольных точках осевых сечений);

вертикальных отклонений нижнего контура стенки от проектной горизонтальной плоскости Γ_0 , с известной отметкой уровня (в контрольных точках контура);

наибольших местных отклонений стенки от прямолинейных отрезков, соединяющих верхний и нижний края деформированного участка стенки в осевом сечении.

Одновременно производится [6] последующая оценка соответствия (несоответствия) геометрической формы стенки требованиям нормативной документации по результатам этих измерений.

Объемы и методы контроля геометрической формы стенки резервуара, предусматриваемые действующей нормативной документацией, имеют существенные недостатки. Во-первых, очевидно, что по результатам измерений невозможно построить геометрическую форму стенки из-за отсутствия результатов измерения радиальных отклонений нижнего контура стенки от проектной поверхности вертикального кругового цилиндра B_0 заданного радиуса. Эти отклонения вполне определяются прямыми измерениями радиуса стенки на уровне днища (в контрольных осевых сечениях), которые предусматривались устаревшими требованиями [7]. Однако в условиях отсутствия маркировки либо недоступного при наличии центральной стойки центра днища указанные измерения радиуса стенки неосуществимы. Поэтому в новой редакции [6] контроль радиуса стенки заменен контролем ее диаметра с соответствующим увеличением в 2 раза допустимых отклонений от проекта диаметра сравнительно с допустимыми отклонениями радиуса. Не подлежащие согласно [6] контролю радиальные отклонения нижнего контура стенки от проектной поверхности B_0 вместе с контролируемыми радиальными отклонениями стенки от поверхности B_1 оказывают существенное влияние на напряженно-деформируемое состояние резервуара при действии гидростатической нагрузки [8–10]. Следует отметить, что

попытка нормативного учета влияния не подлежащих контролю радиальных отклонений нижнего контура стенки при оценке эксплуатационной надежности резервуара предпринята в работе [2]. Однако методика контроля радиальных отклонений отсутствует.

Во-вторых, очевидно, что результаты измерений содержат методические (случайные и систематические) погрешности, для уменьшения либо полного исключения которых не предусмотрены в действующей нормативной документации эффективные процедуры первичной математической обработки. Присутствие методических погрешностей не только снижает достоверность, но и приводит к неоднозначности в результатах инструментального контроля, а следовательно, и к неопределенности в оценке технического состояния резервуара.

Цель работы. Разработка усовершенствованных методов инструментального контроля и процедур первичной математической обработки результатов контроля геометрической формы стальных вертикальных резервуаров, которые должны обеспечить возможность построения фактической геометрической формы стенки резервуара для анализа его напряженно-деформируемого состояния под действием гидростатической нагрузки, а также однозначность результатов инструментального контроля совместно с минимизацией вплоть до полного устранения методических погрешностей измерения.

Решение задач. 1. *Определение центра днища и радиальных отклонений нижнего контура стенки от проектной поверхности вертикального кругового цилиндра заданного радиуса.* Целью расчета при отсутствии маркировки центра днища резервуара является определение следующих характеристик: местоположения этого центра, фактического внутреннего радиуса резервуара, радиальных отклонений нижнего контура стенки от проектной вертикальной поверхности кругового цилиндра B_0 заданного радиуса $R_{ном}$, отклонений диаметра резервуара.

Исходными данными для расчета являются полученные при обследовании результаты прямых измерений радиуса стенки R'_i на уровне днища, определяемые как расстояние от условного центра O' до каждой i -й контрольной вертикали, восстановленной из нижнего контура стенки.

Методика расчета основана на отыскании наилучшего по [11] решения системы линейных алгебраических уравнений вида

$$R'_i = R + A_x \cos \varphi_i + A_y \sin \varphi_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

относительно фактического внутреннего радиуса резервуара R и компонентов A_x, A_y вектора малого

смещения $O'O$ фактического центра днища резервуара O от условного центра O' . Здесь использованы следующие обозначения: R'_i — результаты измерения расстояний от условного центра O' до i -й контрольной вертикали; φ_i — полярный угол направления на i -ю контрольную вертикаль из фактического центра O ; n — число контрольных вертикалей, восстановленных из соответствующих контрольных точек нижнего внутреннего контура стенки. Для равномерно расположенных контрольных вертикалей

$$\varphi_i = 360(i - 1) / n. \quad (2)$$

Используя найденные значения R , A_x , A_y , вычисляют расстояния R_i от фактического центра O до каждой i -й контрольной вертикали по формуле:

$$R_i = - (A_x \cos \varphi_i + A_y \sin \varphi_i) + [(R'_i)^2 - (A_x \sin \varphi_i - A_y \cos \varphi_i)^2]^{0,5}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (3)$$

Радиальные отклонения нижнего контура стенки от вертикальной поверхности кругового цилиндра радиуса $R_{ном}$ измеряются разностью

$$U_{0i} = R_i - R_{ном}. \quad (4)$$

Более детальная картина геометрической формы нижнего контура стенки определяется сплайн-аппроксимацией кубическими полиномами [12] радиальных отклонений (уравнение (4)) точек этого контура. Предусмотренные действующей нормативной документацией отклонения внутреннего диаметра на уровне днища определяются суммой радиальных отклонений для любой пары диаметрально противоположных точек контура.

2. *Определение геометрической формы и радиальных отклонений стенки от проектной поверхности вертикального кругового цилиндра заданного радиуса.*

Исходными данными для расчета являются:

1) результаты прямых измерений радиальных отклонений U_{ij} поверхности стенки от цилиндрической поверхности B_1 , образованной вертикалями, восстановленными из нижнего контура стенки;

2) расчетные значения радиальных отклонений U_{0j} нижнего контура стенки от проектной поверхности вертикального кругового цилиндра B_0 заданного радиуса $R_{ном}$ (см. п. 1).

Указанные радиальные отклонения определены в контрольных точках с целочисленными координатами $i = 0, 1, \dots, m$ и $j = 1, \dots, n$. Значения этих координат соответствуют номерам горизонтальных и вертикальных координатных плоскостей проектной цилиндрической системы координат, на пересечении которых с поверхностью стенки расположены контрольные точки. Фактическое число $m + 1$ горизонтальных и n вертикальных секущих плоскостей, определяющих контрольные точки при инструментальном обследовании, может превышать число секущих плоскостей, указанных в действующей нормативной документации. При этом обеспечивается необходимое сгущение контрольных точек по месту обнаруженных выпуклостей и вогнутостей стенки резервуара.

Методика расчета геометрической формы поверхности стенки резервуара основана на определении

совокупности радиальных координат R_{ij} контрольных точек этой поверхности согласно равенству

$$R_{ij} = R_{ном} + U_{0j} + U_{ij}. \quad (5)$$

Для получения более детальной картины геометрической формы внутренней поверхности стенки применяется кубическая сплайн-аппроксимация [12] радиальных координат точек этой поверхности и ее радиальных отклонений от цилиндрической поверхности B_1 , представляемая в виде соответствующих преобразований

$$R_{ab} = f(R_{ij}), \quad U_{ab} = f(U_{ij}), \quad a = 0, 1, \dots, m_1, \quad b = 1, \dots, n_1. \quad (6)$$

При этом число точек сплайн-аппроксимации поверхности стенки с целочисленными координатами a и b , равное $(m_1 + 1) \times n_1$, значительно превышает число контрольных точек, равное $(m + 1) \times n$, использованных при инструментальном обследовании. Указанная аппроксимация обеспечивает также равномерность разбивки и требуемую гладкость описания поверхности стенки резервуара для последующего анализа.

Выражение (6) определяет фактическую геометрическую форму поверхности стенки, установленную во время проведения инструментальных обследований. При этом изменения гидростатической нагрузки и температуры резервуара вызывают перемещение поверхности стенки и изменение ее напряженно-деформированного состояния.

В соответствии с действующей нормативно-технической документацией предусматриваются следующие ограничения на геометрические характеристики стенки:

1) радиальные отклонения стенки от цилиндрической поверхности B_1 , образованной восстановленными из нижнего контура стенки вертикалями, не должны превышать допустимых отклонений для каждого k -го пояса, т. е.

$$\max_{\{ab\}} |U_{ab}| \leq \Delta_k, \quad (7)$$

где максимум вычисляется по результатам измерения отклонений в контрольных точках k -пояса;

2) местные отклонения (выпучины и вмятины) стенки от отрезка прямой, лежащего в осевом сечении (вертикальной координатной плоскости) и соединяющего верхний и нижний края деформированного участка не должны превышать допустимых отклонений, зависящих от длины отрезка,

$$\max_{\{k\}} |U_{a+kb} - U_{ab} \frac{p-k}{p} - U_{a+pb} \frac{k}{p}| \leq \Delta_p, \quad (8)$$

где p — число равномерных разбиений по высоте деформированного участка стенки с постоянным шагом; $k = 0, 1, \dots, p$; a, b — координаты нижнего конца отрезка прямой (на нижнем краю деформированного участка стенки); $a + p, b$ — координаты верхнего конца отрезка прямой (на верхнем краю деформированного участка стенки).

3. *Определение вертикальных отклонений нижнего контура стенки от проектной горизонтальной плоскости заданного уровня.* Контурная часть (окрайки) днища является установочной базой стенки резервуара. Исходными данными для

расчета являются результаты нивелирования контурной части (окрайков) днища в контрольных точках нижнего контура стенки, представленные в виде неплотно заполненной таблицы прямых измерений (отсчетов) C_{ia} по нивелирной рейке в i -й контрольной точке при a -й установке нивелира.

Определение. Смена установки a на установку b в точке i называется в этом случае ненаправленным (неориентированным) переходом, который обозначается выражением

$$a \xrightarrow{i} b. \quad (9)$$

При сменах установок в процессе нивелирования возможно образование из переходов нетривиальных циклов вида

$$a \xrightarrow{j} b; a \xrightarrow{k} b \xrightarrow{c} j \text{ и т. п.} \quad (10)$$

При этом каждому циклу вида (10) при его обходе в определенном направлении соответствует уравнение связи между отсчетами по рейке вида

$$(C_{ia} - C_{ib}) + (C_{jb} - C_{ja}) = 0; \\ (C_{ia} - C_{ib}) + (C_{jb} - C_{jc}) + (C_{kc} - C_{ka}) = 0 \text{ и т. п.} \quad (11)$$

При обходе цикла в противоположном направлении левая часть этих уравнений меняет знак на противоположный.

В процессе нивелирования крайков днища по замкнутому нижнему контуру стенки образуется по меньшей мере один цикл, включающий все установки нивелира. Уравнение связей, соответствующее этому и другим циклам, обычно не выполняется при инструментальном обследовании вследствие наличия методических ошибок нивелирования. Это обуславливает неоднозначность определения высотных отметок контрольных точек, а, следовательно, и неопределенность в оценке технического состояния резервуара. Для обеспечения однозначности определения высотных отметок контрольных точек при одновременной минимизации ошибок нивелирования вплоть до полного их исключения рассматривается система линейных алгебраических уравнений вида

$$C_{ia} = H_a - Z_i, \quad a = 1, \dots, p, \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (12)$$

относительно неизвестных Z_i и H_a , определяющих соответственно высотные отметки i -й контрольной точки и нивелира при a -й установке. Здесь n — общее число контрольных точек; p — общее число установок при нивелировании. В уравнениях (12) выделяется реперная точка, имеющая индекс $i = 0$, с известной высотной отметкой Z_0 .

При заданных H_a и Z_i невязки этих уравнений вида

$$\delta_{ia} = C_{ia} - (H_a - Z_i), \quad a = 1, \dots, p, \quad i = 0, 1, \dots, n, \quad (13)$$

определяют погрешности нивелирования i -й точки в a -й установке. Поскольку возникновение погрешности нивелирования равновероятно в любой установке для любой точки, возможен подбор наилучших значений H_a и Z_i при заданном Z_0 , которые обеспечивают наименьшую среднеквадратичную погрешность нивелирования или минимизируют

сумму квадратов ошибок нивелирования во всех точках при всех установках.

Методика расчета основана на выборе указанных значений H_a и Z_i как наилучшего по [8] решения уравнений (12) при заданном значении Z_0 . Предусмотренные действующей нормативной документацией вертикальные отклонения нижнего контура стенки от проектной горизонтальной плоскости Γ_0 с заданной высотной отметкой $Z_{ном}$ определяются разностью

$$V_i = Z_i - Z_{ном}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (14)$$

Сравнительный анализ результатов определения вертикальных отклонений нижнего контура стенки обследованных резервуаров свидетельствует об уменьшении на порядок (в среднем в 10 раз) степени влияния погрешностей нивелирования при однозначном определении этих отклонений по предложенной методике сравнительно с методикой, изложенной в действующей нормативной документации. Предлагаемая методика естественно распространяется на случаи смены установок в нескольких (общих для установок) контрольных точках, привязки к нескольким различным реперным точкам в одной установке или к одной в различных установках, а также при их произвольных комбинациях. При этом избыточность информации используется наилучшим образом в целях уменьшения методической погрешности нивелирования.

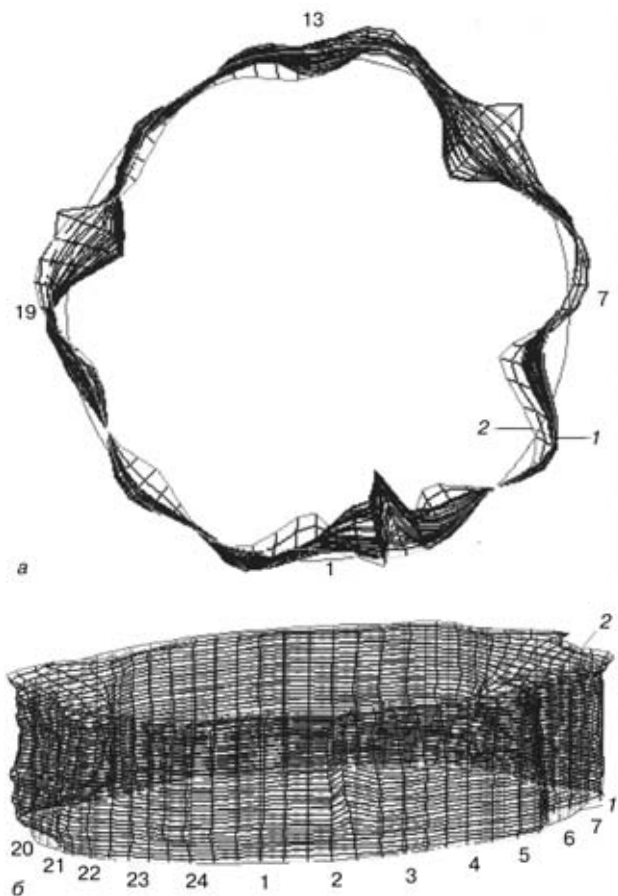
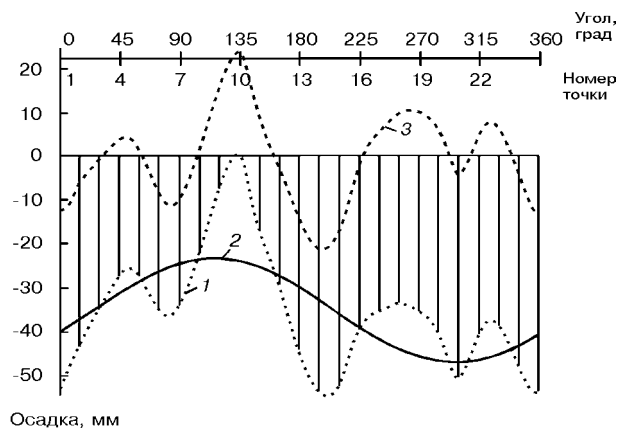


Рис. 1. Геометрическая форма стенки резервуара: а — вид сверху; б — изометрия; 1 — нижний, 2 — верхний контур; максимальное смещение 117 мм.



Осадка, мм

Рис. 2. Вертикальные отклонения нижнего контура стенки (осадки) от горизонтальной плоскости, проходящей через базовую контрольную точку 10: 1 — фактическая осадка; 2 — твердотельная, 3 — деформационная составляющие осадки; смещение по вертикали равно $-34,8$ мм; уровень крена — $1,8'$; направление крена — 96° ; число измеренных точек — 24.

4. *Определение составляющих неравномерной осадки резервуара: поступательной осадки, крена и деформационной составляющей.* Исходными данными для расчета являются результаты нивелирования Z_i или V_i контурной части (окрайков) днища по нижнему контуру стенки в контрольных точках (см. п. 3). Методика разложения неравномерной осадки резервуара на твердотельную составляющую, представленную поступательной осадкой и креном резервуара, и деформационную составляющую представлена в [8–10]. Изменения деформационной составляющей осадки при гидростатической нагрузке являются причиной возникновения дополнительных напряжений стенки резервуара вблизи уторного узла.

Заключение. Изложенные методы инструментального контроля геометрической формы стенки и первичной математической обработки результатов этого контроля прошли апробацию при проведении обследований резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. Методы первичной математической обработки результатов инструментального обследования реализованы в виде специализирован-

ного программного обеспечения, обеспечивающего возможность оперативной обработки и анализа этих результатов в табличной и графической формах. Примеры графических изображений геометрической формы стенки резервуара в скелетном виде и осадки нижнего контура стенки, построенных по описанной выше методике, приведены на рис. 1, 2 и в работах [8–10].

1. *Правила технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту* / Гос. комитет СССР по обеспечению нефтепродуктами. — М.: Недра, 1988. — 269 с.
2. *Правила технічної експлуатації резервуарів та інструкції по їх ремонту. Додатки та зміни* / Укр. об'єднання «Нафтопродукт». — Київ: 1997. — 121 с.
3. *Руководство по обследованию и дефектоскопии стальных вертикальных резервуаров* / Гос. ком. РСФСР по обеспечению нефтепродуктами. — Астрахань, 1989. — 145 с.
4. *Инструкция по техническому надзору, методам ревизии и отбраковке трубчатых печей, резервуаров, сосудов и аппаратов нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств.* ИТН-93 / ВНИКТИнефтехимоборудование. — Волгоград, 1995. — 192 с.
5. *ВСН 311-89.* Монтаж стальных вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов объемом от 100 до 50000 м³ / Минмонтажспецстрой СССР. — М., 1989. — 99 с.
6. *СНиП 3.03.01-87.* Несущие и ограждающие конструкции. / Госстрой СССР. — М.: 1986. — 190 с.
7. *СНиП 111-18-75.* Правила производства и приемки работ. Металлические конструкции. — М., Госстрой СССР, 1976. — 160 с.
8. *Радыш Ю. В., Киреев А. С.* Совершенствование базы диагностики технического состояния и прогнозирования надежности резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов // *Технич. диагностика и неразруш. контроль.* — 2000. — № 4. — С. 38–47.
9. *Барзилович Д. В., Радыш Ю. В., Киреев А. С.* Совершенствование диагностики и прогнозирования надежности нефтерезервуаров. — Монтажные и спец. работы в строит-ве. — 2001. — № 1. — С. 23–26.
10. *Тенденции в развитии комплексных требований к резервуарам для хранения нефти (зарубежный опыт)* / А. М. Боровский, Б. М. Медник, Ю. В. Радыш, А. А. Цвигун — Киев: Основа, 2000. — 208 с.
11. *Гантмахер Р.* Теория матриц. — М.: Наука, 1966. — 576 с.
12. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1984. — 832 с.

Корпорация «Укрмонтажспецстрой»,
Технический комитет «Спецмонтаж»,
Киев

Поступила в редакцию
29.03.2001

ЗАСОБИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ У СЕРЕДОВИЩІ ВОДНЮ ВИСОКИХ ПАРАМЕТРІВ

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ

Водень у сучасному науково-технічному поступі відіграє дуже важливу роль. Він стає все більше необхідним у технологічних процесах як хімічне паливо, а його важкі ізотопи — дейтерій та тритій — є незамінними у якості палива для ядерних реакторів. Тому проблема взаємодії водню із конструкційними матеріалами, із яких виготовляються ємності для його зберігання і технологічне обладнання — для транспортування, привертає до себе увагу багатьох науково-дослідницьких центрів. Підвищену зацікавленість у розв'язанні цієї проблеми проявляють авіакосмічна, хімічна та нафтопереробна промисловості та ціла низка галузей машинобудування.

Хоча прояв руйнування, котре зумовлене водневою деградацією матеріалів, відомий вже давно, однак практично відсутні методи досліджень, а також засоби реалізації останніх, які дозволяли б виявляти ранні стадії спричиненого воднем руйнування. І сьогодні актуальні задачі забезпечення надійності роботи як конструкцій в цілому, так і окремих їх деталей і вузлів, котрі працюють у безпосередньому контакті із воденьмісними середовищами. З цієї точки зору в якості методу неруйнівного контролю особливою ефективністю відзначається метод акустичної емісії (АЕ), що забезпечує завчасне виявлення руйнування матеріалу під дією водневого чинника та прикладеного навантаження [1–5]. Він вигідно відрізняється від інших методів неруйнівного контролю тим, що генерація сигналів АЕ (САЕ) розпочинається вже за навантажень, за яких дефекти у мікрообластях матеріалу ще не можуть себе проявити на макрорівні [6–10].

Якщо взяти до уваги, що у згаданих сферах виробництва в унікальних конструкціях поряд із кольоровими металами і високолегованими сталями все більше використовуються високоміцні низьколеговані сталі, то їх діагностування неможливо уявити без застосування явища АЕ. Адже вони надзвичайно чутливі до процесів водневого окрихчування, тобто мають високу чутливість до дії водню навіть за дуже низьких концентрацій. Як показали результати експериментальних досліджень, за допомогою АЕ можна виявляти водневе і корозійне розтріскування на ранніх стадіях цих процесів не тільки під час лабораторних випробувань [11–15], але і під час експлуатації виробів [16–18]. В даний час в Україні серійно не випускаються засоби для проведення досліджень конструкційних матеріалів у воденьмісних середовищах. Тим більше застосування методу АЗ вимагає певної специфіки конструкцій таких засобів.

Виходячи із цього, метою роботи є розробка конструкцій засобів для оцінки динаміки розвитку про-

цесів водневого розтріскування конструкційних матеріалів у середовищі газоподібного водню високих температур та тисків.

Установка для випробувань зразків триточковим згином. За конструктивними ознаками установку можна розділити на такі дві автономні основні частини: автоклав і навантажувальний пристрій. До складу першої входять (рис. 1): 1 — корпус, 2 — кришка, 3 — гайка, 4 — ущільнююче кільце, 5 — затискний прогонич, 6 — вузол для відкачування газів і подачі газоподібного водню у автоклав, 7, 8 — струмовводи електронагрівача та термопари відповідно. Навантажувальний пристрій має наступні елементи і вузли: 9 — інденитор-хвилевід САЕ (який одним кінцем безпосередньо контактує із досліджуванним зразком матеріалу, а іншим — утворює вузол відбору інформації у складі тензометричного динамометра 10, в якому розміщено первинний п'єзоперетворювач САЕ (ПАЕ) — П), 12 — гайку, 13 — шток, 14 — корпус, 15 — підшипник, 16 — навантажувальний прогонич, 17 — опорну гайку, 18 — ущільнення, 19 — вузол охолодження із каналами для проточної води 20, 21 — тензометричний вимірювач переміщення індентора, 22 — стрілочний індикатор переміщення, 23 — стяжки, 24 — кронштейн, 25 — втулку.

Всі вище перераховані елементи утворюють необхідні компоновочні вузли, які є розбірними і забезпечують задані режими роботи установки. Конструкція автоклаву виконана компактною із мінімальним робочим об'ємом, що дає змогу дотримуватися правил безпечної експлуатації його під час проведення експериментальних робіт з використанням газоподібного водню. Нагрівання робочого об'єму здійснюється електронагрівачами спеціальної конструкції. Навантаження призматичного зразка триточковим згином може бути монотонним або ступінчато-дискретним, від механічних чи гідравлічних навантажувальних установок або ручним.

Монтаж установки проводять таким чином. До корпусу 1 автоклаву із попередньо жорстко зафіксованим вузлом охолодження 19 приєднують навантажувальний пристрій шляхом розміщення втулки 25 із індентором 9, та ущільненням 18, кронштейном 24 та ПАЕ 11 і ущільнюють гайкою 12, а відтак встановлюють корпус 14 за допомогою різьбового з'єднання. У корпусі розміщують шток 13 із підшипником 15 і навантажувальним прогоничем 16 з опорною гайкою 17 та завершують монтаж пристрою фіксацією стяжок 23, стрілочного індикатора переміщення 22 і пружного елемента 21 тензометричного вимірювача переміщення індентора-хвилевода САЕ 9. Після цього корпус автоклаву фіксується за допомогою фланця 25 до станини 26 і в його робочому об'ємі на опорах 27 розміщують

досліджуваний зразок 28 із виведеною втомною тріщиною 29 або без такої, у залежності від умов експерименту. Зверху корпус 1 закривається кришкою 2 після під'єднання до неї виводів термопари 8 та електронагрівача 9. Кришка 2 ставиться на ущільнююче кільце 4 і здійснюється її затискання гайкою 3, а кінцево — прогоничами 5.

Принцип роботи установки. Виконавши всі необхідні процедури з герметизації автоклаву та налаштуванню навантажувального пристрою, приступають до створення необхідних параметрів водневого середовища. Це відбувається шляхом проведення необхідних процедур, а саме: відкачування повітря із робочого об'єму автоклаву, створення вакууму, промивання робочого об'єму автоклаву і т. ін. за допомогою пристроїв та систем, котрі по-

казано на рис. 2. Вийшовши на потрібний режим наводнення і контролюючи його температуру та тиск, переходять до навантаження зразка 28. Для цього використовують гвинтову пару 16, 17 у корпусі 14 (рис. 1), зусилля навантаження від якої передається через підшипник 15 і шток 13 на індентор-хвилевід САЕ 9. З метою забезпечення оптимальних температурних режимів роботи тензометричного динамометра 10 і ПАЕ 11 у вузлі охолодження підтримується (проточною водою через канали 20) необхідна температура індентора-хвилевода.

Діаграми руйнування та акустограми у реальному масштабі часу отримують за допомогою електронних пристроїв і персонального комп'ютера (рис. 2), що дає змогу визначати параметри розвитку тріщини, а, відтак, визначати не тільки кіне-

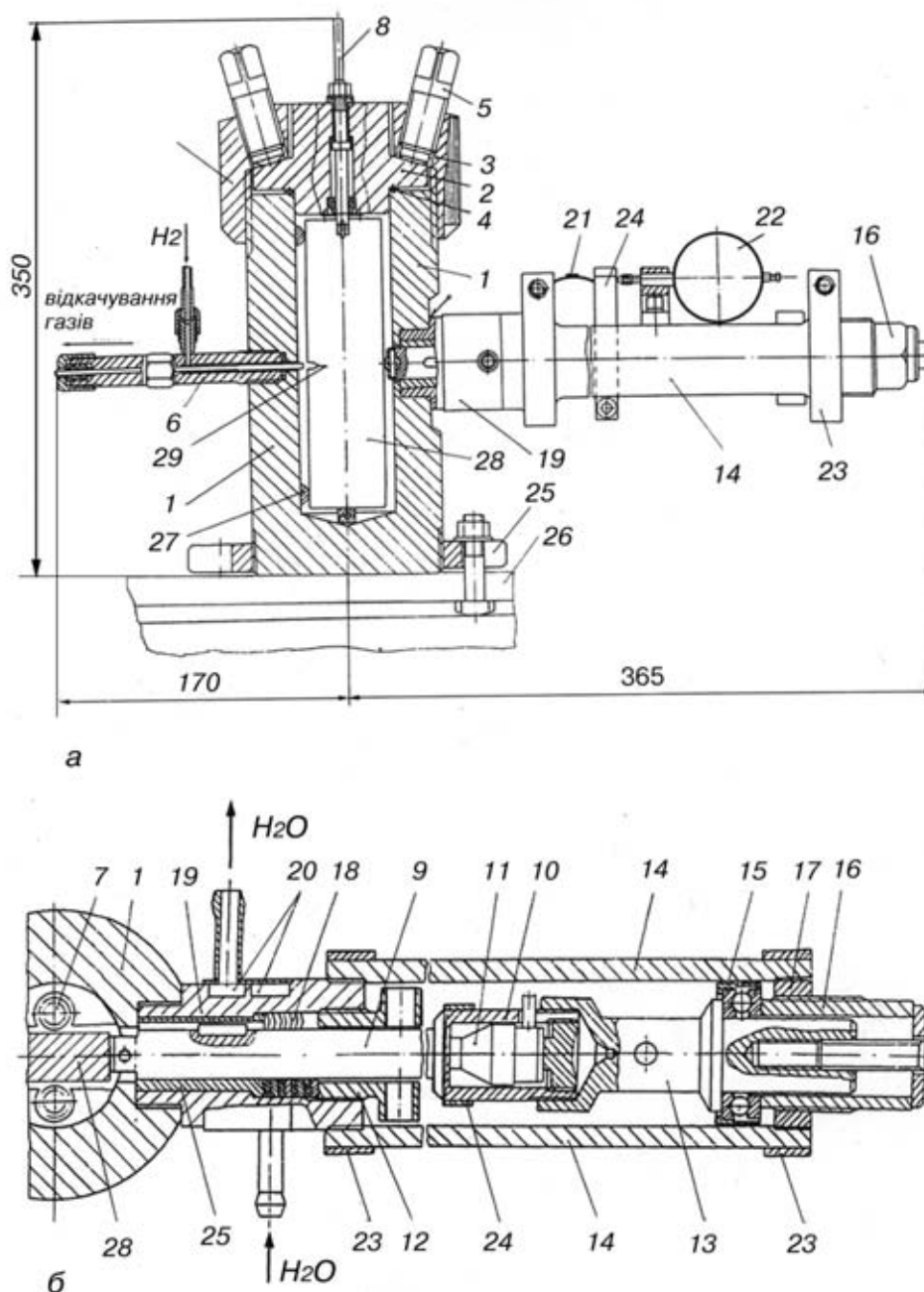


Рис. 1. Будова автоклаву (а) та навантажувального пристрою із вузлом охолодження (б).

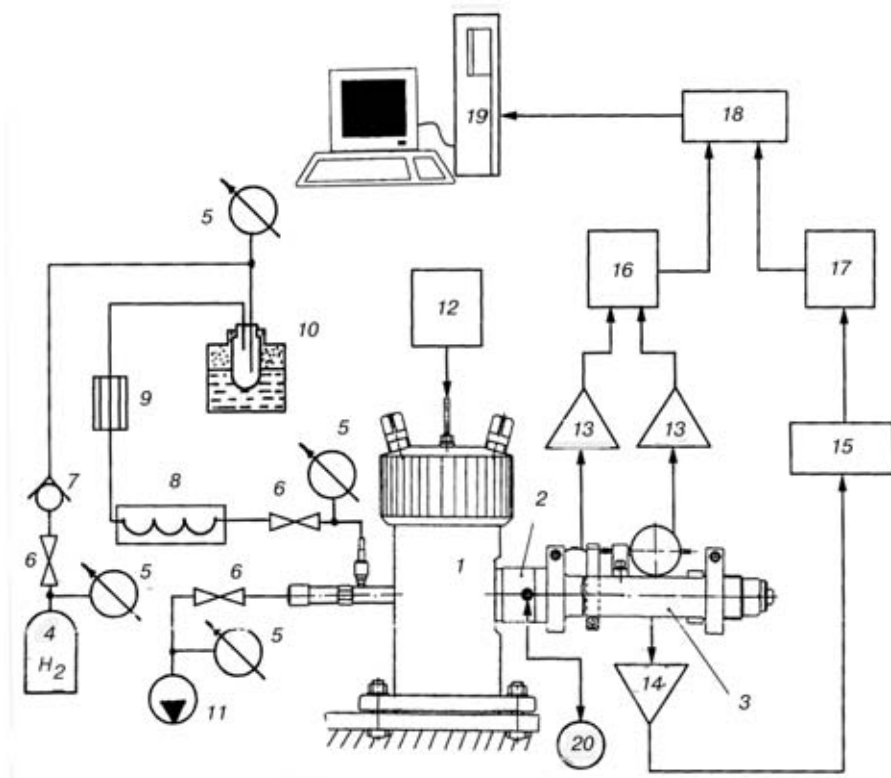


Рис. 2. Функціональна блок-схема проведення експериментальних робіт із використанням установки: 1 – автоклав, 2 – навантажувальний пристрій, 3 – вузол охолодження, 4 – ємність із газоподібним воднем, 5 – манометр, 6 – вентиль, 7 – редуктор, 8 – пристрій просушування газоподібного водню, 9 – пристрій очистки від твердих домішок, 10 – камера відбору водяної пари, 11 – форвакуумна помпа, 12 – блок управління нагрівом автоклаву, 13 – підсилювач постійного струму, 14 – попередній підсилювач САЕ, 15 – блок фільтрів, 16 – аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), 17 – АЦП САЕ, 18 – пристрій обміну між АЦП і комп'ютером, 19 – персональний комп'ютер PC/AT, 20 – система охолодження.

тику їх розвитку чи тріщиностійкість матеріалу, а й такий важливий параметр в'язкості руйнування матеріалів у робочих середовищах як нижнє порогове значення коефіцієнта інтенсивності напружень — K_{Isc} . Саме застосування методу АЕ дозволяє визначати стадії докритичного розвитку тріщини під час довготривалого статичного навантаження, коли вона розпочинає свій субкритичний ріст всередині зразка локально по фронту втомної тріщини. Як показала практика таких досліджень, інші методи неруйнівного контролю у цьому випадку неефективні.

Розрахунок геометричних розмірів індентор-хвилевода і його частотних характеристик проводили за методиками [19], а автоматичне управління нагрівом автоклаву здійснювали за допомогою спеціально розробленого блоку [20].

Технічні характеристики установки

Робоче середовище	газоподібні водень, азот, кисень, повітря, інертні гази
Максимальний тиск газів	.....25 МПа
Діапазон температур	..... 253... 673 К
Час виходу на температурний режим	..... 1,8 кс
Робочий об'єм автоклаву	..... 0,58 dm ³
Робочий об'єм газу	..... 0,18 dm ³
Максимальний струм нагрівання	..... 100 А
Максимальні розміри зразка (товщина, висота, довжина)	..... 12×46×170 mm
Максимальне навантаження	..... 18,8 kN
Габаритні розміри (ширина, довжина, висота)	..... 135×535×350 mm
Маса установки	..... 295 N

Спеціальний автоклав для насичення зразків газоподібним воднем.

На рис. 3 показано конструкцію автоклаву, котрий розроблено спеціально для дослідження водневої деградації зразків матеріалів після дії на них газоподібного водневого середовища високого тиску та температури. Принцип завантаження робочого об'єму автоклаву наступний. Зразки 11 розміщують в циліндричному об'ємі електронагрівача 5, що разом із електровводами розміщений на основі 11. Після цього в канавку основи закладають ущільнювач 4, на який ставиться корпус 10. Він накривається обіймою 7, яка фіксується до основи за допомогою двох півкільць — стяжок 3, що з'єднуються прогоничами 8. Герметизація автоклаву здійснюється за рахунок зусиль стиску, які створюються по чергово натискними прогоничами 2 та гайкою-затискачем 9.

Системи промивки робочого об'єму автоклаву, подачі газоподібного водню, управління нагрівом і т.д. використовуються аналогічні описаній вище установці (див. рис. 2).

Технічні характеристики автоклаву

Максимально допустимий тиск газоподібного водневого середовища	..... 250 МПа
Об'єм робочої частини	..... 850 cm ³
Діаметр робочої частини	..... 100 mm
Час нагріву до температури 773 К	..... 26,64 кс
Габаритні розміри:	
- діаметр найширшої частини автоклаву	..... 576 mm
- висота	..... 805 mm
Маса автоклаву	..... 1,56 kN

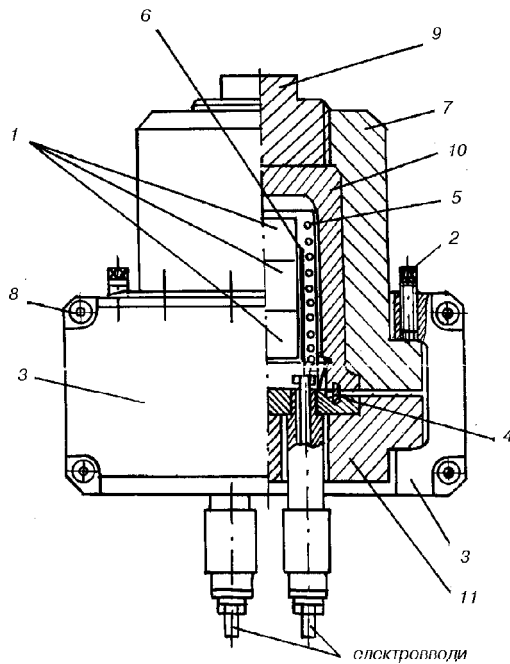


Рис. 3. Будова автоклаву для насичення зразків конструкційних матеріалів у середовищі водню високих концентрацій: 1 — зразок, 2 — натискний прогонич, 3 — напівкільце-стяжка, 4 — ущільнення, 5 — нагрівач, 6 — термopapa, 7 — обoйма, 8 — прогонич, 9 — затискна гайка, 10 — корпус, 11 — основа.

Отже, конструкції описаних засобів забезпечують ефективне їх застосування у лабораторних дослідженнях і відзначаються високою надійністю роботи та простотою обслуговування, оригінальністю вирішення проблеми відбору і реєстрації необхідної вимірювальної інформації. Крім того, вони забезпечують економію енергоресурсів, матеріалів і не потребують високої кваліфікації обслуговуючого персоналу, що дає підстави для запровадження їх у серійне виробництво.

1. Dunegan H. L., Tetelman A. S. Nondestructive characterization of hydrogen embrittlement cracking by acoustic emission // Eng. Fract. Mech. — 1971. — 2, V 4. — P. 387-402.
2. Schnitt-Thomas K. G., Stengel W. Möglichkeiten zur Führung von Wasserstoffschadigungen in metallischen Werkstoffen durch Anwendung der Schallemissionanalyse // Werkstoffe und Korrosion. — 1983. — 34. — S. 7-13.
3. Hartbower C. E., Gerberich W. W., Crimmins P. P. Monitoring subcritical crack growth by detecting of elastic stress waves // Weld. Journ. — 1968. — 47, № 1. — P. 15. — 18s.
4. Bassim M. N., Piron D. L. Acoustic emission monitoring of large structures under corrosive environment // Brit. J. Non-Destruct. Test. — 1982. — 24, № 5. — P. 259-262.
5. Застосування методу акустичної емісії при дослідженні матеріалів у водневому та корозійному середовищах / О. Є. Андрейків, М. В. Лисак, О. М. Сергієнко, Скальський В. Р.

Фіз.-мех. ін-т НАН України ім. Г. В. Карпенка,
Львів

// Физ.-хим. механика материалов. — 1990. — № 5. — С. 26-36.

6. Застосування методу акустичної емісії для дослідження утворення тріщин під захисною наплавкою корпусів реакторів / М. В. Лисак, В. Р. Скальський, Я. Л. Іваницький, С. Є. Ковчик і ін. // Там же. — 1989. — № 2. — С. 79-81.
7. Водородное растрескивание металлов и сплавов и его акустико-эмиссионный контроль / А. Е. Андрейків, Н. В. Лысак, В. Р. Скальський и др. // Там же. — 1992. — № 4. — С. 63-68.
8. Определение водородной поврежденности сталей котельных труб импульсным прозвучиванием / А. Е. Андрейків, Н. В. Лысак, В. Р. Скальський, О. Н. Сергієнко // Технич. диагностика и неразруш. контроль. — 1993. — № 3. — С. 58-65.
9. Скальський В. Р. Влияние водорода на растрескивание металлов и контроль таких процессов методом АЭ // Там же. — 1995. — № 1. — С. 52-65.
10. Скальський В. Р., Вайтман А. Б. Особливості генерації сигналів акустичної емісії корозійнопошкодженого сталю трубопроводів живлення надвисокого тиску // Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец. випуск. — 2000. — 2, № 1. — С. 692-697.
11. Методика определения $K_{I\text{SSC}}$ стали в среде водорода с помощью метода акустической эмиссии / А. Е. Андрейків, Н. В. Лысак, В. Р. Скальський, О. М. Сергієнко // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1992. — № 1. — С. 18-26.
12. Andreykiv O. Ye., Lysak M. V., Skalsky V. R. Method of accelerated evaluation of $K_{I\text{SSC}}$ under stress corrosion cracking // Eng. Fract. Mech. — 1996. — 54, № 3. — P. 387-394.
13. Скальський В. Р., Андрейків О. Є., Сергієнко О. М. Оцінка водневої пошкодженості матеріалів за амплітудами сигналів акустичної емісії // Техн. диагностика й неразруш. контроль. — 1999. — № 1. — С. 17-27.
14. Андрейків О. С., Скальський В. Р., Гембара О. В. Метод оцінки високотемпературного водневого руйнування біметалевих елементів конструкцій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2000. — № 4. — С. 15-22.
15. Патент України №23095А. МПК: G01N17/00; G01N29/04. Спосіб оцінки схильності до водневої деградації конструкційних сплавів / Скальський В. Р. Опубл. 30.06.98 р. Бюл. № 3.
16. Dwight P. Detection of corrosion pitting using acoustic emission technology // Proc. 14th Symp. Nondestruct. Eval., Sail Antonio, Tex., 19-21 Apr., 1983. — 1. — P. 388-402.
17. Hutton P.H., Kurtz R.J. Acoustic emission for on-line reactor monitoring. Results of intermediate vessel test monitoring and reactor hot functional // Rev. Progr. Quart. Nondestruct. Eval.: Proc. 11-th Annu. Rev., San Diego, Calif., 8-13 July, 1984. — New-York 1985. — P. 701-708.
18. Singh G. P. Inspection for hydrogen damage in boiler waterwall tubes // Mater. Eval. — 1985. — 43, № 4. — P. 1164-1166.
19. Лисак М. В., Скальський В. Р., Сергієнко О. М. Дослідження впливу хвилеводу на зміну параметрів сигналів акустичної емісії // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 1994. — № 2. — С. 64-70.
20. Пристрої і установки для визначення тріщиностійкості конструкційних матеріалів методом акустичної емісії / В. Р. Скальський, О. Є. Андрейків, М. В. Лисак, С. Є. Ковчик і ін. — Львів, 1998. — 56 с. — (Препр./ НАН України. Фіз.-мех. ін-т; № 1/98).

Надійшла до редакції
18.12.2000

ДИАГНОСТИКА ПОВРЕЖДЕНИЯ СВОБОДНО КОЛЕБЛЮЩИХСЯ ПОЛОГИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

А. Б. РОЙТМАН, Д. И. АНПИЛОГОВ

В последнее время опубликовано значительное количество работ [1–6], посвященных исследованию качества вибрационных индикаторов повреждения (ВИП) стержневых элементов механических конструкций и сравнению эффективности этих индикаторов. При этом рассматриваются различные параметры как свободных, так и вынужденных колебаний: постоянная составляющая и амплитуды гармоник, коэффициент гармонических искажений [1], начальные фазы гармоник, амплитуды суб- и супергармонических колебаний [2] и др. Ведущей идеей этих работ является представление о стержне как о колебательной системе с одной степенью свободы: в статье [3] показано, что возникновением сопутствующих раскрытию трещины высших пространственных форм колебаний можно пренебречь. Поэтому описание движения такого стержня, являющегося системой с распределенными параметрами, эквивалентно описанию движения материальной точки под действием восстанавливающей силы.

Обычно характеристику восстанавливающей силы (ХВС) моделируют кусочно-линейной функцией смещения колеблющейся точки из положения равновесия. Эту модель обосновывают так называемым «дыханием» трещины, которое заключается в ослаблении жесткости стержня при ее раскрытии. При этом используют следующий прием [4]. Считают, что в течение полуцикла колебаний, когда трещина открывается (открытый полуцикл), происходит перераспределение потенциальной энергии упругой деформации по объему стержня. Для нового распределения энергии характерно формирование разгрузочной области — части объема материала, содержащей трещину и лишенной напряжений. Учет такой области эквивалентен выборке соответствующего объема материала, то есть ослаблению жесткости при наступлении открытого полуцикла. В момент начала полуцикла колебаний, когда трещина закрывается (закрытый полуцикл), жесткость восстанавливает свое первоначальное значение: упругие свойства стержня с закрытой трещиной не отличаются от упругих свойств стержня без трещины. Период свободных колебаний такой системы определяют как сумму полупериодов колебаний двух линейных систем [5]. С учетом модели кусочно-линейной ХВС [6] на основе асимптотического метода нелинейной механики исследованы вынужденные колебания стержня с дышащей трещиной, расположенной на его боковой поверхности. Очевидно, кусочно-линейная модель ХВС, предполагающая постоянство размеров разгрузочной области, подразумевает мгновенное «переключение» жесткости стержня в моменты смены полуциклов. Поэтому одним из направлений дальнейшего

развития идеи «дышащей» трещины может являться представление о плавном «переключении» жесткости. При этом размеры разгрузочной области должны колебаться: естественно полагать, что при движении на открытом полуцикле в сторону открытия трещины размеры этой области растут. Таким образом, «дышать» должна не трещина, а порождаемая ею разгрузочная область. Этот подход позволяет рассматривать иную модель ХВС.

Другое направление связано с переходом от стержней к конструкциям с более сложной геометрией. В частности, представляет интерес диагностирование повреждения пологих цилиндрических оболочек. Целью настоящей работы является диагностирование повреждения типа дышащей трещины в полой цилиндрической оболочке на основании исследования параметров ее свободных колебаний как в рамках кусочно-линейной, так и с позиций кусочно-нелинейной модели характеристики восстанавливающей силы.

1. Изгибные колебания полой цилиндрической оболочки без трещины. Рассмотрим изгибные колебания полой цилиндрической оболочки без повреждений с геометрическими параметрами, указанными на рис. 1. Вычислим частоту собственных колебаний методом Рэлея. Пусть оболочка зашпелена вдоль контурных меридианов (координатных линий $s = 0$ и $s = s_1$) и свободно вдоль контурных дуг (координатных линий $x = 0$ и $x = 1$). Компоненты смещения точки (x, s) срединной поверхности из положения равновесия вдоль направляющей,

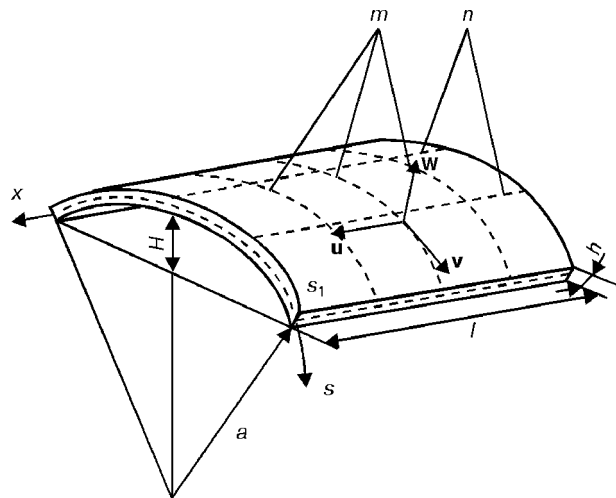


Рис. 1. Геометрические параметры полой цилиндрической оболочки: a — радиус оболочки; l — длина меридиана (образующей); s_1 — длина дуги (направляющей); H — высота подъема; h — толщина оболочки; (x, s) — криволинейная система координат; m — количество узловых дуг; n — количество узловых меридианов.

касательной к образующей и нормали соответственно в случае изгибных колебаний ищем в виде [7]

$$\begin{cases} u_1 = 0, \\ v_1 = 0, \\ w_1 = AX(x)Y(s)\phi_1(t), \end{cases} \quad (1)$$

где A — некоторая константа, зависящая от начальных условий; $\phi_1(t)$ — временной сомножитель компонент смещения; X, Y — балочные функции, соответствующие граничным условиям

$$\begin{aligned} X''(0) = X'''(0) = X''(1) = X'''(1) = 0, \\ Y(0) = Y'(0) = Y(s_1) = Y'(s_1) = 0. \end{aligned}$$

С использованием этих условий для простейшей формы колебаний имеем

$$X \equiv 1, \quad Y = \operatorname{ch} \frac{ks}{s_1} - \cos \frac{ks}{s_1} - \sigma \left(\operatorname{sh} \frac{ks}{s_1} - \sin \frac{ks}{s_1} \right).$$

Здесь $\sigma = (\operatorname{ch}k - \cos k) / (\operatorname{sh}k - \sin k)$, где k — наименьший положительный корень уравнения $\operatorname{ch}k \cdot \cos k = 1$.

Вычислим потенциальную энергию упругой деформации оболочки. Она равна [7, 8]

$$\begin{aligned} \Pi = \frac{E}{2(1-\mu^2)} \iint_{(\Omega)} dx ds \int_{-h/2}^{h/2} [\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + 2\mu\epsilon_1\epsilon_2 + (1-\mu)\gamma^2/2 + \\ + z^2\{\kappa_1^2 + \kappa_2^2 + 2\mu\kappa_1\kappa_2 + 2(1-\mu)\tau^2\}] dz. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь E — модуль упругости; μ — коэффициент Пуассона материала оболочки; Ω — область $x \in [0; 1], s \in [0; s_1]$. Параметры деформации срединной поверхности вычисляются следующим образом. Осевые деформации вдоль направлений x, s равны $\epsilon_1 = \partial u / \partial x, \epsilon_2 = \partial v / \partial s - w / a$, а сдвиг в срединной поверхности $\gamma = \partial v / \partial x + \partial u / \partial s$. Параметры кривизны вдоль направлений x, s равны $\kappa_1 = -\partial^2 w / \partial x^2, \kappa_2 = (\partial v / \partial s) / a - \partial^2 w / \partial s^2$.

Параметр кручения срединной поверхности

$$\tau = (\partial v / \partial x) / a - \partial^2 w / (\partial x \partial s).$$

При рассмотрении колебаний вида, описываемого соотношениями (1), четыре из шести параметров деформации, определяющих потенциальную энергию оболочки, оказываются равными нулю: $\epsilon_1 = 0, \gamma = 0, \kappa_1 = 0, \tau = 0$. Поэтому формула (2) для потенциальной энергии упругой деформации оболочки значительно упрощается и принимает следующий вид:

$$\Pi = \frac{E}{2(1-\mu^2)} \iint_{(\Omega)} dx ds \int_{-h/2}^{h/2} (\epsilon_2^2 + z^2 \kappa_2^2) dz. \quad (3)$$

Полагая $w = w_1$, с учетом выражения (1) получаем

$$\Pi = \frac{ELA^2}{2(1-\mu^2)} \left(\frac{hs_1}{a^2} + \frac{h^3}{12} \frac{k^4}{s_1^3} \right) \phi_1^2(t). \quad (4)$$

Кинетическая энергия колебаний оболочки [7, 8]

$$T = \frac{\rho h}{2} \int_0^1 \int_0^{s_1} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right\} dx ds,$$

где ρ — плотность материала. Используя выражения (1), приходим к такому результату:

$$T_1 = 0,5\rho h s_1 A^2 \dot{\phi}_1^2. \quad (5)$$

Точкой здесь и далее обозначено дифференцирование по времени. В связи с отсутствием потерь энергии свободные колебания оболочки описываются уравнением

$$\dot{T}_1 + \dot{\Pi}_1 = 0. \quad (6)$$

При подстановке выражений (4) и (5) в уравнение (6) имеем

$$\ddot{\phi}_1 + \frac{E}{\rho(1-\mu^2)} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{h^2}{12} \frac{k^4}{s_1^4} \right) \phi_1 = 0. \quad (7)$$

Уравнение (7) совпадает с уравнением

$$\ddot{\phi}_1 + K_1 \phi_1 = 0 \quad (8)$$

свободных колебаний материальной точки единичной массы, закрепленной на пружине жесткостью K_1 , поэтому оболочке без трещины при рассматриваемой форме колебаний следует приписать жесткость

$$K_1 = \frac{E}{\rho(1-\mu^2)} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{h^2}{12} \frac{k^4}{s_1^4} \right). \quad (9)$$

Из уравнения (7) видно, что малые свободные колебания оболочки без повреждений являются гармоническими и происходят с частотой $\omega_1 = \sqrt{K_1}$.

2. Изгибные колебания пологой цилиндрической оболочки с поверхностью, покрытой густой сетью трещин. Пусть теперь оболочка имеет рассеянное повреждение в виде сети трещин, покрывающих ее поверхность. Таким повреждениям, носящим коррозионно-эрозионный характер и достигающим до 80 % всей площади поверхности, могут быть подвергнуты лопатки авиационных газотурбинных двигателей, работающих в условиях химически активных сред [9]. Густоту сети трещин будем считать настолько высокой, что происходит перекрытие разгрузочных областей соседних трещин. Пусть средняя глубина этих трещин равна h_1 . Тогда можно считать, что поверхностный слой толщиной h_1 , продолжая вносить вклад в массово инерционные свойства оболочки на обоих полуциклах, вносит вклад в ее упругие свойства только на закрытом полуцикле. Жесткость оболочки для открытого полуцикла следует вычислять в соответствии с выражением (9), подставляя вместо толщины h остаточную толщину $h^* = h - h_1$. Считая оболочку полой, а ее радиус — достаточно большим, пренебрежем слагаемым $1/a^2$. Тогда жесткости соответственно на закрытом и открытом полуциклах равны

$$K_1 = \frac{E}{\rho(1-\mu^2)} \frac{h^2}{12} \frac{k^4}{s_1^4}, \quad K_2 = \frac{E}{\rho(1-\mu^2)} \frac{h^2(1-\alpha)^2}{12} \frac{k^4}{s_1^4},$$

где $\alpha = h_1/h$ — относительная глубина сети трещин. Если соотношение (8) трактовать как второй закон Ньютона, то выражения $K_1\phi$ и $K_2\phi$ будут силами упругости, соответствующими закону Гука.

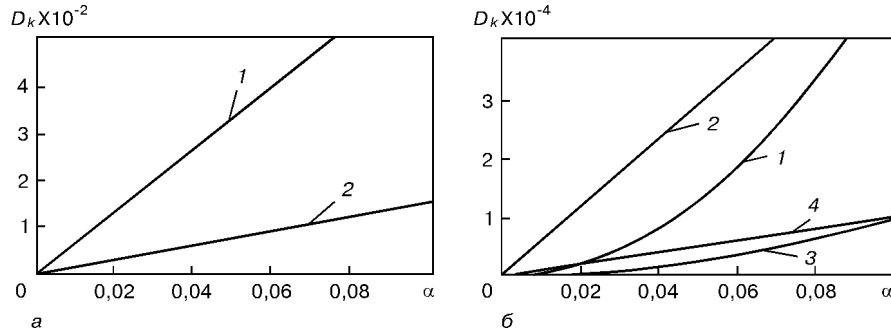


Рис. 2. Зависимость амплитуд гармоник от относительной глубины трещины: а — постоянная составляющая и амплитуда второй гармоники (1 — k = 0; 2 — k = 2); б — амплитуды высших гармоник (1 — k = 3; 2 — 4; 3 — 5; 4 — 6).

Таким образом, восстанавливающая сила оказывается кусочно-линейной функцией координаты φ , поэтому колебания для каждого полупериода являются гармоническими и происходят с частотами $\omega_1 = \sqrt{K_1}$, $\omega_2 = \sqrt{K_2}$. При этом

$$\omega_2/\omega_1 = 1 - \alpha. \quad (10)$$

Закон движения произвольной точки срединной поверхности оболочки имеет вид

$$\varphi(t) = \begin{cases} \sin \omega_1 t, & 0 \leq t \leq \pi/\omega_1, \\ -\beta \sin \omega_2(t - \pi/\omega_1), & \pi/\omega_1 < t \leq 2\pi/\omega. \end{cases} \quad (11)$$

Здесь β — отношение амплитуд открытого и закрытого полупериодов; ω — усредненная частота колебаний, равная

$$\omega = \frac{2\pi}{\pi/\omega_1 + \pi/\omega_2} = \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2}. \quad (12)$$

Выбор фазового сдвига на открытом полупериоде обеспечивает непрерывность функции (11) в точке $t_0 = \pi/\omega_0$ и противофазность открытого и закрытого полупериодов. Легко показать, что при выполнении условия $\beta = \omega_1/\omega_2$ функция (11) оказывается гладкой. Кроме того, при выполнении указанного условия оказываются равными максимальные значения потенциальных энергий, достигаемые на различных полупериодах. Имеем $\beta = (1 - \alpha)^{-1}$. С учетом выражения (10) соотношение (12) запишем в виде

$$\omega/\omega_1 = 2(1 - \alpha)/(2 - \alpha).$$

Тогда функция (11) принимает вид:

$$\varphi(t) = \begin{cases} \sin \omega_1 t, & 0 \leq t \leq \pi/\omega_1, \\ \beta \sin[(1 - \alpha)\omega_1 t + \alpha\pi], & \pi/\omega_1 < t \leq 2\pi/\omega. \end{cases} \quad (13)$$

Рассмотрим разложение функции (13) в ряд Фурье на интервале $t \in [0, 2\pi/\omega]$:

$$\varphi(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t).$$

Вычисление коэффициентов этого ряда с использованием выражений (13) приводит к результатам:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \frac{\omega}{\omega_1} M_k (1 + \cos k\pi \frac{\omega}{\omega_1}), \quad (14)$$

$$b_k = 0, \quad 1, 2, \dots, \quad b_k = \frac{1}{\pi} \frac{\omega}{\omega_1} M_k \sin k\pi \frac{\omega}{\omega_1}, \quad k \in N,$$

$$M_k = \frac{1}{1 - k^2(\omega/\omega_1)^2} - \frac{\beta\omega_2/\omega_1}{(\omega_2/\omega_1)^2 - k^2(\omega/\omega_1)^2}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (15)$$

Учитывая отношения частот ω_1 , ω_2 , ω , заключаем, что коэффициенты уравнения (14), а также произвольные их комбинации являются частотно независимыми функциями параметра α и поэтому могут быть приняты в качестве ВИП.

Рассмотрим в качестве одного из таких индикаторов отношение D_k амплитуды $d_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ k-й гармоники функции (13) к амплитуде $d_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$ его первой гармоники: $D_k = d_k/d_1$.

Имеем

$$d_k = \frac{2}{\pi} \frac{\omega}{\omega_1} \left| M_k \cos \frac{k\pi}{2} \frac{\omega}{\omega_1} \right|, \quad k \in N;$$

$$D_k = \left| \frac{M_k \cos \frac{k\pi(1 - \alpha)}{2 - \alpha}}{M_1 \cos \frac{\pi(1 - \alpha)}{2 - \alpha}} \right|, \quad k \ll N.$$

Аналогично для постоянной составляющей (нулевой гармоники) получаем

$$D_0 = \left| \frac{a_0/2}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} \right| = \left| \frac{M_0}{2M_1 \cos \frac{\pi(1 - \alpha)}{2 - \alpha}} \right|.$$

Графики зависимостей $D_k(\alpha)$ представлены на рис. 2 а, б, из которых видно, что амплитуды нечетных гармоник являются низкочувствительными ВИП.

Роль ВИП может играть также начальная фаза первой гармоники функции (13). Представим первую гармонику $\varphi_1(t) = a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t$ функции (13) в виде $\varphi_1(t) = d_1 \sin(\omega t + \psi)$.

Здесь $\psi = \arctg a_1/b_1$. Имеем

$$\psi = \text{artg} [(1 + \cos \pi\omega/\omega_1)/(\sin \pi\omega/\omega_1)].$$

Используя отношение частот, находим

$$\psi = 0,5\alpha\pi/(2 - \alpha).$$

3. Чувствительности индикаторов повреждения. Для сравнения рассматриваемых ВИП сравним их чувствительности к возникновению повреж-

дения. В основу описания качества индикатора положим характер его поведения в окрестности точки $\alpha_0 = 0$. Определим понятие чувствительности $S(X)$ индикатора X соотношением

$$S(X) = \left. \frac{\partial X}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0}$$

Чувствительности индикаторов удобно находить, пользуясь их разложениями в ряд Маклорена по параметру α . Для амплитудных ВИП имеем

$$D_0(\alpha) = \frac{2}{\pi} \alpha + \dots, \quad D_2(\alpha) = \frac{4}{9\pi} \alpha + \dots, \\ D_k(\alpha) = 0, \quad K = 2n + 1, \quad n \in N.$$

Соответственно

$$S(D_0) = \frac{2}{\pi}, \quad S(D_2) = \frac{4}{9\pi}, \\ S(D_k) = 0, \quad k = 2n + 1, \quad n \in N.$$

Для фазового ВИП

$$\psi(\alpha) = (\pi/4)(\alpha + \dots), \quad S(\psi) = \pi/4.$$

Таким образом, критерии D_0, D_2, ψ следует рассматривать как высокочувствительные, а критерии $D_{2n+1}, n \in N$, — как низкоэффективные. Легко видеть, что критерий постоянной составляющей функции (13) обладает значительно большей чувствительностью, чем критерий амплитуды второй гармоники. Критерий ψ нетрудно свести к временному запаздыванию функции (13) по отношению к своей первой гармонике. Соответствующий временной сдвиг обратно пропорционален частоте и, следовательно, предпочтителен при исследовании степени поврежденности крупногабаритных конструкций, для которых характерны малые частоты собственных колебаний.

4. Изгибные колебания пологой цилиндрической оболочки с одной трещиной. Пусть на наружной поверхности оболочки имеется одна продольная трещина глубиной h_1 , расположенная вдоль координатной линии $s = s_0$. Разобьем оболочку на малые элементы семейством плоскостей $x = \text{const}$. При рассматриваемой форме колебаний смещение w не зависит от значения x . Для каждого из элементов колебания происходят в плоскостях $x = \text{const}$, причем с одинаковыми распределениями амплитуды по координате s . Поэтому достаточно описать движение одного элемента, ограниченного плоскостями $x = x_0$ и $x = x_0 + dx$. Всю оболочку можно представить как набор независимо и синхронно колеблющихся элементов. Полуширину разгрузочной области обозначим через d (рис. 3). Поскольку оболочка является полой, примем, что полуширина разгрузочной области в одном ее элементе при раскрытии трещины равняется полуширине разгрузочной области в стержне. Значения полуширины разгрузочной области в стержне оценены теоретически с использованием коэффициента интенсивности напряжений [3], а также на основании экспериментальных данных [10]. Эти оценки несколько отличаются друг от друга, но приводят к близким значениям величины d .

Вычислим жесткость оболочки на открытом полуцикле. По аналогии с выражениями (1), рассматривая ту же форму колебаний, определим для открытого полуцикла смещение точек срединной поверхности оболочки соотношением

$$w_2 = BY(s)\varphi_2(t). \tag{16}$$

Здесь амплитуда B играет ту же роль для открытого полуцикла, что и амплитуда A в выражении (1) для закрытого. Используя соотношение (3) аналогично (4), получаем

$$P_2 = \frac{ElB^2}{2(1-\mu^2)} \left(\frac{hs_1}{a^2} + \frac{h^3}{12} \frac{k^4}{s_1^3} \right) \varphi_2^2(t) - \Delta\Pi. \tag{17}$$

Здесь $\Delta\Pi$ — энергия, которая была бы локализована в разгрузочной области при отсутствии разгрузки. С учетом размеров $2d \times 1 \times h_1$ и расположения $s = s_0 \pm d$ разгрузочной области на основании выражения (3) при соответствующем изменении пределов интегрирования имеем

$$\Delta\Pi = \frac{E}{2(1-\mu^2)} \iint_{\Delta\Omega} dx ds \int_{h/2-h}^{h/2} (\epsilon_2^2 + z^2 \kappa_2^2) dz, \tag{18}$$

где $\Delta\Omega$ — проекция разгрузочной области на срединную поверхность, ограниченная координатными линиями $x = 0, x = 1, s = s_0 - d, s = s_0 + d$. Используя соотношение (16) при вычислении параметров деформации ϵ_2 и κ_2 , подставим их в выражение (18), а полученное значение $\Delta\Pi$ — в формулу (17). Получаем потенциальную энергию упругой деформации оболочки с трещиной

$$P_2 = \frac{ElB^2}{2(1-\mu^2)} \left\{ \frac{h(s_1 - \alpha J_1)}{a^2} + \frac{h^3}{12} \left[\frac{k^4}{s_1^3} - \alpha(3 - 6\alpha + 4\alpha^2)J_2 \right] \right\} \varphi_2^2(t),$$

где

$$J_1 = \int_{s_0-d}^{s_0+d} Y^2 ds, \quad J_2 = \int_{s_0-d}^{s_0+d} (Y'')^2 ds.$$

Здесь штрихи обозначают дифференцирование по s . Эти интегралы удобно вычислить с помощью замены $y = ks/s$:

$$\frac{J_1}{s_1} = \frac{1}{k} \int_{y_1}^{y_2} [\text{ch } y - \cos y - \sigma(\text{sh } y - \sin y)]^2 dy, \\ s_1^3 J_2 = k^3 \int_{y_1}^{y_2} [\text{ch } y + \cos y - \sigma(\text{sh } y + \sin y)]^2 dy,$$

где $y_{1,2} = ks_0/s_1 \pm kd/s_1$. Соответствующие первообразные равны

$$[\text{ch } y \pm \cos y - \sigma(\text{sh } y \pm \sin y)]^2 dy = \\ = 1/4 \{ (1 + \sigma^2) \text{sh } 2y + (1 - \sigma^2) \sin 2y - 2\sigma(-\text{ch } 2y - \cos 2y) \} \pm \\ \pm (1 + \sigma^2) \sin \text{ch } y \cdot \text{ch } y \pm (1 - \sigma^2) \cos y \cdot \text{sh } y \pm 2\sigma \sin y \cdot \text{sh } y.$$

Кинетическая энергия на открытом полуцикле определяется аналогично выражению (5):

$$T_2 = 0,5phls_1 B^2 \dot{\varphi}_2^2.$$

Составляя уравнение движения, аналогичное уравнению (7), находим жесткость оболочки на открытом полуцикле:

$$K_2 = \frac{E}{\rho(1-\mu^2)} \left\{ \frac{1}{a^2} (1 - \alpha \frac{J_1}{s_1}) + \frac{h^2}{12} \left[\frac{k^4}{s_1^4} - \alpha(3 - 6\alpha^2 + 4\alpha^2) \frac{J_2}{s_1} \right] \right\} \quad (19)$$

Используя формулы (9) и (19), вычислим относительное уменьшение жесткости при раскрытии трещины, в виде

$$\frac{K_1 - K_2}{K_1} = \alpha \frac{\delta^2 \left(\frac{J_1}{s_1} \right) + \frac{q^2}{12} (3 - 6\alpha + 4\alpha^2) s_1^3 J_2}{\delta^2 + \frac{q^2}{12} k^4} \quad (20)$$

Здесь $\delta = s_1/a$ — угол, под которым видна дуга оболочки из ее оси, $q = h/s_1$ — относительная толщина оболочки. Если оболочка достаточно пологая, то уравнение (20) легко преобразовать к виду

$$\frac{K_1 - K_2}{K_1} = \alpha \frac{(3 - 6\alpha + 4\alpha^2) s_1^3 J_2}{k^4}$$

Отсюда имеем

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} = \left[1 - \alpha \frac{(3 - 6\alpha + 4\alpha^2) s_1^3 J_2}{k^4} \right]^{1/2} \approx 1 - \alpha \frac{3s_1^3 J_2}{2k^4}$$

Сопоставляя это соотношение с выражением (10), устанавливаем, что принципиальных различий между случаем поврежденной поверхности и случаем одиночной продольной трещины не имеется. Количественное отличие состоит в том, что при диагностировании одиночной продольной трещины вместо ее относительной глубины α следует использовать величину

$$\alpha' = \alpha \frac{3s_1^3 J_2}{2k^4}$$

При этом соотношения для чувствительностей ВИП, полученные в п. 3, будучи независимыми от глубины трещины, сохраняют свои значения.

5. Изгибные колебания пологой цилиндрической оболочки с одной трещиной. Случай переменных размеров разгрузочной области. Рассмотрим задачу, сформулированную в п. 4. Ограничимся схематическим расчетом, сохраняя только малые порядка α . Кроме того, оболочку будем считать настолько пологой, что энергией растяжения срединной поверхности по сравнению с энергией изгиба можно пренебречь. Зададим функцию прогиба в виде

$$w = Y(s)\Phi(t).$$

Основываясь на этом, вычислим потенциальную энергию оболочки. При использовании выражений (3) и (18) исключим слагаемое ϵ_2^2 . Имеем

$$\Pi = \frac{El\Phi^2}{2(1-\mu^2)} \frac{h^3}{12} \frac{k^4}{s_1^3} - \Delta\Pi,$$

где

$$\Delta\Pi = \frac{El\Phi^2}{2(1-\mu^2)} \frac{h^3}{12} \alpha(3 - 6\alpha + 4\alpha^2) \int_{s_0-d}^{s_0+d} (Y'')^2 ds \quad (21)$$

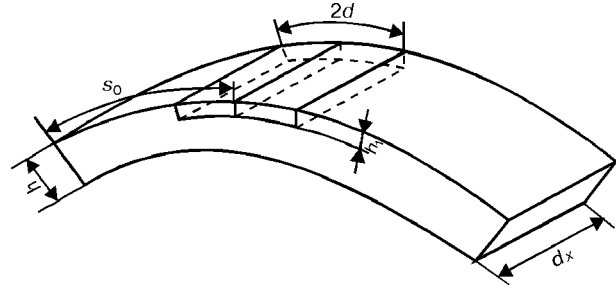


Рис. 3. Разгрузочная область в малом элементе оболочки.

Будем считать, что в случае неглубоких трещин мгновенное значение размера разгрузочной области, формируемой вокруг трещины, пропорционально смещению w_0 точки срединной поверхности с координатой $s = s_0$ в момент времени t :

$$d = Hw_0 = HY(S_0)\Phi(t).$$

Пусть колебания оболочки являются малыми. Вместе с ними мала и величина d . Учитывая небольшую скорость изменения функции $(Y'')^2$, положим

$$\int_{s_0-d}^{s_0+d} (Y'')^2 ds \approx (Y''(s_0))^2 2d = H_1 \Phi,$$

где $H_1 = 2HY(s_0)(Y''(s_0))^2$. Пренебрегая слагаемым $(-6\alpha + 4\alpha^2)$ в формуле (21), для потенциальной энергии получаем

$$\Pi = \frac{El}{2(1-\mu^2)} \frac{h^3}{12} \left[\frac{k^4}{s_1^3} \Phi^2 - 3\alpha H_1 \Phi^3 \right]$$

Кинетическая энергия на открытом полуцикле определяется аналогично выражению (5):

$$T = 0,5\rho h l s_1 \dot{\Phi}^2.$$

Составим уравнение движения, аналогичное (6):

$$\ddot{\Phi} + K\Phi - K\gamma\Phi^2 = 0. \quad (22)$$

Здесь

$$K = \frac{E}{\rho(1-\mu^2)} \frac{h^3}{12} \frac{k^4}{s_1^3}, \quad \gamma = \alpha \frac{9H_1 s_1^3}{2k^4}.$$

Уравнение (22) преобразуем к виду

$$\ddot{\Phi} + K^*\Phi = 0,$$

где $K^* = K(1 - \gamma\Phi)$. Полученное уравнение формально совпадает с уравнением (8), однако в этом случае роль жесткости играет переменная величина K^* , линейно уменьшающаяся с ростом смещения. Уравнение (22) применимо только к открытому полуциклу. Для закрытого жесткость сохраняет значение $K = K^*(0)$. Таким образом, характеристику восстанавливающей силы следует считать кусочной линейно-квадратичной функцией смещения. Решение уравнения свободных колебаний упругого тела с жесткостью, линейно изменяющейся на одном из полуциклов и постоянной на другом полуцикле, по-

лучено в [11] численно и аналитически методом последовательных приближений.

Основным результатом этой работы является установление неизохронности рассматриваемых колебаний, то есть зависимости их частоты от амплитуды. Это явление не обнаруживается в системах с кусочно-линейной ХВС, поскольку коэффициенты Фурье-функции (13) оказываются амплитудно независимыми. Таким образом, учет «дыхания» размеров разгрузочной области приводит к качественно новым индикаторам повреждения, основанным на зависимости количественных характеристик колебаний от амплитуд полуциклов. В частности, в работе [11] показано, что скорость роста отношения амплитуд открытого и закрытого полуциклов по мере роста амплитуды открытого полуцикла равна $\gamma/3$. Другой способ определения степени поврежденности состоит в измерении увеличения относительного падения частоты, происходящего по мере роста амплитуды свободных колебаний. Параметр γ , а вместе с ним и степень поврежденности определяют из градуировочной кривой [11]. Эти индикаторы (скорость роста отношения амплитуд и увеличения относительного падения частоты) в принципе не могут быть получены на основании результатов работ [2, 4, 6, 10], поскольку все эти результаты ограничены рамками модели кусочно-линейной ХВС.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены свободные колебания поврежденной пологой цилиндрической оболочки. В рамках модели кусочно-линейной характеристики восстанавливающей силы исследованы случаи полностью поврежденного поверхностного слоя и одиночной продольной «дышащей» трещины. Установлено качественное совпадение этих случаев.

2. Вычислены чувствительности индикаторов повреждения. Наиболее чувствительны постоянная составляющая, амплитуда второй гармоники и на-

чальная фаза первой гармоники функции смещения.

3. Предложена кусочная линейно-квадратичная модель характеристики восстанавливающей силы, описывающая неизохронность колебаний. Выявлены индикаторы повреждения, основанные на зависимости характеристик свободных колебаний от их амплитуды.

1. *Ройтман А. Б., Пылов А. А., Александрова Н. Б.* Продольные колебания консольного стержня с поперечной трещиной. Сообщение 1. Малые колебания // Пробл. прочности. — 1999. — № 2. — С. 23–34.
2. *Матвеев В. В., Бовсуновский А. П.* Некоторые аспекты колебаний упругого тела с «дышащей» несплошностью материала // Там же. — 2000. — № 5. — С. 44–60.
3. *Матвеев В. В., Бовсуновский А. П.* К определению вибрационных характеристик стержня с закрывающейся трещиной при изгибных колебаниях // Там же. — № 3. — С. 5–23.
4. *Бовсуновский А. П.* К вопросу об определении собственной частоты поперечных и продольных колебаний стержня с трещиной. Сообщение 1. Аналитический подход // Там же. — 1999. — № 2. — С. 35–44.
5. *Вибрации в технике.* Справочник. В 6 т. — Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И. Блехмана. — М.: Машиностроение, 1979. — 351 с.
6. *Матвеев В. В.* К анализу эффективности метода спектральной вибродиагностики усталостного повреждения элементов конструкций. Сообщение 1. Продольные колебания, аналитическое решение // Пробл. прочности. — 1997. — № 6. — С. 5–20.
7. *Гонткевич В. С.* Собственные колебания пластинок и оболочек. — Киев: Наук. думка, 1964. — 288 с.
8. *Филип А. П.* Элементы теории оболочек. — Л.: Стройиздат, 1987. — 383 с.
9. *Надежность и ресурс авиационных газотурбинных двигателей* / Под ред. И. А. Биргера. — М.: Машиностроение, 1969. — 539 с.
10. *Бовсуновский А. П.* К вопросу об определении собственной частоты поперечных и продольных колебаний стержня с трещиной. Сообщение 2. Результаты эксперимента и расчета // Пробл. прочности. — 1999. — № 3. — С. 45–53.
11. *Антилогов Д. И.* Свободные колебания упругого тела с линейно изменяющейся жесткостью // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — 2000. — № 2. — С. 83–87.

Запорож. гос. ун-т,
Запорож. гос. техн. ун-т

Поступила в редакцию
04.04.2001

МЕТОДОЛОГИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ

А. М. МАКОВСКИЙ

Методологические основы технической диагностики машин изложены в ряде работ, в том числе в справочной литературе [1]. Применяющаяся в настоящее время методика диагностирования кранов [2] пока не отвечает такой методологии и имеет ряд недостатков, которые, на наш взгляд, сводятся к следующему:

определяемые при обследовании технические состояния крана не классифицируются в соответствии со стандартными положениями по технической диагностике и надежности машин [3, 4];

результатами диагностирования крана не обобщается возможность его дальнейшего использования по назначению;

в существующей системе диагностирования не используются возможности новой (введенной с 1985 г.) классификации грузоподъемных кранов и крановых механизмов по режимам работы [5]. Новая классификация позволяет контролировать остаточный режимный ресурс крана.

Предлагаемая методология позволяет в определенной мере исключить указанные выше недостатки системы диагностирования кранов.

Классы технического состояния грузоподъемных кранов. Множество технических состояний крана E можно разделить элементарными проверками разной глубины диагностического поиска на подмножества E_k , т. е. на следующие классы:

правильного функционирования $E_{k1} = k1$;

работоспособности $E_{k2} = k2$;

исправности $E_{k3} = k3$;

пригодности $E_{k4} = k4$.

Последний разделяем на два подкласса пригодности крана:

по режимному ресурсу $pk4-1$;

по физическому состоянию конструкций $pk4-2$.

Примем обозначения: λ — количество классов состояния крана, $\lambda = 4$; i — отдельный класс; $1 \leq i \leq \lambda$; π — проверка; k — количество заданных проверок на объекте; j — порядковый номер проверки; π_j — осуществляемая проверка из общего числа k ; R_j^i — заданное значение результата проверки π_j для отнесения объекта к i -му классу; a_j — общее число возможных результатов проверки π_j ; u — порядковый номер полученного результата ($u = 1, 2, \dots, a_j$); R_{ju} — результат с порядковым номером u по проверке π_j .

Условие принадлежности технического состояния крана к i -му классу состояния по j -й проверке и ее u -му результату:

$$R_{ju} = R_j^i.$$

Схема, по которой осуществляется поиск класса технического состояния крана, может быть пред-

ставлена в виде табл. 1. Используемые в таблице единицы отвечают такому результату проверки, который позволяет отнести техническое состояние объекта к данному классу.

Содержание проверок при отнесении состояния крана к одному из классов должно отвечать следующим основным требованиям.

Класс к1 — правильное функционирование крана. Проверки устанавливают соответствие кинематических параметров крановых механизмов паспортным и надежность срабатывания ограничительных устройств.

В содержание проверок могут быть включены в основном мероприятия динамических испытаний кранов, выполняемые в соответствии с требованиями Правил устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов [6].

Класс к2 — работоспособность крана. Проверки направлены на испытания крана под нагрузкой и устанавливают его прочностные характеристики.

Содержание проверок в основном отвечает требованиям [6] по выполнению статических испытаний крана при его полном техническом освидетельствовании.

Таблица 1. Схема поиска класса технического состояния крана

Проверка на класс		Классы			
Класс	Проверка	к1	к2	к3	к4
к1	π_1	1	—	—	—
	—	—	—
	π_{k1}	1	—	—	—
к2	π_1	1	—	—	—
	—	—	—
	π_{k1}	1	1...1	—	—
	...	—		—	—
π_{k2}	—	1	—	—	
к3	π_1	1	—	—	—
	—	—	—
	π_{k1}	1	1...1	—	—
	...	—		—	—
	π_{k2}	—	1	1...1	—
	...	—	—		1
π_{k3}	—	—	1	—	
к4	π_1	1	—	—	—
	—	—	—
	π_{k1}	1	1...1	—	—
	...	—		—	—
	π_{k2}	—	1	1...1	—
	...	—	—		1
	π_{k3}	—	—	1	1...1
	...	—	—	—	
π_{k4}	—	—	—	1	

Таблица 2. Модели структурных составляющих систем диагностирования грузоподъемных кранов

Структурная составляющая системы	Вид диагностики				
	д-к1	д-к2	д-к3	д-пк4-1	д-пк4-2
Модель объекта	кинематические схемы крана	схема нагружения крана	уровневая иерархическая	грузовой поток крана	уровневая иерархическая
Контролируемые технические параметры	кинематические параметры механизма	статическая прочность конструкций	прочностные характеристики деталей	циклическая прочность конструкций	характеристики предельных состояний
Модель диагностических признаков	список физических величин	список физических величин	дефекты и повреждения деталей	список нагрузок и циклов нагружений	пределные повреждения
Технические средства диагностирования и методы контроля	средства технического контроля	приборы и средства технического контроля	методы неразрушающего контроля	средства учета и встроенный контроль	неразрушающий и разрушающий контроль
Модель обработки данных	табличная форма результатов	табличная форма результатов	матрица состояния объекта	расчет ресурса крана	матрица состояния объекта
Меры при отрицательном результате	наладка (ремонт)	выполнение д-к3	Ремонт	выполнение д-пк4-2	списание крана

Класс к3 — исправность крана. Проверки включают контроль технического состояния всех конструктивных элементов крана, ответственных за его работоспособность, а также вспомогательных конструкций, состояние которых регламентируется [6].

Класс к4 — пригодность крана. Проверки на пригодность выполняются в соответствии с требованиями [6] по осуществлению контроля за расчетным сроком службы грузоподъемного устройства (**нормативным сроком службы**) и своевременным выводом его из эксплуатации по причине безопасности.

Подклассы к4 определяются двумя разными по характеру элементарными проверками. Подкласс физического состояния конструкции контролируется проверкой, используемой для выявления классов к1, к2 и к3, но с наибольшей глубиной диагностического поиска. Подкласс режимного ресурса крана проверяется по отдельной методике анализа режимов нагружения крана за отмеченный период времени.

Подкласс пк4-1 — пригодность крана по режимному ресурсу. **Режимный ресурс крана есть наработка, сверяемая с его стандартной наработкой в соответствии с паспортной режимной группой.**

Проверка устанавливает отработанный режимный ресурс крана (расчетный срок службы). Ее результаты могут служить основанием для назначения фактического (уточненного расчетного) **срока службы** крана и выполнения (или отмены) проверок по следующему подклассу пк4-2.

Подкласс пк4-2 — пригодность крана по физическому состоянию конструкций. Проверка устанавливает предельное состояние конструкций крана или отдельных его невосстанавливаемых частей, влекущее к выводу крана из эксплуатации (списанию крана).

Виды технической диагностики грузоподъемных кранов. Вид технической диагностики для крана назначается в зависимости от класса (подкласса) технического состояния, к которому требуется от-

нести кран в результате диагностирования. Для выделенных классов с учетом подклассов можно применить следующие виды диагностики:

- общепараметрическая функциональная для класса к1 (д-к1);
 - общепараметрическая тестовая для класса к2 (д-к2);
 - детальная для класса к3 (д-к3);
 - общепараметрическая функциональная для подкласса пк4-1 (д-пк4-1);
 - детальная для подкласса пк4-2 (д-пк4-2);
- Указанный вид диагностики осуществляется проверками, которые выполняются дополнительно по данному классу без учета проверки предыдущих классов. Например, общепараметрическая тестовая диагностика д-к2 выполняется только по проверкам $\pi_{к1} \dots \pi_{к2}$, а детальная диагностика д-к3 — по проверкам $\pi_{к2} \dots \pi_{к3}$ и т. д.

Структурные составляющие системы [2] каждого вида диагностики имеют свои модели, которые приведены в табл. 2.

1. *Надежность и эффективность в технике*. Справочник. Т. 9. Техническая диагностика / Под общей ред. В. В. Клюева, П. П. Пархоменко. — М.: Машиностроение, 1987. — 352 с.
2. *Сборник методических указаний по оценке технического состояния грузоподъемных кранов*. — Харьков. — 1995: РД-001.00.95. Оценка технического состояния; РД-001.01.95. Методические указания по оценке технического состояния мостовых, козловых и специальных кранов; РД-001.02.95. Методические указания по оценке технического состояния стреловых самоходных кранов общего назначения; РД-001.03.95. Методические указания по оценке технического состояния порталных кранов; РД-001.04.95. Методические указания по оценке технического состояния башенных кранов.
3. *ГОСТ 27.002-86*. Надежность в технике. Термины и определения.
4. *ГОСТ 20911-89*. Техническая диагностика. Термины и определения.
5. *ИСО 4301/1*. Краны и подъемные устройства. Классификация. Общие положения.
6. *Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов* / Госкомохрантруда Украины. — Киев, Харьков, 1994. — 267 с.

НОВЫЕ ПРИЗНАКИ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРЕОБРАЗОВАНИИ ФУРЬЕ, ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

Л. М. ГЕЛЬМАН, Л. Н. УДОВЕНКО

Для технической диагностики на основе одно- и многомерного преобразований Фурье сигналов часто в качестве диагностических признаков используют составляющие либо спектральной плотности [1, 2] мощности, либо фазы преобразования Фурье [3, 4]. Оба подхода эвристически не следуют из критериев оптимальности.

В работе [5] нами предложен универсальный оптимальный подход к использованию одно- и многомерного преобразований Фурье для технической диагностики, заключающийся в использовании двумерного вектора признаков с компонентами $S_R(\omega)$, $S_I(\omega)$ (соответственно действительная и мнимая составляющие преобразования Фурье). В этой работе показано, что диагностика на основании составляющей спектральной плотности мощности и фазы преобразования Фурье базируется на нелинейных преобразованиях упомянутых выше признаков.

Поэтому применение спектральной плотности мощности или фазы преобразования Фурье не является оптимальным и представляет собой частный эвристический (неуниверсальный) подход к использованию такого преобразования для технической диагностики, поэтому целесообразно использовать предложенные в [5] диагностические признаки: действительную и мнимую составляющие преобразования Фурье.

Цель данной работы состоит в том, чтобы с помощью численного моделирования экспериментально оценить выигрыш в эффективности диагностики при использовании оптимального преобразования по сравнению с неоптимальным.

Численное моделирование. Для получения оценки выигрыша оптимального подхода, предложенного в работе [5], по сравнению с неоптимальным подходом рассмотрим двухклассовую акустическую диагностику на основе одномерного преобразования Фурье. Информативным сигналом является случайный акустический стационарный гауссов центрированный сигнал с центральной частотой ω_x : гипотеза H_0 при отсутствии и H_1 при наличии дефекта (дисперсия сигнала σ_x^2 соответственно σ_0^2 и σ_1^2).

Формирование стационарного гауссового центрированного узкополосного сигнала с центральной частотой ω_x осуществлялось с помощью программного продукта SIMULINK 3.0. Оценки спектральной плотности мощности гауссового центрированного сигнала, ее мнимых и действительных составляющих, отношения правдоподобия и их условных плотностей вероятностей, а также соответствующих условных математических ожиданий и дисперсий получены с помощью системы MATLAB 5.3.

© Л. М. Гельман, Л. Н. Удовенко, 2001

При моделировании использовались следующие параметры:

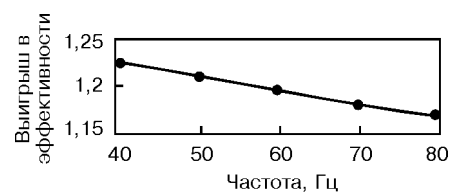
- 1) частота дискретизации сигнала при моделировании 1000 Гц;
- 2) длина обрабатываемого сигнала 0,512 с;
- 3) гауссовские сигналы формировались на центральных частотах $\omega_x = 40, 50, 60, 70$ и 80 Гц;
- 4) для каждой из центральных частот ω_x по результатам 1000 экспериментов производились оценки спектральной плотности мощности, мнимой и действительной составляющих преобразования Фурье, плотности вероятности, отношения правдоподобия и их условных математических ожиданий и дисперсий для гипотез H_0 и H_1 ;
- 5) оценка выигрыша эффективности диагностики производилась путем вычисления критерия Фишера для оптимального и неоптимального преобразований и последующего сравнения полученных значений для каждого из исходных сигналов.

Полученные результаты представлены на рисунке. Очевидно, что использование новых признаков увеличивает эффективность диагностики.

ВЫВОДЫ

Путем численного моделирования подтверждена целесообразность использования предложенного в [5] нового универсального оптимального подхода к использованию одно- и многомерного преобразования Фурье для технической диагностики. При этом в качестве диагностических признаков используются действительная и мнимая компоненты преобразования Фурье.

С помощью критерия Фишера показано, что предложенный подход по сравнению с подходом, основанным на использовании в качестве признака составляющей спектральной плотности мощности, обеспечивает выигрыш в эффективности диагностики. Предложенный подход целесообразно ис-



пользоваться для диагностики при использовании оптимального преобразования по сравнению с неоптимальным.

пользовать при виброакустической диагностике усталостных трещин.

1. *Матвеев В. В.* К анализу эффективности метода спектральной вибродиагностики усталостного повреждения элементов конструкций. Сообщение 2. Изгибные колебания, аналитическое решение // Проблемы прочности. — 1998. — № 6. — С. 23–35.
2. *Ройтман А. Б., Пылов А. А., Александрова Н. Б.* Продольные колебания консольного стержня с поперечной трещи-

ной. Сообщение 1. Малые колебания // Пробл. прочности. — 1999. — № 2. — С.

3. *Application of Digital signal processing to audio and acoustics 1998* / Ed. M. Kahrs, K. Brandenburg. — Boston: Kluwer Academic Publishers.
4. *J. M. H. Du.* Buf gabor phase in texture discrimination signal processing, 1990. — 21, № 3. — P. 221–240.
5. *Гельман Л. М., Удовенко Л. Н.* Оптимальное использование преобразования Фурье для технической диагностики // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 4. — С. 13–16.

Нац. техн. ун-т Украины «КПИ»,
Киев

Поступила в редакцию
24.03.2001

18–21 МАРТА 2002 г.

г. МОСКВА

**3-я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«КОМПЬЮТЕРНЫЕ МЕТОДЫ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ
В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ И ДИАГНОСТИКЕ»**

**Место проведения: 119048, Москва, Хамовнический вал, 34, гостиница «Юность»,
(метро «Спортивная»)**

ЗАДАЧИ КОНФЕРЕНЦИИ

Две предыдущие конференции были проведены в Минске (Беларусь) в 1995 и 1998 гг. и привлекли более 200 участников из 15 стран. Обе конференции показали большой интерес к обсуждаемым проблемам.

На конференции будут рассмотрены математические основы и прикладные аспекты моделирования, компьютерных технологий и аналитических методов, разработанных применительно к НК, ТД, визуализации медицинской и биологической информации и мониторингу. Особый интерес будет обращен на обратные математические задачи, привлекающие в последнее время все большее внимание наряду с методами реконструкции данных и изображений и характерные для них способы и средства сбора информации.

Одна из основных целей конференции состоит в оценке современного состояния предмета и стимулировании обмена мнениями между экспертами на международном уровне. Будут представлены устные сообщения на секциях.

ОСНОВНАЯ ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ:

- Моделирование физических процессов в НК;
- Вычислительная диагностика;
- Фундаментальные проблемы реконструкции и восстановления в НК;
- Моделирование технологий НК;
- Моделирование для НК в производственных процессах и в эксплуатации;
- Обратные задачи компьютерной томографии;
- Обратные задачи электромагнитной дефектоскопии;
- Обратные задачи в тепловом и оптическом контроле;
- Повышение достоверности обнаружения противопехотных мин;
- Вычислительные алгоритмы, обработка сигналов и изображений;
- Обратные задачи акустического контроля.

НА КОНФЕРЕНЦИИ ПРЕДУСМАТРИВАЕТСЯ

- Выступление с докладами
- Дискуссии за круглым столом
- Издание тезисов докладов

Заявку на участие следует направлять по адресу:

119048, Москва, ул. Усачева, 35, стр. 1, РОНКТД

E-mail: market@spektr-msia.ra, spektr@co.ru

Факс: (095) 246-88-88

Тел.: (095) 926-53-16, 245-56-56, 245-57-68

ДЕТЕКТОРЫ СЦИНТИЛЛЯТОР – ФОТОДИОД ДЛЯ ИНСПЕКЦИОННЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ИНТРОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**В. Д. РЫЖИКОВ, Н. Г. СТАРЖИНСКИЙ, Д. Н. КОЗИН, Л. П. ГАЛЬЧИНЕЦКИЙ,
Е. К. ЛИСЕЦКАЯ, В. М. СВИЦ, А. Д. ОПОЛИН**

В настоящее время актуальным является вопрос разделения в контролируемом объекте материалов, существенно отличающихся по плотности и атомному номеру. В медицине это позволяет провести отдельный диагноз состояния костной структуры и мышечной ткани. В таможенной технике выдвигается требование определения опасных и запрещенных для массового пользователя материалов — взрывчатки, наркотиков — на фоне металлических изделий. Выделение органики на фоне более плотных структур реализуется с использованием двухэнергетических детекторов. Пример построения такого детектора приведен в классическом обзоре [1] и представлен на рис. 1.

Качество материала как высоко- (ВД) так и низкоэнергетического (НД) детектора является определяющим для решения задачи выявления органики на фоне и наряду с присутствием неорганических материалов. Традиционные сцинтилляторы (СЦ) CsI(Tl) и CdWO₄ обеспечивают требуемые параметры ВД, причем выбор сцинтиллятора зависит от используемой энергии рентгеновского источника и требований к инерционности сцинтиллятора. Ситуация с НД сложнее. Детектор должен эффективно регистрировать низкоэнергетическое (20...40 кэВ) излучение, но быть прозрачным для высокоэнергетического (до 80...160 кэВ и более), т. е. иметь низкие плотность, атомный номер, но высокий световыход. Традиционные для регистрации «мягких» излучений пластмассовые сцинтилляторы имеют низкий световыход — единицы процентов от CsI(Tl). Описанные в работе [1] экраны оксисульфида гадолиния и иттрия имеют световыход выше, чем у пластмассы, но существенно ниже, чем у CsI(Tl). Другими их недостатками являются низкая прозрачность и инерционность.

Важнейшей характеристикой рентгеновских цифровых радиографов является пространственное разрешение. Из общих соображений разрешающая способность прибора соизмерима с апертурой детектора. В стандартной ситуации повышение пространственной чувствительности детектора выполняется путем уменьшения шага между детекторами. Технология получения современных фотодиодов (ФД) позволяет получать фотоплощадки размером около 10 мкм. Однако реальная технология сборки дискретных детекторов ограничивает размер одного кристаллического элемента толщиной 0,5...0,6 мм — ниже этого уровня изготовление и сборка элементов затруднительна. В этом случае неизбежно использование одной кристаллической пластинки на фотодиодную матрицу. При этом одной пробле-

мой является взаимное влияние каналов, другой — необходимость использования большого числа усилителей, коммутированных на ряд элементов фотодиодной матрицы, что приводит к громоздкости первично-преобразовательного блока.

Целью данной работы являлась разработка сцинтилляторов, практически не уступающих традиционным CsI(Tl) по световыходу и имеющих меньший уровень послесвечения и относительно низкий атомный номер, создание на их основе НД и ВД, а также детекторов с коммутатором, усилителем и преобразователем в одном корпусе.

В качестве сцинтилляторов исследовались разработанные в Институте монокристаллов и, по нашим данным, не имеющие мировых аналогов сцинтилляторы на основе кристаллов ZnSe(Te).

Теоретическая часть. Теоретическая оценка чувствительности НД и ВД после активного фильтра в виде НД, проведена нами на основании выражения [2] для относительной чувствительности инспекционной системы

$$(\delta/d)_v \approx \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^n A_i e^{-\frac{\delta}{V Q_i}}} \frac{\Delta S}{S} \frac{\int_0^{h\nu_{\max}} \alpha(h\nu) e^{-\mu_{eq}(h\nu)d_{eq}} B(h\nu) d(h\nu)}{\int_0^{h\nu_{\max}} G(h\nu) \alpha(h\nu) e^{-\mu_{eq}(h\nu)d_{eq}} \mu(h\nu) d(h\nu)} \quad (1)$$

Здесь A_i — вклад каждой компоненты высвечивания рентгенолюминесценции СЦ; d — диаметр проволоочки, см; Q_i — экспоненциальные компоненты высвечивания рентгенолюминесценции СЦ, с; d, d_{eq} — соответственно толщина объекта фона и фона с всевозможными фильтрами, см; V — скорость движения объекта, см/с; $\alpha(h\nu)$ — дозовый вклад данной энергии в спектре рентгеновского излучения; $\mu_{eq}(h\nu), \mu(h\nu)$ — линейные коэффициен-

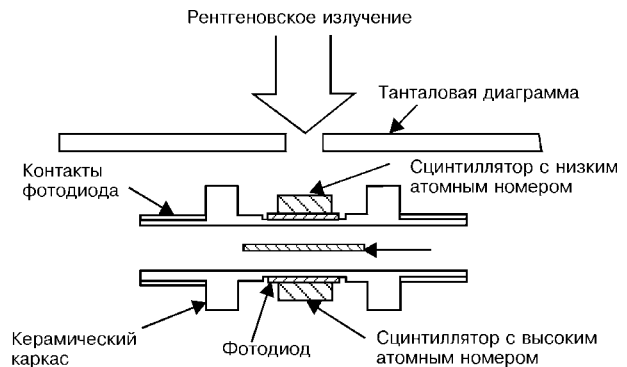


Рис. 1. Детекторная система двухэнергетического радиографа.

ты ослабления объекта со всевозможными фильтрами и фонового объекта; $B(h\nu)$ — фактор поглощения рассеянного излучения объекта; $\Delta S/S$ — пороговый контраст системы; $G(h\nu)$ — функция контрастности. Последнюю можно оценить как:

$$G(h\nu) \sim \frac{\Delta C}{\Delta P} = 0,6875 \cdot 10^5 \frac{1 - e^{\mu_{sc}(h\nu)h_{sc}}}{\gamma_a(h\nu)} \frac{\gamma_{sc}(h\nu)}{\mu_{sc}(h\nu)} \eta_{sc} R_{light} K_{sc} \eta_{PD}, \quad (2)$$

где $\Delta C/\Delta P$ — радиационное приращение сигнала детектора; $\mu_{sc}(h\nu)$ — линейный коэффициент ослабления СЦ, см^{-1} ; $\gamma_{sc}(h\nu)\gamma_a(h\nu)$ — линейные коэффициенты электронного преобразования СЦ и воздуха, см^{-1} ; R_{light} — коэффициент светособирания в СЦ на ФД; K_{sc} — коэффициент спектрального согласования спектра излучения СЦ и чувствительности ФД; η_{sc} — конверсионная эффективность СЦ; η_{PD} — эффективность преобразования ФД.

Пороговый контраст системы $\Delta S/S$ определяется шумами детекторов и разрядностью АЦП, поскольку цветное и тоновое разделение сигналов, получаемое на экране монитора, имеет гораздо больший диапазон при восприятии оптического разделения глазом человека.

Расчетные и практические результаты. 1. Детекторы для двухэнергетической интроскопической системы. Для расчета была использована стандартная геометрия НД и ВД на основе ZnSe(Te) и CsI(Tl), выпускаемых нами для инспекционных систем таможенного контроля (табл. 1) и характе-

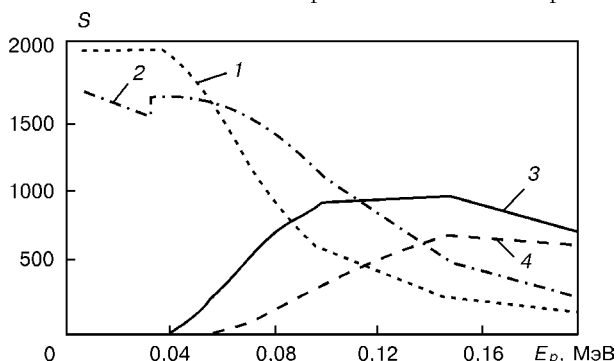


Рис. 2. Энергетическая зависимость чувствительности детекторов в двухэнергетической системе при различных комбинациях сцинтилляторов: 1 — НД (ZnSe(Te)); 2 — НД (CsI(Tl)); 3 — ВД (CsI(Tl) — НД (ZnSe(Te))); 4 — ВД (CsI(Tl) — НД (CsI(Tl))).

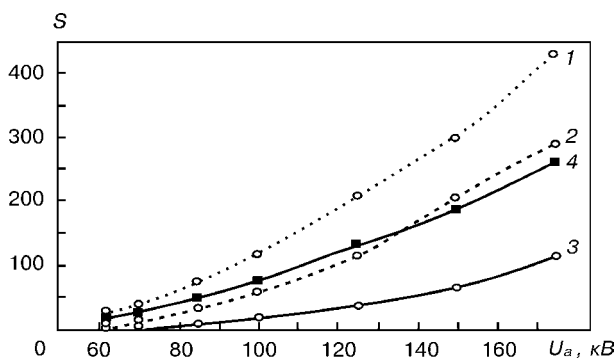


Рис. 3. Выходной сигнал ВД с активным фильтром НД с различными комбинациями СЦ для разных напряжений на трубке: 1 — ВД (CsI(Tl)); 2 — ВД (CsI(Tl)) — НД (ZnSe(Te)); 3 — ВД (CsI(Tl) — НД (CsI(Tl))); 4 — ВД (ZnSe(Te)).

Таблица 1. Геометрия НД и ВД

Параметр	Значение параметра
Количество каналов	16
Общая длина, мм	27,2
Размеры фоточувствительной площадки ФД, мм	1,4×4
Зазор между фотоплощадками, мм	0,25
Шаг детектора, мм	1,65
Размеры кристаллического элемента:	
ВД	1,4×4×4
НД	1,4×4×0,7

Таблица 2. Характеристики сцинтилляторов для системы сцинтиллятор — фотодиод

Параметр	ZnSe(Te)	CsI(Tl)
Конверсионная эффективность	19,4	15
Время высвечивания τ , мкс	5...7	1
Плотность, г/см ³	5,4	4,5
Эффективный атомный номер, $Z_{эфф}$	33	52
Максимум высвечивания λ_m при 300 К, нм	610	570
Послесвечение (через 10 мс), %	0,05	1...8
Коэффициент поглощения λ_m , см^{-1}	0,1...0,3	0,05
Коэффициент преломления для λ_m	2,4	1,79
Предел радиационной стойкости, Рад	10 ⁸	10 ⁴
Коэффициент спектрального согласования Si-ФД с СЦ K_{SC}	0,49	0,34
Чувствительность, нА·мин/(Р·см ²):		
НД	60...90	60...90
ВД	60...100	100...130

ристики сцинтилляторов (табл. 2) [3]. Результаты расчета чувствительности НД на основе CsI(Tl) и ZnSe(Te), а также комбинации этих материалов для ВД и НД систем, где в качестве активного фильтра использован один из этих материалов, приведены на рис. 2. Выходной сигнал ВД с активным фильтром НД в различных комбинациях для разных напряжений на трубке представлен на рис. 3.

Из расчетных данных следует, что НД на основе ZnSe(Te) до энергии 50 кэВ по чувствительности превосходят CsI(Tl), а ВД на основе CsI(Tl) на 30...80 % превосходят ZnSe(Te) в диапазоне 80...200 кэВ. Эксперимент показал, что чувствительность ВД на основе CsI(Tl) в указанном диапазоне около 100 нА·мин/(Р·см²), а у ZnSe(Te) 60...80 нА·мин/(Р·см²). Для НД картина обратная, что коррелирует с расчетными данными.

Инерционность кристаллов CsI(Te) ограничивает его применение в быстродействующих интроскопических системах даже в ВД. Согласно выражению (1) уже при скорости движения объекта $V = 100 \text{ см/с}$ для проволоки диаметром $d = 0,1 \text{ мм}$ относительная чувствительность системы падает в 1,5 раза для детекторов с кристаллами CsI(Te) и в 1,2 раза с ZnSe(Te). А при скоростях объекта $V > 200 \text{ см/с}$ ВД на ZnSe(Te) превосходят ВД на CsI(Te).

2. Увеличение пространственного разрешения. Увеличение пространственного разрешения рентгеновских цифровых радиографов возможно двумя способами:

1). Использование нестандартных условий эксперимента с применением законов геометрической оптики. Нами достигнуто достаточно высокое — десятки мкм — разрешение даже при использовании стандартного детектора с апертурой 1,65 мм (рис. 4).

Таблица 3. Характеристики таможенной инспекционной рентгеновской системы «Полискан-4»

Параметр	Значение параметра
Проникающая способность по стали	до 25 мм
Контрастная чувствительность	до 20 градаций серого цвета
Обнаруживающая способность	медная проволочка 0,1 мм
Число каналов системы детектирования	864
Скорость транспортера	0,2 м/сек
Размер тоннеля	700×950 мм
Масса контролируемого объекта	100 кг
Анодное напряжение излучателя	140 кВ
Анодный ток излучателя	1 мА
Уровень рентгеновского излучения на внешней поверхности аппарата	до 0,1 мР/ч
Размер контролируемого объекта	до 3500×1650×1550 мм

2). Уменьшение шага детектора. В рамках проекта, финансируемого INTAS-94-3341, нами изготовлены и исследованы детекторы СЦ-ФД с толщиной СЦ 0,5 мм и шагом 0,8 мм на базе 32-хканального ФД с коммутатором, усилителем и преобразователем на одной подложке. Вследствие этого на весь 32-канальный модуль необходим только один усилитель. Создана экспериментальная установка и получено контрольное изображение для 128- и 256-канальной сборки из этих элементов (рис. 5).

Чувствительность этих детекторов составляет 1740 нА·мин/(Р·см²) для времени накопления 10 мс. Установка позволяет изменять время накопления, при этом пропорционально повышается чувствительность детектора.

Обсуждение. 1. Высокая квантовая эффективность $\eta = 0,194$ у ZnSe(Te), лучшее чем у CsI(Tl), спектральное согласование с Si-фотодиодом, присутствие К-скачка у CsI(Tl) при $E_p \approx 33$ кэВ приводят к превосходству по чувствительности НД на ZnSe(Te) до $E_p = 50$ кэВ.

2. Малый эффективный атомный номер ZnSe(Te) $Z_{эф} = 33$, обеспечивающий при толщине сцинтиллятора $d_{сц} = 0,6$ мм хорошую проникаемость для энергии больше $E_p = 50$ кэВ, позволяет получить большую, чем при использовании CsI(Tl), интенсивность ионизирующего излучения в нужном спектральном диапазоне на ВД.

3. Низкая по сравнению с ВД на CsI(Tl) чувствительность ВД на ZnSe(Te) связана с худшей прозрачностью к собственному излучению селенида цинка (0,1 см⁻¹), что снижает чувствительность при увеличении толщины СЦ более чем на 1...2 мм.

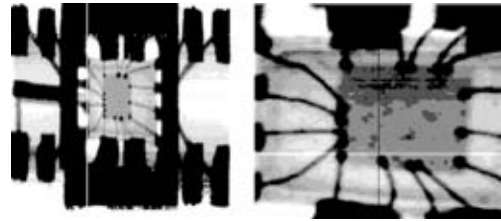


Рис. 4. Внутренняя разводка от полупроводникового кристалла в микросхеме серии КМ.

4. При использовании высокой скорости перемещения объекта $V > 200$ см/с наиболее эффективная система НД (ZnSe(Te)) – ВД (CsI(Tl)) будет уступать по чувствительности системе НД (ZnSe(Te)) – ВД (ZnSe(Te)) вследствие большой инерционности CsI(Tl). Наличие у CsI(Tl) составляющих с большими временами высвечивания $\tau \approx 50$ мс при времени высвечивания основной части энергии за $t_{высв} < 1$ мкс (у ZnSe(Te) $t_{высв} = 5...7$ мкс), сравнимых с временем перемещения объекта, приводит к уменьшению чувствительности радиографической системы по толщине объекта.

5. На системе НД (ZnSe(Te)) – ВД (ZnSe(Te)) была построена таможенная инспекционная рентгеновская система с характеристиками, приведенными в табл. 3. Реальное изображение с использованием НД – ВД (СЦ ZnSe(Te)), позволяющее разделять органику от неорганики [4], представлено на рис. 6.

6. Высокая чувствительность детекторов с внутренней коммутацией и усилением, а также полученное на них пространственное разрешение 1,5 пар. линий/мм позволяют утверждать о возможности создания детекторов с шагом менее 0,8 мм.

ВЫВОДЫ

1. По динамическим характеристикам радиационной стойкости ($10^7...10^8$ Рад), энергетическому спектру, чувствительности и проникаемости для рентгеновского излучения лучшим СЦ для НД является ZnSe(Te).

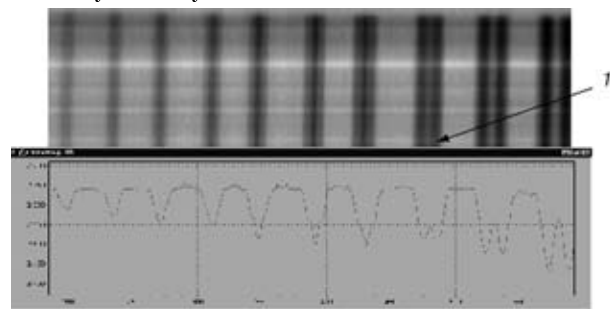


Рис. 5. Контрольное изображение по эталону (толщина проволочки $d = 0,8$ мм).

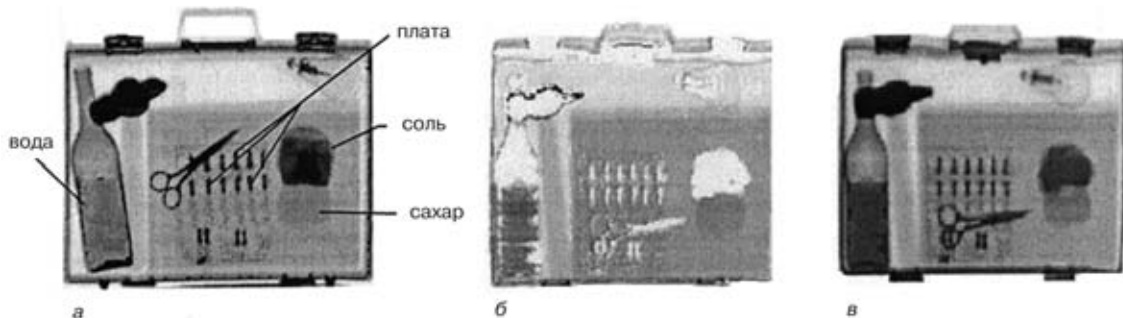


Рис. 6. Изображение объекта на двухэнергетическом интроскопе: а – теневая общая картина объекта; б – с вычленением неорганики; в – с вычленением органики.

2. Наиболее чувствительная двухэнергетическая инспекционная система представляет из себя НД (ZnSe(Te)) – ВД (CsI(Tl)). Такая система имеет контрастную чувствительность менее 1% при проникающей способности по стали, равной 25 мм для $U_a = 140$ кВ, и способна разделять органику от неорганики.

3. Дальнейшее развитие радиографических систем с высоким пространственным разрешением планируется путем использования фотодиодных структур с усилителями и коммутатором в одном корпусе с шагом менее 800 мкм.

НТЦ РП НТК «Ин-т монокристаллов» НАН Украины,
ПО «Коммунар», НТ СКБ «Полисвет»,
Харьков

1. *Harrison's R. M.* Digital radiography – a review of detector design // NIM, 1991, A310. – P. 24–34.
2. *Добромыслов В. А., Румянцев С. В.* Радиационная интроскопия. – М.: Атомиздат, 1972.
3. *Кристаллы* сцинтилляторов и детекторы ионизирующих излучений на их основе / Под ред. В.Д. Рыжикова. – Киев: Наук. думка, 1998.
4. *Scintillator-photodiode* detecting systems for two-level X-ray inspection systems / V. D. Ryzhikov, N. G. Starzhinskiy, L. P. Gal'chinetskii, et al. // Proc. of 15th World Conf. on non-destructive testing, Roma, 15–21 October 2000. – P. 466.

Поступила в редакцию
02.02.2001

УДК 621.129.16

ДЕФОРМАЦИОННОЕ СТАРЕНИЕ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ

В. С. ГИРЕНКО, С. Е. СЕМЕНОВ, Л. В. ГОНЧАРЕНКО

Одним из существенных аспектов технической диагностики и оценки остаточного ресурса магистральных трубопроводов является определение возможных изменений служебных характеристик металла в процессе длительной эксплуатации.

В последние годы появилось много работ, в которых рассмотрено ухудшение свойств металла трубопроводов в течение времени как следствие процессов старения. Ограничиваясь только упоминанием об этом¹, заметим, что многообразие явлений старения требует четкой интерпретации сущности протекающих процессов в материалах. Часто употребляемый термин «старение» зачастую не полностью отражает реальную картину. По сути в ряде случаев речь идет не столько о влиянии фактора времени, сколько о реакции трубного металла на испытываемые им воздействия. При широком понимании термина "старение" изменение служебных характеристик металла и сварных соединений трубопроводов может быть связано с различными физико-химическими процессами. В данном случае рассматриваются возможные последствия деформационного старения.

Основное затруднение, которое возникает при попытках непосредственной оценки соответствующих эффектов, обычно обусловлено отсутствием достоверных образцов-свидетелей. Использование результатов тех или иных не вполне целенаправленных побочных испытаний, выполненных ранее, не обеспечивает корректность выводов. Это обусловлено значительным различием свойств, характерным для трубных сталей, являющихся продукцией массового производства. В этом может заключаться одна из причин противоречий между результатами различных исследований [1–4]. Возникающие трудности усугубляются тем, что максимально

возможные изменения свойств в процессе деформационного старения после длительной эксплуатации должны определяться не столько временем, сколько величиной предварительной пластической деформации. При этом наибольшие деформации носят локальный характер, что дополнительно осложняет непосредственную оценку. Исключая из рассмотрения экстремальные случаи, связанные с грубыми нарушениями условий монтажа трубопроводов, подвижками грунта и т. п., целесообразно отметить следующее.

Трубный передел сопровождается холодным деформированием металла, что особенно характерно для производства сварных труб. В современной нормативной документации на трубы для магистральных нефте- и газопроводов нормируется только предельно допустимая величина экспандирования труб (не более 1,2 %). Однако следует иметь в виду, что деформационные процессы в трубном производстве не ограничиваются операцией экспандирования. Они могут быть весьма разнообразными и характеризуются одно- и многократным приложением сосредоточенных либо распределенных силовых нагрузок, различной степенью деформирования по длине и толщине стенки заготовки. Иными словами, при трубном переделе нельзя полностью исключить возможность возникновения повышенных местных пластических деформаций.

Как известно, форма трубной заготовки заметно изменяется в ходе технологического процесса. Это обусловлено многократным деформированием в различных силовых агрегатах (формовочных, сборочных, сварочных и др.), сварочными операциями, а также упругопластической релаксацией внутренних напряжений в периоды, когда частично либо окончательно сформованная трубная заготовка

¹Обсуждение опубликованных работ, посвященных проблеме старения трубного металла, содержится в [1].

лежит либо движется по рольгангу технологического потока.

Контроль величины раздачи трубы по изменению ее периметра не гарантирует от повышенных местных пластических деформаций при экспандировании. При хорошо отлаженном процессе производства к моменту экспандирования подается заготовка, форма поперечного сечения которой мало отличается от правильного круга. Однако, поскольку в районе продольных сварных швов в отдельных случаях возникают местные отклонения от цилиндрической формы, а сварной шов слабо деформируется в процессе экспандирования, локальные пластические деформации в прилегающей к нему зоне могут достигать значительного уровня. Например, при максимально допустимых условиях раздачи труб диаметром 720 мм местные пластические деформации в зоне продольного шва могут достигать 7 %. В отдельных случаях они становятся соизмеримыми с предельной пластичностью металла [5].

Максимальные искажения формы поперечного сечения трубной заготовки наблюдаются на концевых участках (так называемый концевой эффект). Характерно, что значительное количество разрушений при испытаниях и эксплуатации трубопроводов зарождается именно в этих местах. Наименее контролируемы значения возможных пластических деформаций в монтажных условиях. Уровень допустимой пластической деформации ограничивается опосредованно правилами выполнения работ, таких, как холодное гнутье труб или выправление местных искажений формы. Наконец, при эксплуатации пластические деформации, уровень которых зависит от ряда факторов, могут возникать в зоне механических повреждений и коррозионных дефектов, в местах образования гофров и на других участках деформирования металла трубопровода. Оценка возможных эффектов деформационного старения в связи с предварительным холодным пластическим деформированием металла, возникающем на различных этапах производства труб, монтажа и эксплуатации трубопроводов, имеет прямое отношение к определению технического состояния эксплуатируемых магистральных трубопроводов [6].

С учетом сказанного выше предпринята попытка получить дополнительную информацию о возможных изменениях служебных характеристик трубных сталей в результате деформационного старения.

Исследуемые стали и механические испытания. Методика работы определялась стремлением выяснить, насколько серьезной может быть деградация служебных свойств металла магистральных

трубопроводов в процессе длительной эксплуатации в связи с развитием деформационного старения.

Исследования проводились на металле сварных и бесшовных труб диаметром 720 мм с толщиной стенки 8...9 мм, изготовленных из сталей марок 17ГС со следующим массовым содержанием, %: С 0,19; Si 0,49; Mn 1,1; S 0,019; P 0,016 и типа 19Г (С 0,17; Si 0,22; Mn 1,09; S 0,018; P 0,009). Трубы были взяты из запаса — они пролежали на складе более 20 лет и не испытывали монтажных и эксплуатационных воздействий. Исследование их металла позволяло в чистом виде оценить последствия естественного старения после общих деформаций при трубном переделе. Металл этих же труб в дальнейшем подвергался дополнительной пластической деформации и искусственному старению с целью оценки возможных изменений его служебных свойств в зонах концентрации деформаций.

Образцы вырезались из мест, удаленных от сварных швов и концов труб. Чтобы обеспечить полное протекание процесса старения, изготовленные образцы подвергли нагреву при 250 °С в течение 1 ч после предварительной пластической деформации растяжением на 2, 5 и 10 %. Из состаренного металла для определения прочностных и пластических характеристик при растяжении изготавливались цилиндрические образцы по ГОСТ 10006, для определения ударной вязкости (KCV) — образцы с острым надрезом, тип 13, по ГОСТ 9454.

Результаты механических испытаний приведены в табл. 1. Для сравнения в ней представлены механические свойства металла в исходном состоянии непосредственно тех труб, металл которых подвергался старению. Можно видеть, что деформационно-термическая обработка приводит к закономерным явлениям упрочнения и понижения характеристик вязкости исследованных материалов, характерных для состаренных конструкционных сталей подобного типа.

Сопротивление трубных сталей вязким разрушениям. В условиях ограниченно низких эксплуатационных температур при небольших толщинах стенок трубопроводов (до 10...12 мм) основное значение приобретают характеристики сопротивляемости применяемых материалов вязким разрушениям.

В соответствии с представлениями механики разрушения и практическим опытом очаги разрушения обычно связывают с наличием трещиноподобных или объемных дефектов. К первым могут быть отнесены слоисто-вязкое растрескивание [7] с характерным «шиферным» изломом в зоне возникновения разрушения, а также трещины коррозионного или малоциклового происхождения. Различ-

Таблица 1. Свойства трубной стали после деформационного старения

Состояние металла труб	Сталь марки 17ГС				Сталь типа 19Г			
	σ_t , МПа	σ_b , МПа	KCV, Дж/см ²		σ_t , МПа	σ_b , МПа	KCV, Дж/см ²	
			0 °С	60 °С			0 °С	60 °С
Исходное состояние	428,1	605,2	34,7	80,0	308,5	533,5	60,5	110,0
Деформация 2 %, отпуск при T = 250 °С 1 ч	553,5	628,0	24,0	63,0	469,7	560,7	38,8	102,0
Деформация 5 %, отпуск при T = 250 °С 1 ч	624,9	651,8	14,2	61,0	536,1	584,6	20,1	60,0
Деформация 10 %, отпуск при T = 250 °С 1 ч	695,0	706,0	14,0	60,0	641,7	653,0	12,1	52,0

Таблица 2. Влияние деформационного старения на характеристики сопротивления вязкому разрушению

Состояние металла труб	Сталь марки 17ГС					Сталь типа 19Г				
	σ_b/σ_t	δ_i , мм	$tg \alpha$	ϵ_b	n	σ_b/σ_t	δ_i , мм	$tg \alpha$	ϵ_b	n
Исходное состояние	1,41	0,09	0,13	0,16	0,14	1,73	0,13	0,20	0,19	0,16
Деформация 2 %, отпуск при $T = 250^\circ C$ 1 ч	1,14	0,07	0,05	0,09	0,08	1,19	0,13	0,09	0,13	0,12
Деформация 5 %, отпуск при $T = 250^\circ C$ 1 ч	1,04	0,07	0,04	0,08	0,07	1,09	0,08	0,05	0,09	0,08
Деформация 10 %, отпуск при $T = 250^\circ C$ 1 ч	1,02	0,06	0,02	0,03	0,03	1,02	0,06	0,01	0,02	0,02

ные формы коррозионных потерь металла классифицируют как объемные дефекты.

При наличии трещиноподобных дефектов трещиностойкость материала определяется его сопротивлением иницированию и росту вязкой трещины вплоть до образования сквозного разрыва. Первая стадия, как известно, может быть охарактеризована деформационным критерием δ_i — значением раскрытия вершины дефекта в момент иницирования вязкой трещины [8]; вторая — модулем разрыва или углом раскрытия трещины (COA) [9, 10].

Для определения критерия δ_i использованы подходы работ [11, 12], получившие широкую проверку [13]. Они предусматривают оценку этого параметра по величине ударной вязкости при испытаниях образцов Шарпи типа 11 (сечением 10×10 мм) по ГОСТ 9454–78, а также значениям предела текучести σ_t и временного сопротивления σ_b :

$$\delta_i = K \frac{\frac{\sigma_t}{\sigma_b} KCV_m}{1 + 0,33 \frac{\sigma_b}{\sigma_t}} \quad (1)$$

Здесь KCV_m — значение удельной работы разрушения на «верхнем шельфе» температурной зависимости ударной вязкости при 100 % волокна в изломе; коэффициент $K = 0,075$ для образцов типа 11 по ГОСТ 9454–78.

Однако использование образцов этого типа при диагностике тонкостенных трубопроводов невозможно. Для образцов типа 13 по ГОСТ 9454 необходима корректировка коэффициента K , учитывающая изменение ударной вязкости при уменьшении толщины образца, в условиях вязкого состояния материала, за счет смягчения объемности напряженного состояния (рис. 1). Выполненные исследова-

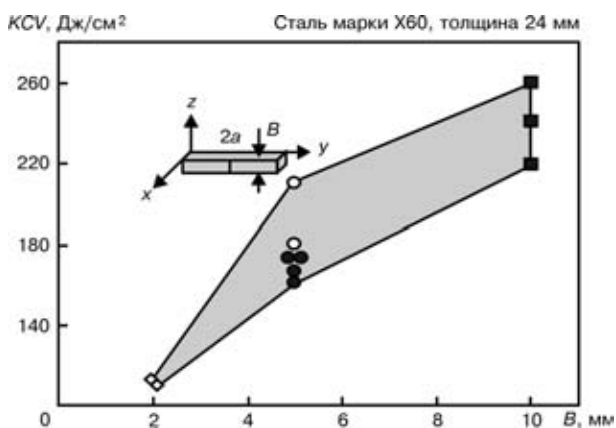


Рис. 1. Влияние толщины образца на значения ударной вязкости на «верхнем шельфе».

ния показали, что коэффициент K должен быть увеличен в 1,35 раза ($K = 0,1$).

Тангенс угла раскрытия трещины (COA) также может быть выражен через стандартные механические характеристики [10]:

$$tg \alpha = 0,5 \frac{\sigma_b}{\sigma_t} \frac{n}{(1-n)^2} \quad (2)$$

где n — коэффициент деформационного упрочнения (табл. 2), который связан с деформацией ϵ_b , соответствующей временному сопротивлению:

$$n = \frac{\epsilon_b}{1 + \epsilon_b}$$

Физический смысл этого критерия ($tg \alpha$) следующий: чем больше подрастание трещины в результате ее раскрытия при увеличении нагрузки, тем меньше угол ее раскрытия и, соответственно, ниже сопротивление материала развитию вязкого разрушения.

В случае объемных дефектов в виде гладкопрофильных коррозионных выемок основным критерием сопротивления вязким разрушениям является критическая деформация $\epsilon_c = \epsilon_b$, соответствующая потере пластической устойчивости материала в условиях растяжения. Она связана с отношением стандартных характеристик σ_b/σ_t .

Влияние предварительной пластической деформации и старения на характеристики δ_i , $tg \alpha$, ϵ_b приведено в табл. 2 и на рис. 2.

Переходя к обсуждению результатов, необходимо прежде всего остановиться на рассмотрении исходного состояния металла на примере стали 17ГС, взятого из трубы аварийного запаса.

Механические свойства и ударная вязкость образцов стали 17ГС соответствуют нормативным требованиям, что непосредственно указывает на отсутствие серьезных изменений в стандартных свойствах после предварительной деформации при трубном переделе и длительного вылеживания трубы (в течение 20 лет). Более того, механические свойства труб из запаса не существенно отличаются от свойств металла, претерпевшего эксплуатационные воздействия в течение такого же срока службы нефтепровода [1].

Таким образом, следует отметить, что общее состояние металла труб, связанное с их деформированием при изготовлении, является вполне удовлетворительным. На этом фоне может быть оценено влияние более значительных локальных пластических деформаций, возникновение которых в отдельных случаях, как отмечалось, нельзя исключить. Наиболее существенным является тот факт, что уже после сравнительно небольшой 2 %-й

деформации и старения предельная деформация ϵ_b и характеристика сопротивления развитию вязкой трещины $\text{tg } \alpha$ исследованных сталей снижаются очень резко (табл. 2, рис. 2). Интересно отметить, что при увеличении предварительной пластической деформации до 5 % этот процесс несколько замедляется. В случае больших предварительных деформаций (10 %) все характеристики сопротивления вязким разрушениям падают до катастрофически низких значений.

Переходя к интерпретации полученных результатов применительно к задачам технической диагностики нефтепроводов, целесообразно подчеркнуть следующее.

С одной стороны, нет достаточных оснований говорить о том, что процесс старения и соответственно деградация служебных свойств металла трубопроводов в условиях длительной эксплуатации при отсутствии водородного охрупчивания или других химико-механических воздействий может привести к негативным последствиям общего характера.

С другой стороны, как отмечалось, нельзя полностью исключить возможность существования в трубопроводе локальных областей, претерпевших повышенные пластические деформации. Соответственно к эксплуатационным дефектам, расположенным в потенциально опасных зонах, нужно подходить с повышенной осторожностью. Кроме того, при определенных условиях пластические деформации могут возникать под эксплуатационными дефектами.

Поскольку основные характеристики трещиностойкости даже после незначительных пластических деформаций и старения резко уменьшаются, надежность трубопровода с дефектами может существенно снизиться в результате деформационного старения. Это необходимо учитывать при расчетной оценке допустимых размеров эксплуатационных дефектов в трубопроводах.

ВЫВОДЫ

1. Деформационное старение даже при сравнительно небольшом значении предварительной холодной пластической деформации (2 %) существенно понижает характеристики сопротивления вязкому разрушению (ϵ_b , $\text{tg } \alpha$) исследованных сталей, широко применявшихся в прежние годы для изготовления сварных (17ГС) и бесшовных (типа 19Г) труб большого диаметра.

Следует особо подчеркнуть, что деформационное старение может значительно облегчить возникновение и подрастание вязких трещин в металле трубопроводов.

2. Высокий уровень механических свойств металла исследованных труб диаметром 720 мм из указанных сталей после продолжительной выдержки без эксплуатационной нагрузки свидетельствует в целом об относительно слабом влиянии трубного передела на процессы старения металла, протекающие в естественных условиях.

Данный вывод не следует распространять на сварные трубы производства конца 50-х — начала

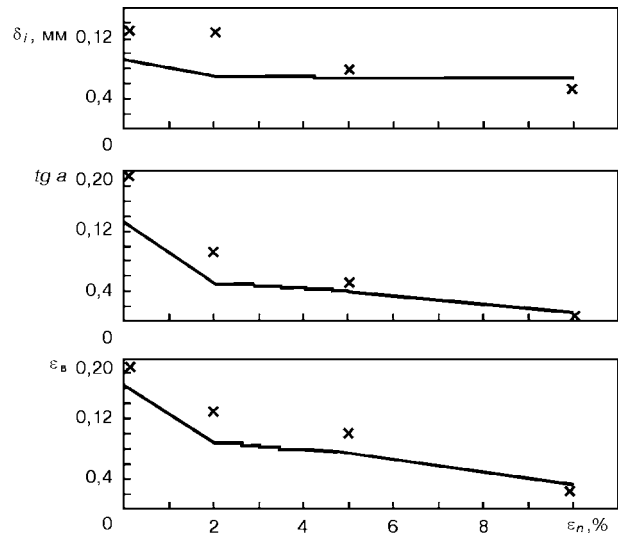


Рис. 2. Влияние предварительной деформации и старения на характеристики пластичности и трещиностойкости стали 17ГС (X — стали типа 19Г).

60-х годов, которые экспандировались на значение 2 % и более. Требуют специального изучения эффекты деформационного старения труб из сталей с высоким отношением предела текучести к временному сопротивлению.

3. Вследствие деформационного старения могут весьма существенно понижаться служебные свойства трубного металла на отдельных участках холодного пластического деформирования. К последним можно отнести зоны выправления местных искажений формы при изготовлении (экспандировании) труб («угловатость» сопряжения кромок в районе продольных сварных швов) или при монтаже трубопроводов (вмятины, перегибы на концевых участках труб, зоны максимальной деформации труб холодного гнутья, «гофры» и др.).

Обусловленное значительными местными пластическими деформациями и деформационным старением ухудшение характеристик сопротивления разрушению может наблюдаться также в зонах коррозионных повреждений трубопроводов.

4. Возможные последствия деформационного старения следует принимать во внимание при расчетной оценке допустимых размеров эксплуатационных дефектов в трубопроводах.

1. *О старении* и оценке состояния металла эксплуатируемых магистральных трубопроводов / Б. Е. Патон, С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 7. — С. 3–12.
2. *Старение* труб нефтепроводов / А. Г. Гумеров, Р. С. Зайнуллин, К. Н. Ямалеев, А. В. Росляков. — М.: Недра, 1995. — 216 с.
3. *Прогнозирование* остаточного ресурса прочности магистральных газонефтепроводов с учетом продолжительности эксплуатации / Ю. И. Пашков, Ю. И. Анисимов, Г. А. Ланчаков и др. // Строит. трубопроводов. — 1996. — № 2. — С. 2–5.
4. *Тарлинский В. Д., Головин С. В.* Экспериментальная оценка свойств металла длительно эксплуатируемых газопроводов // Там же. — 1997. — № 1. — С. 29–32.
5. *Пашков Ю. Н.* Трещиностойкость сварных труб для газопроводов: Автореф. ... дис. д-ра техн. наук — М., 1996.

(Окончание на с. 45).

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

О. Н. ЦУРИКОВ

Исследования по совершенствованию системы диагностирования изделий авиационной техники (АТ) проведены на примере газотурбинного трехвального двухконтурного авиационного двигателя (АД) модульной конструкции с большой степенью двухконтурности. Выбор объекта исследования обусловлен следующими факторами:

непосредственным влиянием технического состояния АД на уровень безопасности полетов;

высокой стоимостью как самого современного трехвального АД модульной конструкции, так и его технического обслуживания (ТО);

достаточной адаптивностью современных АД к функциональному диагностированию в процессе эксплуатации, которая достигается за счет модульности конструкции и большого количества функциональных параметров, контролируемых в процессе эксплуатации.

В настоящее время разработана и широко применяется методика диагностирования газотурбинных трехвальных АД модульной конструкции, по параметрам, регистрируемым в процессе эксплуатации. Как показывает анализ опыта эксплуатации, существующая методика диагностирования недостаточно эффективна прежде всего из-за несовершенства алгоритма обработки параметров, регистрируемых в процессе эксплуатации. Следовательно, совершенствование методики диагностирования газотурбинных трехвальных АД модульной конструкции является важной и актуальной научно-технической задачей.

Статистической базой исследования послужили результаты измерений диагностических параметров, полученных на парке двигателей, эксплуатировавшихся в аэропортах Украины и стран СНГ. Подконтрольный парк АД (таблица) включал данные большого количества двигателей, суммарная наработка которых составила свыше 200 тыс. ч налета. При этом была собрана достаточно большая выборка значений параметров как по парку исправно работавших двигателей, так и по двигателям, досрочно снятым с эксплуатации по отказам, развитие которых сопровождалось изменением диагностических параметров. Таким образом, используемая информация включала:

исходную (неизменную) информацию, которая идентифицирует конкретный экземпляр объекта диагностирования и остается постоянной в пределах времени существования этого экземпляра в системе технической эксплуатации (ТЭ) авиационной техники (АТ);

условно-постоянную информацию, изменяемую в пределах времени существования двигателя в системе ТЭ АТ;

переменную информацию, которая многократно изменяется в пределах существования объекта в системе ТЭ АТ и включает: *первичную* информацию, получаемую непосредственно от конкретного объекта диагностирования и (или) среды и описывающую текущее состояние на момент получения информации; *оперативную* информацию, получаемую в результате обработки первичной информации.

Для накопления в базе данных сведений об откатавших двигателях проанализирована информация о досрочных съемах двигателей с эксплуатации. Для части двигателей, входящих в каждую группу отказов, в эксплуатационных предприятиях получены «полетные карты», информация из которых введена в базу данных.

Досрочные съемы АД с эксплуатации (таблица) наиболее часто происходили из-за разрушения подшипников (22 %), повреждения лопаток (22 %), помпажа (28 %).

Проанализируем развитие представленных отказов. Как известно [1], значения диагностических параметров, измеряемых в эксплуатации, подвержены влиянию различных эксплуатационных факторов. Ими могут быть внешние атмосферные условия; режимы работы двигателя, на которых регистрируются параметры; погрешности средств измерений параметры и пр. В общем виде изменения любого диагностического параметра от полета к полету могут быть представлены в следующем виде [3]:

$$\Delta P_i = \Delta P_{в.у_i} + \Delta P_{р.р_i} + \Delta P_{с.л_i} + \Delta P_{п.р_i} + \Delta PP_{т.с_i}, \quad (1)$$

где составляющие изменений параметров в i -м полете по сравнению с $i-1$ полетом ΔP_i определяются: $\Delta P_{в.у_i}$ — внешними атмосферными условиями; $\Delta P_{р.р_i}$ — режимом работы двигателя; $\Delta P_{с.л_i}$ — погрешностями средств измерений параметров; $\Delta P_{п.р_i}$ — прочими случайными факторами; $\Delta PP_{т.с_i}$ — изменением технического состояния.

Распределение досрочного съема двигателей

Проявление отказов	Количество отказов	Суммарная наработка двигателей, ч
Разрушение ротора	1	754
Повреждение рабочих лопаток	4	2827
Разрушение подшипников, шестерен	4	2184
Смещение рабочих лопаток по пазу	2	4821
Помпаж	5	3829
Повышение вибрации	2	2553
Итого	18	14439

Диагностирование осуществляется по изменению последней составляющей $\Delta P_{т.с.}$, рассматриваемой как полезный сигнал, который должен быть выделен в результате обработки диагностической информации. Остальные составляющие представляют собой шум.

Существует множество методов обработки параметров, которые называются приведением, сглаживанием и т. д., особенности которых достаточно широко изложены в различных литературных источниках [1–3]. Однако на практике их использование без соответствующих уточнений не позволяет получить адекватный результат. Несмотря на применение указанных методов обработки, корреляция диагностических параметров, например, с параметрами внешней среды или другими параметрами, характеризующими эксплуатационные факторы, достаточно велика.

В процессе разработки оптимального алгоритма обработки диагностических параметров АД использовались альтернативные методики приведения параметров к единым внешним условиям.

Задача оптимизации алгоритмов обработки решалась в такой последовательности:

производилась сравнительная оценка эффективности методик приведения по критерию F :

$$F = \sigma_{пр} / \sigma_{исх}, \quad (2)$$

где $\sigma_{пр}$ и $\sigma_{исх}$ — среднеквадратические отклонения соответственно приведенных и исходных значений диагностических параметров;

уточнялись коэффициенты приведения значений диагностических параметров;

производилась сравнительная оценка эффективности одно- и двухэтапного приведения.

Эффективность приведения параметров оценивалась с помощью регрессионного анализа. С этой целью для каждого двигателя определялись коэффициенты регрессии a . Использована линейная зависимость приведенных значений диагностических параметров $P_{пр}$ от измеренных параметров $P_{изм}$, параметров среды и режимов работы:

$$P_{пр} = P_{изм} + a_1 T_n + a_2 H + a_3 M + a_4 G_{свв} + a_5 P_p, \quad (3)$$

где T_n — температура окружающей среды; H — высота полета; M — число Маха; $G_{свв}$ — расход топлива на систему кондиционирования воздуха; P_p — параметр режима работы.

Определялись также начальные и остаточные дисперсии при обработке параметров, приведенных с использованием альтернативных методик. При этом установлено, что остаточная дисперсия, полученная после приведения параметров данного двигателя с использованием коэффициентов регрессии для него, является минимальной.

Для оценки эффективности приведения по альтернативным методикам значения i -х диагностических параметров для каждого j -го двигателя подвергались статистическому анализу. С этой целью вычисляли: исходные среднеквадратические отклонения измеренных значений параметров $\sigma_{исх_{ij}}$; среднеквадратические отклонения значений параметров, приведенных по индивидуальным коэффици-

ентам приведения, которые получены в результате регрессионного анализа $\sigma_{пр_{ij}}$; среднеквадратические отклонения параметров, приведенных с помощью альтернативных методик приведения $\sigma_{м_{ij}}$.

В результате установлено, что наименьшее остаточное среднеквадратическое отклонение получается после приведения измеренных значений параметров с использованием индивидуальных коэффициентов. При этом, если в качестве режимного параметра используется частота вращения вентилятора, то для всех двигателей остаточное среднеквадратическое отклонение минимально. Остаточное среднеквадратическое отклонение при приведении с индивидуальными коэффициентами характеризует суммарные ошибки системы измерения параметров, погрешности линейной аппроксимации формул приведения, а также воздействия неучтенных факторов.

Установлено, что остаточные среднеквадратические отклонения для двигателей одного самолета, эксплуатировавшегося в течение определенного календарного периода времени (например, одного года), а следовательно, при одинаковых внешних условиях, различаются между собой лишь в связи с различной реакцией двигателей на внешние условия (индивидуальные характеристики двигателей), а также индивидуальными метрологическими характеристиками измерительного тракта двигателей. Подтверждением этого является тот факт, что при разбиении периода эксплуатации АД одного самолета на сезоны остаточные среднеквадратические отклонения для всех двигателей изменяются эквидистантно. Аналогичные закономерности выявлены при анализе коэффициентов регрессии.

Рассчитаны остаточные среднеквадратические отклонения параметров, приведенных к частоте вращения вентилятора с индивидуальными коэффициентами. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что параметры функции плотности распределения остаточных среднеквадратических отклонений при использовании индивидуальных коэффициентов и применяемой методики для параметров температуры газов за турбиной T_t , частоты оборотов за минуту ротора низкого давления n_3 и часового расхода топлива σ_t практически совпадают.

При сравнении остаточных среднеквадратических отклонений с приведением к частоте вращения n установлено, что при использовании индивидуальных коэффициентов остаточное среднеквадратическое отклонение существенно уменьшается по сравнению с приведением по применяемой методике. С учетом того, что приведение с индивидуальными коэффициентами к режиму по частоте вращения вентилятора существенно снижает остаточное среднеквадратическое отклонение по сравнению с приведением по режиму n_3 , можно сделать вывод о том, что по критерию F (критерий снижения дисперсии) предлагаемая методика приведения наиболее эффективно снижает дисперсию.

Установлено, что остаточные среднеквадратические отклонения для ряда значений параметров, полученных с использованием алгоритмов приведе-

ния, основанных на индивидуальных коэффициентах, не зависят от методики предварительной обработки данных. Результаты расчетов распределения индивидуальных коэффициентов приведения к внешним условиям и режиму работы двигателя (частоты оборотов за одну минуту ротора высокого давления n_1) свидетельствуют о том, что эти коэффициенты изменяются в широких диапазонах, а для некоторых параметров различаются даже по знаку. Это объясняется двумя обстоятельствами:

во-первых, относительно узким диапазоном вариации зависимых переменных в реальных условиях эксплуатации;

во-вторых, относительно небольшим влиянием зависимых переменных на изменение параметров состояния.

С целью разработки эффективного алгоритма приведения параметров их обработка может осуществляться в два этапа (двухстадийное приведение). На первом этапе необходимо осуществлять приведение диагностических параметров к стандартным атмосферным условиям с использованием обычных формул теории подобия, а на втором этапе приведенные параметры необходимо дополнительно привести к единым внешним условиям и режиму. На втором этапе для большинства параметров необходимо использовать линейные зависимости приведения, а для частоты вращения каскада высокого давления — нелинейную зависимость.

Результаты обработки параметров при одно- и двухстадийном приведении свидетельствуют о том, что приведение измеренных значений параметров с помощью формул теории подобия приводит к повышению среднеквадратического отклонения параметров. Линейное приведение с индивидуальными коэффициентами на втором этапе существенно уменьшает значение среднеквадратического отклонения, что иллюстрируют рис. 1, 2, на которых представлены графики изменения по полетам исходного и приведенного значений параметров T_r и σ_r .

Анализ диагностической информации свидетельствует о том, что повысить достоверность распознавания вида технического состояния объекта диагностирования можно благодаря учету взаимного влияния параметров. Другими словами, при использовании многомерной плотности распределения параметров эффективность диагностирования возрастает. Учитывая, что система контроля АД предлагает регистрацию большого объема параметров, имеющих различную физическую сущность, различный относительный диапазон изменения и

относительную ширину поля допусков, для диагностирования в многомерном пространстве признаков возникла необходимость на этапе, следующем после приведения параметров, провести их нормирование. С этой целью определяли базовые значения параметров по первым десяти полетам, а текущие нормированные значения по формуле

$$K_{p_j} = \frac{P_i^\sigma - P_i^r}{\Delta_i}, \quad (4)$$

где P_i^σ — базовая характеристика параметра конкретного экземпляра двигателя, которая представляет собой среднее арифметическое значение величин параметров, зарегистрированных в первых десяти полетах с момента начала эксплуатации данного двигателя; $P_{i,j}^r$ — текущее приведенное значение параметра; Δ_i — допуск на изменение параметра в эксплуатации.

Из анализа выражения (4) следует, что при $K_p < 1$ значения единичного параметра находятся в пределах допуска. Таким образом, по величине K_p можно судить о степени исчерпания ресурса работоспособности двигателя по данному параметру независимо от его физической сущности.

На следующем этапе диагностирования осуществлялось сглаживание представленных критериальных значений.

Как известно из опыта эксплуатации АД, приведение диагностических параметров к единым внешним условиям позволяет исключить лишь две составляющие $\Delta P_{v,y_i}$ и $\Delta P_{p,p_i}$. Исключить влияние на уровень параметров случайных составляющих, таких как $\Delta P_{e,n_i}$ и $\Delta P_{n,p_i}$, можно, используя различные методы статистического сглаживания ряда значений параметров [1–3] и составляющего преобразования уровня диагностических параметров.

Полученные критериальные значения параметров K_{p_i} обрабатывались методом экспоненциального сглаживания [3].

И наконец, для комплексной оценки состояния изделия АТ определялось значение обобщенного комплексного критерия:

$$A = \left(\sum_{i=1}^n K_{i,j}^2 \right)^{0,5}, \quad (5)$$

где n — количество диагностических параметров; $K_{i,j}$ — критериальное значение i -го параметра, полученное в j -м полете.

Для повышения устойчивости комплексного критерия при его вычислении, если значение единичного критерия $K_{p_i} < 0,3$, то принималось, что $K_p = 0$. Если получаемое при этом значение $A_j > 1$ при

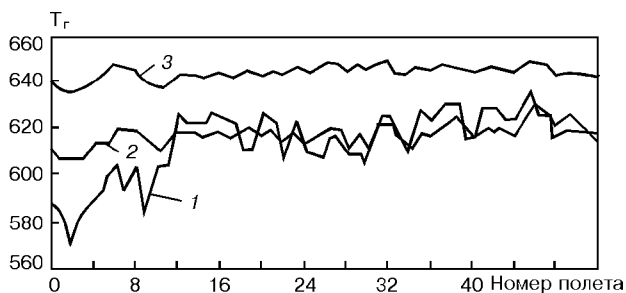


Рис. 1. Графики исходного и приведенного параметра T_r : 1 — исходные значения, 2 — одно-, 3 — двухстадийное приведение.

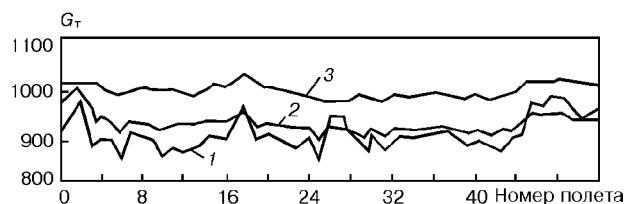


Рис. 2. Графики исходного и приведенного параметра σ_r : 1 — исходные значения, 2 — одно-, 3 — двухстадийное приведение.

$K_p < 1$, то это является свидетельством того, что у изделия АТ развивается отказ, который не привел к выводу единичных критериев за пределы допусков.

Предложенные критерии оценки технического состояния АД были опробованы на материалах представленной ранее полетной информации, полученной на двигателях, отказавших в эксплуатации по различным причинам. Данные по этим двигателям были подвергнуты анализу. Наиболее типичные примеры результатов анализа представлены ниже.

Пример 1. Признаком зафиксированного отказа АД был «хлопок» с одновременным загоранием табло «Помпаж» и «Убавь режим». Взлет самолета был прекращен, в результате чего произошло резкое падение оборотов и интенсивный рост температуры газов за турбиной. При осмотре АД обнаружены: забоины лопаток КНД; разрушение лопаток ТВД и 1/3 высоты по периферии; заклинивание всех роторов; большое количество оплавленных фрагментов рабочих лопаток первых ступеней турбины.

Двигатель с эксплуатации снят и отправлен на завод, где выявлены смещение и выход из пазов диска рабочих лопаток компрессора высокого давления (КВД) вследствие разгибки контрольных замков, вызвавших повреждения лопаток СА шестой ступени КВД.

В базу данных для обработки была введена информация о 123 полетах этого двигателя. Отмечено, что начиная с 17 полета наметилась тенденция к росту вибрации (ВП), температуры газов за турбиной и незначительное повышение температуры масла. Начиная с 34 полета увеличилась частота вращения КНД, с 44 полета также возрос уровень вибрации задней опоры, с 49 полета отмечен рост температуры масла, а с 53 полета — частоты вращения КВД. Начиная с 75 полета и до отказа комплексный критерий «А» превышал предельное значение, хотя ни один из частных критериев, установленный для отдельных параметров не превысил норму. Выход за пределы допуска комплексного критерия обусловлен ростом вибрации (ВП и ВЗ) и изменением других параметров в пределах их допусков.

Пример 2. Признаком отказа в полете явилось загорание сигнального табло «Стружка в масле», «Маслофильтр засорен», «Опасная вибрация» с ростом уровня вибрации и повышением температуры газов за турбиной. Двигатель выключен в полете экипажем.

При осмотре на земле обнаружено заклинивание ротора высокого давления, наличие большого количества стружки, частиц графита на масляных фильтрах. Проведенное исследование двигателя на заводе выявило следующие неисправности: разрушение сепаратора и обоймы подшипника опоры

ТВД; повреждение стального упорного кольца; повышенный износ графитового уплотнения опоры ТВД.

Была обработана информация о последних 34 полетах этого двигателя. Начиная с 32 полета комплексный критерий превысил допустимое значение, хотя каждый из частных критериев оставался в пределах допусков. Анализ результатов обработки позволяет выделить два события: начиная с 10-го полета отмечено увеличение температуры за турбиной НД ($t_{нд}^*$), давления топлива и масла в связи с регулировками, проведенными на двигателе с 13-го по 16-й полеты наблюдался рост вибрации по ВЗ, уменьшение $t_{нд}^*$ и рост частоты вращения низкого и высокого давления n_2 и n_3 . В этот же период отмечалось наличие стружки в маслосистеме.

Пример 3. Двигатель выключен в процессе разбега самолета при выводе АД на взлетный режим. Зафиксирован помпаж двигателя с загоранием табло «Помпаж». Одновременно зафиксировано падение оборотов роторов вентилятора и КВД, сопровождающееся ростом температуры газов за турбиной. Взлет самолета был прекращен.

При осмотре двигателя обнаружено повреждение лопаток 4–7-й ступеней КВД, вызванное разрушением деталей газоздушного тракта АД. Анализ полетной информации показал, что за шесть полетов до момента отказа произошло резкое изменение всех регистрируемых параметров. Вместе с тем ни один из параметров не достиг пределов допуска. В то же время значение комплексного критерия в этих полетах, достигло предельного.

Приведенные примеры явились подтверждением того, что применение комплексного критерия оценки состояния АД существенно повышает чувствительность системы диагностирования двигателей, а следовательно, и ее эффективность.

Полученные результаты позволяют сформулировать вывод о целесообразности совершенствования методики диагностирования авиационного двигателя газотурбинных трехвальных АД модульной конструкции в соответствии с предлагаемыми рекомендациями. Модифицированная соответствующим образом предлагаемая методика диагностирования может служить базой для разработки комплексной системы диагностирования изделий АТ.

1. Ахмедьянов А. М., Дубровский Н. Г., Тунаков А. П. Диагностика состояния ВРД по термодинамическим параметрам. — М.: Машиностроение — 1985. — 206 с.
2. Кеба И. В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей. — М.: Транспорт, 1980. — 245 с.
3. Черкез А. Я. Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений. — М.: Машиностроение. — 1975. — 379 с.

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКИХ СРЕД

Н. Р. РАХИМОВ, А. М. КАСЫМАХУНОВА, Ш. УСМОНОВ

В связи с необходимостью повышения эффективности производства нефтеперерабатывающей, пищевой промышленности и развития автоматизированных систем управления постоянно возрастает значение первичных измерительных преобразователей (ПИП) в частности, оптоэлектронных.

Интенсивное развитие оптоэлектроники позволило создать оптоэлектронные неразрушающие методы и устройства автоматического контроля, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к первичным преобразователям: бесконтактность контроля, высокая чувствительность, точность, быстродействие, надежность, малые габариты и энергопотребление.

Последние годы в области создания оптоэлектронного ПИП в Ферганском политехническом институте накоплен большой объем научных материалов, разработан ряд оптоэлектронных устройств [1–4] неразрушающего контроля физико-химических параметров жидких сред.

Основными физико-химическими параметрами, определяющими оптимальный ход технологического процесса, являются цветовые (для нефтепродуктов, хлопкового масла, соков, напитков и т. п.), влагосодержание (для нефти и нефтепродуктов, хлопкового масла, глицерина и т. п.), а также оптическая плотность, содержание одного вещества в другом и другие характеристики, подвергающиеся оптическому контролю.

Современное оптоэлектронное устройство состоит из четырех основных узлов: источника излучения — светоизлучающего диода (СИД), различных линз, контролируемого объекта (КО) и приемника оптического излучения (ПОИ). В последнее время в качестве источника излучения все шире применяются полупроводниковые источники некогерентного излучения — СИД [5, 6]. Их преимущество по сравнению с другими источниками в следующем: малых энергоемкости, габаритах и массе; способности выдерживать значительные механические перегрузки; высокой стабильности, надежности в работе; малой инерционности; простоте модуляции излучения. Эти свойства СИД позволяют использовать их в качестве источников излучения, питание к которым может подаваться с помощью бесконтактных схем. Сочетание малой инерционности с линейной зависимостью мощности излучения от тока делает возможным использование СИД в качестве источника излучения с управляемой интенсивностью, которую можно модулировать весьма высокой частотой или изменять по определенному закону за весьма короткий промежуток времени. Основным недостатком СИД является нестабильность

излучения при изменении температуры, которую можно исключить правильным подбором их режима питания или термостатированием [7].

В оптоэлектронных ПИП функции приемника излучения выполняет ПОИ, который является первичным преобразователем [8]. Роль последнего сводится к пропорциональному преобразованию освещенности его светочувствительной поверхности в выходное напряжение и ток. Такое преобразование оптического сигнала в электрический происходит вследствие того, что при изменении потока излучения в ПОИ либо меняется сопротивление, либо возникает электродвижущая сила.

К ПОИ, основанным на внешнем фотоэффекте, принадлежат вакуумные фотоэлементы: фотоэлектронные умножители (ФЭУ) и болометры. К ПОИ с внутренним фотоэффектом относятся фотодиоды, фоторезисторы, фототранзисторы, лавинные фотодиоды, приборы с зарядовой связью (ПЗС) и АФН-приемники [9].

ПОИ обладают различной спектральной чувствительностью — ее область для ФЭУ находится в пределах 0,16... 1,1 мкм, а у фотодиодов зависит от исходного полупроводникового материала: для кремниевых она составляет от 0,4 до 1,2 мкм, для германиевых — от 0,4 до 1,2 мкм. Область спектральной чувствительности фоторезисторов лежит в пределах от 0,4 до 10 мкм, а АФН-приемников — от 0,4 до 2 мкм.

По нашим заказам Санкт-Петербургское оптико-механическое объединение (ЛОМО) изготавливает различные линзы (полусфер, шарообразные, цилиндрические и т. п.). Оптоэлектронные средства для контроля оптических параметров жидких сред в зависимости от физических явлений, определяющих параметры прошедшего через исследуемую среду светового потока, разделяются на три группы: фотоэлектрические, рефрактометрические, поляризметрические. В зависимости от области применения их можно подразделить на пять групп: для изучения структуры и строения веществ; для определения и контроля кинетики различных физических и химических процессов, т. е. для изучения взаимодействий и превращений веществ; оптоэлектронные уровнемеры; оптоэлектронные расходомеры. По принципу построения датчики подразделяются на одно- и многоволновые.

Принцип многоволнового метода основан на принципе облучения контролируемого объекта двумя или более световыми потоками. По результатам исследования физико-химического состава и спектральных характеристик для контроля цвета полупрозрачных жидкостей (хлопкового масла, соков, напитков и т. п.) в ходе технологического процесса

выбран двухволновой метод. При этом используется зеленое излучение с длиной волны $\lambda = 0,56$ мкм и красное с $\lambda = 0,68$ мкм. Конструктивно датчик-анализатор ДЦ-5М [2] состоит из корпуса и электронного блока, соединенных между собой кабелем.

Основными узлами датчика являются два идентичных кварцевых колпачка. Внутри одного из них находятся два СИД, в другом — идентичные АФН-приемники. Между кварцевыми колпачками протекает анализируемая полупрозрачная жидкость.

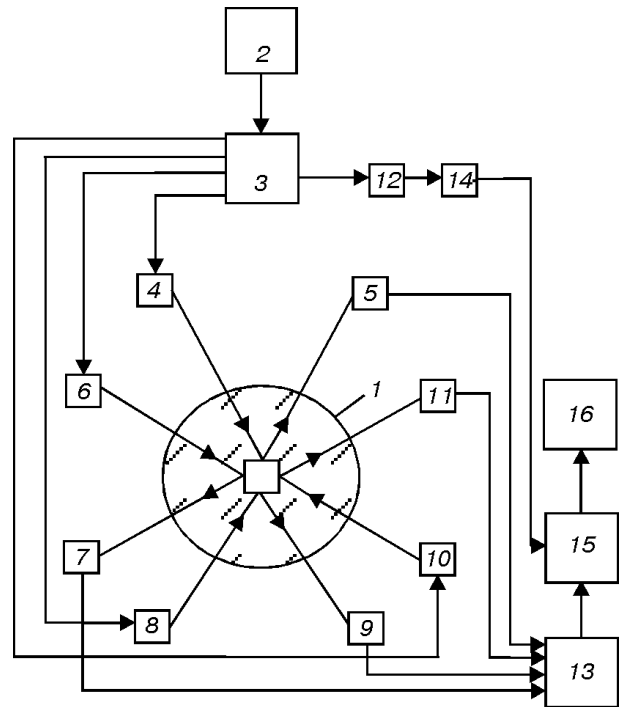
Действие устройства УФД-4М [3] для контроля качественных параметров жидкостей (мутности, цветности, кислотности) основано на принципе регистрации интенсивности световых потоков, прошедших через контролируемую жидкость и эталонный раствор. Оно работает следующим образом. Блок питания снабжает идентичные генераторы стабилизированным током. Каждый генератор в отдельности вырабатывает импульсные токи, которые подаются к идентичным СИД. Излучения, проходящие через контролируемую жидкость и эталонный раствор, поступают на АФН-приемники. Далее разница сигналов, пропорциональная контролируемому параметру, регистрируется измерительным прибором.

На основе элемента нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) и использования двухволнового принципа разработан датчик ИВГ-2М [8] для контроля концентрации глицерина и датчик-зонд для определения влажности. Применение первого обеспечивает получение надежных результатов, высокую воспроизводимость, необходимую точность и высокую чувствительность, позволяет простыми средствами осуществить эффективный контроль концентрации глицерина, а также осуществлять их автоматизацию.

Разработанный датчик-зонд [10] для определения влажности и содержания воды в цистернах с различными жидкостями (нефть, нефтепродукты, жирные кислоты, глицерин и т. п.) работает следующим образом. Его погружают в исследуемую жидкость, при этом чувствительный элемент (элемент НПВО на основе светоизлучающих диодов и АФН-приемника) с помощью привода углубляется в жидкость. По мере движения чувствительного элемента происходит непрерывное самоочистление его чувствительной грани с помощью очистительных щеток, равномерно размещенных вдоль корпуса.

Разработаны также уровнемер для контроля химических активных жидких сред (СО₂, нефтепродукты, глицерин и др.) на основе АФН-приемника. Используемые в нем светодиоды со спектром излучения на опорной и измерительной длинах волн выбираются по специальным характеристикам контролируемой жидкости. По спектральным характеристикам контролируемой жидкости выбираются светодиоды со спектром излучения на опорной и измерительной длинах волн. Устанавливается необходимая мощность излучения светодиода.

Устройство НПВО [11] предназначено для контроля оптических параметров (концентрация, влажность, показатель преломления и поглощения и т. п.) жидких сред. Оно включает шар-призму 1 с полостью в виде призмы, проходящей через его



Устройство для определения оптических параметров жидких сред (обозначения в тексте).

центр, задающий генератор (источник импульсного питания) 2, триггер 3 со счетным входом, излучающие диоды 4-7 и компенсационный светоизлучающий диод 8, измерительные 9-12 и компенсационный 13 АФН-приемники, сумматор 14, сравнивающий блок 15 и регистрирующий прибор 16. Внутри шар-линзы 1, работающей на основе НПВО-эффекта, выполнена полость в виде n -гранной пирамиды. Соответственно устройство содержит $n-1$ дополнительных источников излучения и измерительных АФН-приемников, а также сумматор. Каждый источник излучения оптически связан через одну из граней призмы с соответствующим АФН-приемником. Далее разница сигналов суммарных измерительных и дополнительного АФН-приемников, пропорциональная контролируемому параметру, подается на измерительный прибор 16.

При прохождении исследуемого вещества через шар, оно оказывает давление на его измерительные грани. Благодаря этому осуществляется хороший контакт исследуемого вещества с оптическим элементом, за счет чего повышается точность измерений.

В результате лабораторных и производственных испытаний установлены следующие технические характеристики устройства:

Напряжение питания, В	220
Частота, Гц	50
Потребляемая мощность, Вт, не более	5
Предел контроля цветности (ЦНТ)	0,1... 8,0
Чувствительность (ЦНТ)	0,05
Предел измерения влажности, %	0... 20
Предел измерения мутности, %	1... 50
Габариты, мм	200×50×200
Масса, кг, не более	0,5

В целом оптоэлектронные устройства с применением различных линз можно использовать в контрольно-измерительной технике в качестве параметрического измерительного преобразователя

неэлектрических величин — таких, как плотность, влажность, координаты движущихся объектов, цвета, шероховатость, концентрация, уровень жидкостей и т. д. Следует отметить, что применение этих линз открывает широкие возможности в разработке миниатюрных измерительных устройств для неразрушающего контроля различных физических параметров.

1. *Rahimov N. R., Mirzamakhmudov T. M.* Control device for qualitative parameters of liquids on the basis of photosensitive semiconductor sensors «УФД-1А». — Moscow: Vneshtorgizdat, 1989. — № 1379 Т. — P. 2.
2. *Rahimov N. R., Gafurov U. A., Zokirov R.* Semitransparent fluid colour sensor-analysier ДЦ-5М. — Moscow, Vneshtorgizdat, 1991. — № 3822 Т. — P. 2.
3. *Rahimov N. R., Gafurov U. A., Zokirov R., Isaqov M.* Fluid quality parameters control device УФД — 4 М. — Moscow, Vneshtorgizdat, 1991. — № 3825 Т. — P. 2.
4. *Rahimov N. R., Gafurov U. A., Akhunjyanov M.* Sensor-probe for moisture determination ДЗВ-2М. — Moscow, Vneshtorgizdat, 1991. — № 3824 Т. — P. 2.

Ферган. политех. ин-т,
Республика Узбекистан

5. *Берг А., Дин П.* Светодиоды. — М.: Мир. — 1979.
6. *Мухиддинов М. М.* Светодиоды и их применения для автоматического контроля и измерения. — Ташкент: Фан, 1976.
7. *Полупроводниковые* фотоприемники: ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазон спектра / Под ред. В. И. Стафеева. — М.: Радио и связь. — 1984.
8. *Рахимов Н. Р., Хатамов С. О., Холмурзаев А. А.* Оптоэлектронный концентратор глицерина на основе ИК-излучателя / INFRA-2000 (сб.ст.). — С. 256–259.
9. *Рахимов Н. Р., Тожиев Р. Ж., Холмурзаев А. А.* Оптический метод и разработки приборов для определения физических параметров нефти и нефтепродуктов / INNOVATION-2000 (Сб. ст.) — (сб.ст.)₅ — С. 141–143.
10. *А. С. № 1689813 СССР, МКИ⁵ G 01 N 21/85.* Датчик-зонд для определения влажности / Т. М. Мирзамахмудов, Н. Р. Рахимов, У. Ф. Гафуров др. — Оpubл. 7.11.91; Бюл. № 41.
11. *А. с. № 1693482 СССР, МКИ⁵ G 01 N 21/43.* Устройство для определения оптических параметров жидких сред. / Т. М. Мирзамахмудов, Н. Р. Рахимов, Э. С. Мусаев и др. — Оpubл. 23.11.91; Бюл. № 43.

Поступила в редакцию
30.11.2000

УДК 621.785:681.32

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ

В. Н. ДУБРОВИН, С. А. СУББОТИН, В. К. ЯЦЕНКО

Одной из важных задач при прогнозировании запаса прочности деталей газотурбинных авиадвигателей (ГТД) и внедрении нового технологического процесса является предварительная оценка коэффициента упрочнения β^y — отношения пределов выносливости упрочненной детали σ_{-1}^y и детали, окончательно обработанной по серийной технологии шлифованием или полированием σ_{-1} : $\beta^y = \sigma_{-1}^y / \sigma_{-1}$.

Для определения коэффициента упрочнения необходимо провести испытания на усталость определенного числа деталей, что на стадии проектирования является дорогостоящей и трудновыполнимой задачей. В настоящее время расчет запаса прочности деталей выполняется по результатам испытания на усталость стандартных образцов с различными концентраторами напряжений. В этом случае не всегда соблюдается подобие напряженного состояния в зоне контакта при деформационном упрочнении и изменение коэффициента упрочнения при переходе от упрочненного образца к детали [1].

Эффективность алмазного выглаживания, которое нашло применение в авиадвигателестроении, в значительной мере зависит от выбранных режимов, физико-механических и геометрических характеристик упрочняемых деталей и деформирующего инструмента.

© В. Н. Дубровин, С. А. Субботин, В. К. Яценко, 2001

В задачу исследования [2] входило получение с помощью теории подобия и анализа размерностей математической модели коэффициента упрочнения с участием параметров процесса алмазного выглаживания, физико-механических характеристик материалов деталей и инструмента с учетом изменения эффективности упрочнения при наличии концентрации напряжений и масштабного фактора деталей на этапе проектирования и внедрения технологического процесса.

В качестве факторов, наиболее полно отражающих физико-химические свойства деталей, предлагается использовать [1]:

- 1) твердость материала НВ, МПа;
- 2) среднее контактное давление в зоне деформирования q_{\max} , МПа;
- 3) полуось эллипса касания в зоне упругого контакта a , мм;
- 4) подача при выглаживании s , мм/об;
- 5) временное сопротивление разрыву σ_b , МПа;
- 6) предел текучести материала $\sigma_{0,2}$, МПа;
- 7) показатель деформационного упрочнения, n ;
- 8) теоретический коэффициент концентрации напряжений от следов обработки;
- 9) параметр исходной шероховатости детали R_{al} , мкм;
- 10) сила выглаживания P_y , Н;

- 11) радиус сферы алмазного инструмента $R_{сф}$;
- 12) параметр шероховатости после выглаживания детали, R_{a2} , мкм;
- 13) теоретический коэффициент концентрации напряжений натурной детали (образца);
- 14) диаметр образца в осевом сечении d , мм;
- 15) радиус округления галтели или надреза r , мм;
- 16) относительный градиент первого главного напряжения.

В работе [2] на основе полученных экспериментальных данных строились статистические модели коэффициента упрочнения, которые в отдельных случаях допускали погрешность при расчете β^y свыше 10 %.

В настоящей работе для построения модели коэффициента упрочнения предлагается использовать искусственные нейронные сети (НС), поскольку они обладают высокими адаптивными свойствами и способностью к аппроксимации многомерных функциональных зависимостей [3].

Многослойная нейронная сеть. Основным вычислительным элементом многослойной нейронной сети (МНС) является нейрон [3–5]. Он выполняет параметрическое нелинейное преобразование входного вектора x в скалярную величину y . Нейроны образуют сеть, которая характеризуется следующими параметрами и свойствами: число слоев сети M ; число нейронов μ -го слоя N_μ ; связи между нейронами в слое отсутствуют, нейроны соседних слоев соединяются между собой: выходы нейронов μ -го слоя ($\mu = 1, 2, \dots, M-1$) поступают на входы нейронов только следующего ($\mu + 1$)-го слоя. Внешний векторный сигнал x поступает на входы нейронов только первого слоя, выходы нейронов последнего M -го слоя образуют вектор выходов сети $y^{(M)}$.

Структура сети показана на рисунке. Каждый i -й нейрон μ -го слоя (μ -й нейрон) преобразует входной вектор $x^{(\mu,i)}$ в выходную скалярную величину $y^{(\mu,i)}$:

$$y^{(\mu,i)} = \psi \left(w_0^{(\mu,i)} + \sum_{j=1}^N w_j^{(\mu,i)} x_j^{(\mu,i)} \right),$$

где $w^{(\mu,i)} = (w_0^{(\mu,i)}, w_1^{(\mu,i)}, \dots, w_N^{(\mu,i)})^T$ — вектор весовых коэффициентов нейрона, $x_j^{(\mu,i)}$ — j -я компонента N -мерного входного вектора $x^{(\mu,i)}$, $\psi(x)$ — функция активации, которая является монотонной и ограниченной. В частности, при неотрицательных выходах нейрона такой функцией может быть сигмоидная функция $\psi(x) = 1 / (1 + e^{-x})$ [4].

Процесс обучения сети осуществляется в результате минимизации целевой функции — некоторого критерия качества $F(w)$, который характеризует интегральную меру близости выходов сети $y^{(M)}(k)$ и указаний учителя $y^*(k)$ [6, 7]:

$$F(w) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k Q(\varepsilon(w, m)), \quad (1)$$

где k — номер текущего цикла обучения НС, $m = 1, 2, \dots, k$ — номера предыдущих циклов обучения НС, w — составной вектор-столбец весовых коэффициентов сети. Мгновенный критерий качества $Q(\varepsilon(w, k))$, входящий в интегральный критерий ка-

чества $F(w)$, зависит от вектора ошибки сети $Q(\varepsilon(w, m))$: $\varepsilon(w, m) = y^{(M)}(m) - y^*(m)$.

Градиентные методы обучения МНС основаны на использовании градиента целевой функции (1). Эти методы носят итеративный характер, так как компоненты градиента оказываются нелинейными функциями. Обозначим текущий градиент $g = \partial Q / \partial w$. Тогда все итерационные градиентные методы будут работать в соответствии с формулой [6]:

$$w_{k+1} = w_k + \alpha_k \varphi(w_k),$$

где w_k, w_{k+1} — соответственно текущее и новое приближения значений весов и порогов НС к оптимальному решению; α_k — шаг сходимости, $\varphi(w_k)$ — направление поиска в N -мерном пространстве весов, учитывающее некоторым образом значение градиента целевой функции. Способ определения $\varphi(w_k)$ и α_k на каждой итерации зависит от особенностей конкретного метода.

Для каждого входного вектора X из обучающего множества должен быть определен вектор желаемых выходов сети y^* .

Алгоритм обучения МНС Левенберга-Марквардта [6–9] требует наличия информации о значениях вторых производных целевой функции. Алгоритм может обучать НС, пока ее веса, входы и функции активации имеют производные.

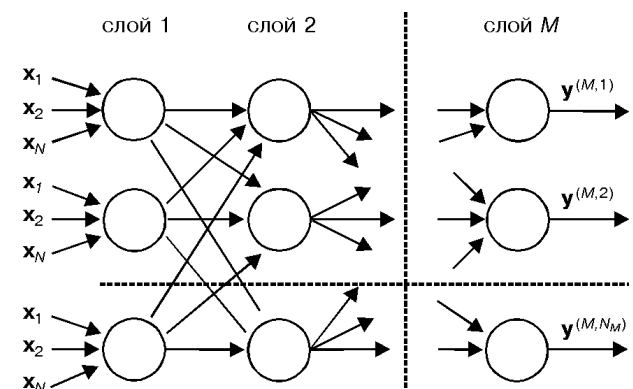
В алгоритме Левенберга-Марквардта используется алгоритм обратного распространения ошибки [7], чтобы вычислить якобиан J целевой функции $F(w)$ относительно весов и порогов сети. Каждый вес и порог изменяются в соответствии с корректирующим правилом, которое в матричной форме имеет вид

$$H = J^T J, \quad g = J^T e, \quad w_{k+1} = W_k - [H_k + \eta I]^{-1} g_k,$$

где J — якобиан; e — вектор ошибок; η — скаляр; I — единичная матрица.

Адаптивное значение η увеличивается в η^+ раз до тех пор, пока значение целевой функции не уменьшится. После этого изменения вносятся в сеть и η уменьшается в η^- раз.

Эксперименты и результаты. Для моделирования коэффициента упрочнения были использованы результаты испытаний на усталость 59 партий образцов диаметром от 7,5 до 60,0 мм, изготовленных из высоколегированных сталей и сплавов марок 40ХН2МАШ, 13Х11Н2В2МФШ, 12ХН3А,



Структура многослойной нейронной сети.

Таблица 1. Фрагмент экспериментальных данных [1]

Номер экземп- ляра	Номер признака																β^y
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	2350	3390	0,140	0,080	900	650	0,116	1,45	1,10	100	3,0	0,25	1,00	10	10	0,43	1,16
6	3300	5630	0,219	0,085	1150	1000	0,126	0,35	0,85	400	3,0	0,12	1,00	10	10	0,43	1,39
10	2700	5570	0,220	0,080	950	600	0,103	0,35	0,85	400	3,0	0,60	1,00	10	10	0,43	1,51
12	3300	5110	0,199	0,060	1150	1000	1,126	1,35	0,85	300	3,0	0,10	1,00	10	10	0,43	1,38
20	2300	3900	0,126	0,080	950	850	0,106	1,25	0,23	110	3,0	0,14	1,00	7,5	10	0,50	1,27
21	3100	5500	0,202	0,080	960	850	0,131	1,45	1,10	300	2,5	0,19	1,00	10	10	0,43	1,45
22	2850	4860	0,196	0,080	1000	700	0,103	1,35	0,85	250	2,5	0,12	1,00	10	10	0,43	1,50
25	2600	3970	0,125	0,080	1000	800	0,126	1,30	0,70	110	3,0	0,07	1,00	7,5	10	0,50	1,44
27	3300	5630	0,219	0,080	1150	1000	0,126	1,45	1,15	400	3,0	0,14	1,15	10	6	0,575	1,29
30	2350	3140	0,400	0,080	950	850	0,106	1,25	0,63	200	2,5	0,40	1,45	60	10	0,30	1,57
32	2550	5330	0,224	0,080	960	770	0,115	1,25	0,65	400	3,0	0,11	1,00	10	10	0,43	1,47
33	3300	4810	0,176	0,085	1150	1000	0,126	1,80	2,80	200	2,5	1,00	1,00	10	10	0,43	1,43
38	2700	4780	0,177	0,080	950	600	0,103	1,80	2,80	200	2,5	0,35	1,00	10	10	0,43	1,49
44	2350	4620	0,180	0,080	900	650	0,116	1,80	2,80	200	2,5	0,35	1,00	10	10	0,43	1,66
50	2300	3900	0,126	0,080	950	850	0,106	1,70	2,50	110	3,0	0,60	1,00	7,5	10	0,50	1,20
52	2600	3970	0,125	0,100	1000	800	0,126	1,65	2,40	110	3,0	0,30	1,00	7,5	10	0,50	1,13
54	3300	3480	0,139	0,080	1180	1000	0,126	1,65	2,40	100	3,0	1,20	2,52	10	0,25	8,20	1,83
58	2550	5330	0,210	0,100	960	770	0,115	1,65	2,30	400	3,0	0,25	1,00	10	10	0,43	1,35

14X17Н2Ш, ХН77ТЮР, Х12НМБФШ, 18X15НЗМАШ [1].

Алмазное выглаживание образцов проводилось инструментами с радиусами сферы от 0,8 до 3,0 мм. Твердость исследуемых материалов находилась в пределах $HV\ 2350...3300$ МПа, временное сопротивление разрыву $\sigma_B = 950...1150$ МПа, предел текучести $\sigma_{0,2} = 600...1000$ МПа, показатель

деформационного упрочнения $n = 0,103...0,131$, сила выглаживания $P_y = 100...500$ Н, подача $s = 0,03...0,16$ мм/об., относительный градиент первого главного напряжения $G = 0,43...2,51$ мм.

Для гладких образцов $\bar{G}_0 = 0,5\text{ мм}^{-1}$ ($d = 7,5$ мм и $r = 10$ мм).

Испытания на усталость проводились на электромагнитной установке в режиме резонансных колебаний ($\nu = 310...320$ Гц) при плоском знакопеременном изгибе консольно закрепленного образца и чистом изгибе с вращением на машине МВП-10000 ($\nu = 50$ Гц). Для каждой партии (10...12 образцов) определяли пределы выносливости упрочненных образцов σ_{-1}^y и исходных образцов для вероятности разрушения $P = 50\%$ [1, 2]. Фрагмент результатов испытаний на усталость и значения факторов представлен в табл. 1.

Моделирование коэффициента упрочнения осуществлялось с помощью двухслойного перцептрона [7–9], первый слой которого содержал 4 нейрона, а второй — 1 нейрон. Все нейроны имели сигмоидную функцию активации $\psi(x) = 1/(1 + e^{-x})$.

На входы НС подавались значения факторов, а на выход — коэффициента упрочнения для соответствующего образца.

В качестве целевой функции при обучении использовался минимум среднеквадратической ошибки сети для всей выборки $goal = 10^{-6}$. Обучение НС проводилось на основе алгоритма Левенберга-Марквардта. При обучении НС значение η полагалось равным 0,9, шаг обучения $\alpha_k = 0,00001$, максимальное число циклов обучения НС $epochs = 500$.

Матрица весовых коэффициентов, полученная в результате обучения НС, представлена в табл. 2. Результаты нейросетевого моделирования коэффициента упрочнения приведены в табл. 3. Здесь β^y — значение коэффициента упрочнения, получен-

Таблица 2. Матрица весовых коэффициентов НС $w_j^{(\mu,i)}$ -параметров нейросетевой модели коэффициента упрочнения

Номер входа нейрона j	Номер нейрона в слое i				Номер слоя μ
	1	2	3	4	
0	14,1894	-5,1831	-10,8277	-5,3176	1
1	-21,1447	4,6313	-0,7001	0,9456	
2	-7,8715	-3,2767	0,4041	3,4354	
3	-11,5879	35,883	6,7379	5,2636	
4	-2,8764	15,19	-1,1862	2,0939	
5	34,8108	-4,2685	0,3106	-2,1849	
6	-14,0461	11,9728	-0,4762	2,2898	
7	-1,3948	28,2757	-36,5509	19,7894	
8	-4,4415	-0,8422	-1,7184	3,4117	
9	-5,6667	-8,1141	13,0482	1,4346	
10	6,1819	-7,5646	-2,5819	-1,7134	
11	-1,5746	-10,854	-3,4903	2,2829	
12	10,664	4,4055	5,3613	-8,4166	
13	-0,7028	0,5237	-1,0671	1,2218	
14	-21,3477	15,2453	-8,8919	5,6718	
15	-0,9858	7,8709	15,4614	-2,6364	
16	0,4963	-7,2036	30,9704	0,4219	
0	-34,3184				2
1	37,3173				
2	-32,6482				
3	29,7206				
4	63,3830				

Таблица 3. Результаты нейросетевого моделирования

Номер экзем- пляра	β^y	$\beta^y_{\text{расч}}$	Номер экзем- пляра	β^y	$\beta^y_{\text{расч}}$	Номер экзем- пляра	β^y	$\beta^y_{\text{расч}}$
1	1,16	1,16	21	1,45	1,45	41	1,58	1,58
2	1,27	1,27	22	1,5	1,5	42	1,6	1,6
3	1,38	1,38	23	1,61	1,61	43	1,56	1,56
4	1,54	1,54	24	1,64	1,64	44	1,66	1,66
5	1,46	1,46	25	1,44	1,44	45	1,6	1,6
6	1,35	1,35	26	1,13	1,13	46	1,59	1,59
7	1,39	1,39	27	1,29	1,29	47	1,55	1,55
8	1,35	1,35	28	1,29	1,29	48	1,56	1,56
9	1,21	1,21	29	1,32	1,32	49	1,53	1,53
10	1,51	1,51	30	1,42	1,42	50	1,2	1,2
11	1,51	1,51	31	1,57	1,57	51	1,19	1,19
12	1,38	1,38	32	1,47	1,47	52	1,15	1,15
13	1,37	1,37	33	1,43	1,43	53	1,13	1,13
14	1,21	1,21	34	1,4	1,4	54	1,83	1,83
15	1,38	1,38	35	1,48	1,48	55	1,75	1,75
16	1,38	1,38	36	1,52	1,52	56	1,23	1,23
17	1,38	1,38	37	1,48	1,48	57	1,22	1,22
18	1,37	1,37	38	1,49	1,49	58	1,39	1,39
19	1,33	1,33	39	1,45	1,45	59	1,35	1,35
20	1,27	1,27	40	1,6	1,6			

ное экспериментально; $\beta^y_{\text{расч}}$ — расчетное значение, полученное с помощью НС. Время обучения НС составило 106,7 с, количество затраченных циклов обучения — 3,39, среднеквадратическая ошибка $9,94262 \cdot 10^{-7}$.

Высокая точность, обеспечиваемая при моделировании коэффициента упрочнения на основе НС, позволяет рассчитывать предел выносливости лопаток на стадии разработки технологического процесса по формуле $\sigma_{-1} = \sigma_{-1} / \beta^y$. Результаты моделирования коэффициента упрочнения лопа-

ток ГТД на основе НС являются вполне приемлемыми для применения на практике.

1. *Богуслаев В. А., Яценко В. К., Притченко В. Ф.* Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. — Киев: рукопись, 1993. — 333 с.
2. *Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием* / В. К. Яценко, Г. З. Зайцев, В. Ф. Притченко и др. — М.: Машиностроение, 1985. — 232 с.
3. *Дубровин В. И.* Идентификация и оптимизация сложных технических процессов и объектов. — Запорожье: ЗГТУ, 1997. — 92 с.
4. *Дубровин В. И., Субботин С. А.* Нейросетевое моделирование и оценка параметров нелинейных регрессий / Сб. докл. 6-й Всерос. конф. «Нейрокомпьютеры и их применение», Москва. 16–18 февраля 2000. — М.: Издат. предпр. ж-ла «Радиотехника», 2000. — С. 118–120.
5. *Dubrovin V. I., Subbotin S. A.* Choice of neuron transfer functions and research their influence for learning quality of neural networks / Proc. of Intern. con. on modern problems of telecommunications, computer science and engineers training TCSET'2000. — Lviv-Slavsko, 2000. — P. 114–115.
6. *Адаменко В. А., Дубровин В. И., Субботин С. А.* Диагностика лопаток авиадвигателей по спектрам затухающих колебаний после ударного возбуждения на основе нейронных сетей прямого распространения // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — 2000. — № 1. — С. 91–96.
7. *Дубровин В. И., Субботин С. А.* Обобщенный градиентный алгоритм обучения многослойных нейронных сетей // Электротехніка та електроенергетика. — 2000. — № 1. — С. 17–22.
8. *Дубровин В. И., Субботин С. А.* Нейросетевая диагностика лопаток энергетических установок // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Сб. матер. XII науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов / Под ред. проф. В. Н. Азарова. — М.: МГИЭМ, 2000. — С. 240–242.
9. *Дубровин В. И., Субботин С. А.* Диагностика на основе эвристических алгоритмов в условиях ограниченного объема обучающей выборки // Proc. of Internat. conf. «Soft computing and measurement» SCM-2000, 27–30 June 2000. — Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State Electrotechnical University (LETI), 2000. — CD-ROM.

Запорож. гос. техн. ун-т

Поступила в редакцию
22.02.2001

Окончание. Начало на с. 32.

6. *Кір'яни В. И.* До подовження терміну експлуатації магістральних трубопроводів, які відпрацювали свій нормативний строк. — Механіка і фізика руйнування будів. матер. та конструкцій. — Вип. 3. — 1998. — С. 21–24.
7. *Слоистое, слоисто-хрупкое и слоисто-вязкое разрушение сварных соединений* / В. С. Гиренко, А. В. Бернацкий, М. Д. Рабкина, Н. П. Коржова // Пробл. прочности. — 1987. — № 3. — С. 70–76.
8. *Crack opening displacement (COD) testing.* BS 5762:1979.
9. *Сиратори М., Миёси Т., Мицусита Х.* Вычислительная механика разрушения. — М.: Мир, 1986. — С. 71.
10. *Гиренко В. С., Дядин В. П.* Корреляция характеристик трещиностойкости материалов и сварных соединений с резуль-

- татами стандартных механических испытаний // Автомат. сварка. — 1990. — № 6. — С. 1–4.
11. *Гиренко В. С., Дядин В. П.* Зависимости между ударной вязкостью и критериями механики разрушения δ_{ic} , K_{1c} конструкционных сталей и их сварных соединений // Там же. — 1985. — № 9. — С. 14–15.
12. *Гиренко В. С., Дядин В. П.* Зависимости между ударной вязкостью и критериями механики разрушения конструкционных материалов и их сварных соединений // Там же. — 1986. — № 10. — С. 61–62.
13. *Phaal R., Madnald K. A., Brown P. A.* Correlations between fracture toughness and charpu impact energy. — 1993, Dok. 5605/7/93.

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

Поступила в редакцию
14.05.2001

СИЛОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КРАНА С ПУТЯМИ. СТАТЬЯ 4. ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТИ УСТАНОВКИ КОЛЕС НА ДВИЖЕНИЕ КРАНА

О. А. ЕМЕЛЬЯНОВ, В. П. ШЕПОТЬКО, С. В. ЛУБЕНЕЦ, Ю. В. ПИХОТА

Кривая распределения, характеризующая достигаемую в практике точность установки колес в конструкцию моста, показана на рис. 1. Из рисунка видно, что только 55 % колес имеют угол перекоса $\alpha \leq 0,002$, допустимый по нормативам (ГОСТ 24378–80), 12 % — $\alpha \leq 0,0005$, допустимый по нормам (ГОСТ 7131–64) и 4 % — $\alpha = 0,005... 0,006$, для которых по кривым упругого скольжения коэффициент трения может составлять $f = 0,30... 0,37$.

Интересен тот факт, что около 50 % кранов, находящихся в эксплуатации, имеют повреждения в местах установки колес в концевые балки, т. е. в процентном отношении столько же, сколько составляет количество колес, имеющих перекося в горизонтальной плоскости, недопустимый ГОСТом.

Для анализа кинематики движения рассмотрим обычный четырехколесный кран. Предположим, что углы перекося колес одинаковы, и определим количество возможных комбинаций их взаимного расположения на мосту (рис. 2) — оно составляет 81. Из-за обилия комбинаций довольно сложно проанализировать силовую и кинематическую анализ движения кранов, а следовательно, и горизонтальных поперечных реакций, действующих на мост.

Попробуем упростить задачу с помощью теории упругого скольжения. Очевидно, что при установке на мост колесо может иметь только одно из трех основных положений — точное, углом вперед и назад (рис. 3). При точной установке колеса в мост наличие поперечных распорных сил при движении кранов не наблюдается, в случае установки углом вперед появляется поперечная сила скольжения, направленная вправо, а при установке углом назад она направлена влево.

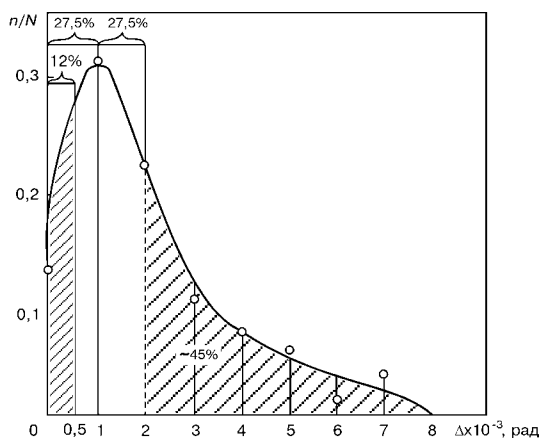


Рис. 1. Плотность распределения значений углов перекося ходовых колес в горизонтальной плоскости: Δ — угол перекося; N — общее количество обследованных колес; n — число колес с перекосям Δ_i .

В каждом четырехколесном кране имеется две пары колес с двумя параллельными осями. Вдоль каждой из осей равнодействующая поперечных сил скольжения может быть равна нулю, направлена вправо или влево. В случае нулевого варианта кран движется свободно, без прикасания реборд к рельсам.

Если вдоль обеих осей силы направлены в одну сторону, то имеет место одностороннее прижатие реборд колес к рельсам, если в разные — будет диагональный перекося моста.

Как показал анализ (см. рис. 3), все из 81 варианта взаимного перекося колес можно сгруппировать в три отдельные группы сочетаний, которые соответствуют трем видам движения крана по рельсам — свободному, одностороннему и диагональному. Наблюдения за движением кранов в эксплуатации подтверждают достоверность этих выводов [1–3].

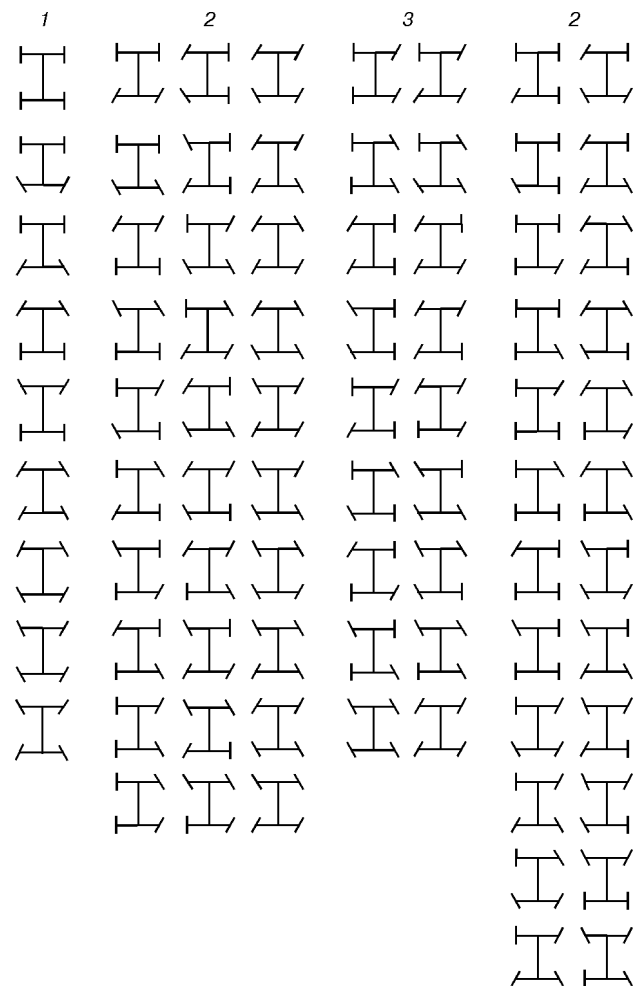


Рис. 2. Варианты взаимного расположения перекосянных колес на четырехколесном кране.

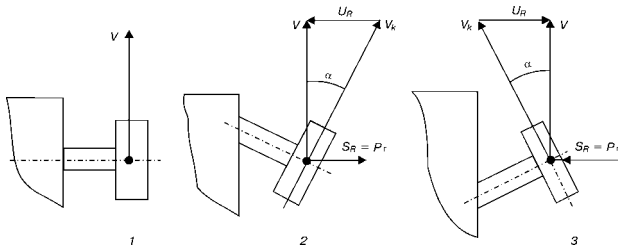


Рис. 3. Основные виды установок колес на мосту: 1 – без перекоса; 2 – углом вперед; 3 – углом назад.

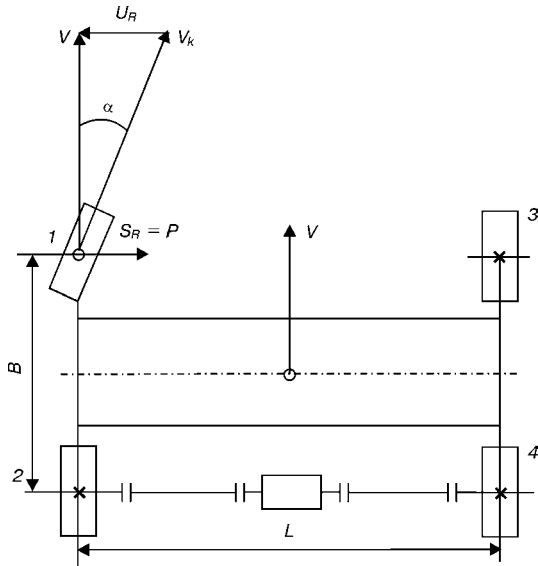


Рис. 4. Четырехколесный кран с перекошенным колесом 1.

Из сказанного выше следует, что каждая пара колес с общей осью в поперечном сечении будет иметь свою равнодействующую силу, значение и направление которой можно определить следующим образом.

Рассмотрим четырехколесный кран (рис. 4). До упора любого из колес 1 и 3 ребордой в рельс колесная пара 1 и 3 перемещается параллельно-поступательно со скоростью V , постепенно смещаясь при этом вправо. После упора ребордой в рельс любого из колес 1 и 3 дальнейшее смещение крана вправо прекращается. Угол диагонального поворота моста при таком смещении зависит от базы крана B и суммарного зазора рельс–реборда и может увеличивать перекос набегающего колеса 1. Определим угол дополнительного перекоса.

Отношение величин B/L для мостовых кранов выбирается в пределах $B/L = 1/7 \dots 1/5 = 0,143 \dots 0,200$, где B – база; L – пролет моста. При $B/L = 1/8 = 0,125$ происходит заклинивание крана при его движении по рельсам. Для $B/L = 0,2$ угол перекоса моста при диагональном развороте определяется следующим образом. Если $B = 0,2L$, а максимальный зазор между ребордой и рельсом составляет 30 мм, тогда $\alpha_1 = 0,03/B = 0,03/0,2L$, то при минимальном значении $L = 16,5$ м $\alpha_1 = 0,03/0,2 \times 16,5 = 0,009$.

Наибольший, допускаемый нормами угол перекоса составляет 0,002. При этом суммарное значение угла набегания равно $\alpha = 0,009 + 0,002 = 0,011$.

Донбас. гос. машиностроит. акад.

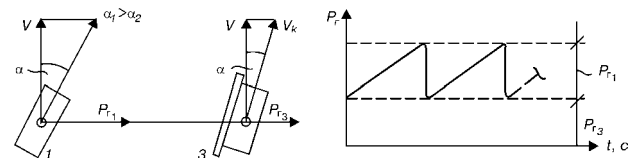


Рис. 5. График изменения силы прижатия колеса 3 (оба колеса 1 и 3 имеют перекосы в горизонтальной плоскости с углами α_1 и α_2 по часовой стрелке).

При угле перекоса $\alpha = 0,011$ упругое смещение достигает почти максимального значения, а коэффициент трения по кривой упругого скольжения составляет $f = 0,49 \approx 0,5$.

В случае упора в рельс наружной реборды колеса 1 сила прижатия в контакте $P_r = 0,5 P_B$ – вертикальная нагрузка на колесо, а распорная сила в пролете $F = 0$.

Если в рельс упирается внутренняя реборда колеса 3, то сила его прижатия в месте контакта и распорная сила в пролете моста изменяются по пилообразному закону в пределах от $P_r = 0$ до $P_r = 0,5 P_B$ (если не учитывать других возможных факторов).

Если колесо 3 имеет такой же перекос, что и колесо 1, а в рельс упирается внутренняя реборда колеса 3, то сила его прижатия в месте контакта изменяется по кривой (рис. 5), которая получается силовым замыканием от силы скольжения колеса 3, т. е. P_{r3} , вызванной его перекосом на угол α_3 и дополнительным давлением распорной силы P_r по пилообразному закону. Отсюда

$$P_{3\max} = P_{r_{\max}} + P_{r_{\max}}$$

Аналогичным образом, задав значение углов перекоса и их направление для любой пары колес, можно определить силы поперечного скольжения, действующие на кран.

Выводы

1. Количество крановых колес, имеющих точность установки в мост, недопустимую по нормативам, достигает $\approx 50\%$, что говорит о тесной корреляционной связи с количеством крановых мостов, имеющих усталостные повреждения металлоконструкции в местах установки колес. Последнее составляет $\approx 50\%$ от общего количества кранов.

2. В условиях эксплуатации наблюдается только три вида движения кранов по рельсовым путям – свободное (нормальное) и с односторонним или диагональным прижатием (нежелательные).

1. Емельянов О. А. Мостовые краны // Сварные строительные конструкции: Справочник. – Киев: Наук. думка, 1997. – Т. 2. – С. 619–673.
2. Пайер Г., Шеффлер М., Кильхорн Х. Грузоподъемные краны. – М.: Машиностроение, 1981. – Т. I. – 215 с.
3. Силовое взаимодействие грузоподъемных кранов с путями / О. А. Емельянов, В. Ф. Задирака, и др. / Крамат. индустр. ин-т. – Краматорск, 1986. – 46 с. – Деп. в УК-РНИИТИ 08.01.87, УК 87.

Поступила в редакцию
02.06.2000

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕНТГЕНОВСКИХ СНИМКОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

А. Э. КАПУСТИН, И. И. БАРДУСОВА, М. М. ДЕЧКО

Качество снимков, получаемое в рентгеновской и гаммаграфической дефектоскопии, определяется параметром оптической плотности. Снимки регламентируются ГОСТ 7512–82 и должны иметь оптическую плотность не менее 1,5. Данное значение устанавливает порог оптической плотности, начиная с которого плотность почернения пленки имеет линейную зависимость от логарифма времени экспозиции [1]. Некоторые зарубежные стандарты требуют получения снимков с оптической плотностью не менее 2,0. При ее приближении к значению $D = 4,0$ наблюдается резкое отклонение от линейной зависимости плотности почернения от логарифма времени экспозиции H_s (рис. 1). Тем не менее требования стандартов не регламентируют максимальное значение оптической плотности снимка. Данный материал посвящен изучению оптической плотности снимков и оценке искажений изображения.

Для анализа авторами были взяты из разных аттестованных дефектоскопических лабораторий 110 снимков, выполненных на различных видах применяемых в Республике Беларусь пленок. Снимки были специально отобраны по значениям оптической плотности основного фона металла в диапазоне от 1,0 до 4,0. Оптические характеристики снимков были получены при помощи денситометра с пределом измерений оптической плотности до 4,0 и погрешностью $\pm 0,02$. Оценка искажений, имеющих на снимке, выполнена на основании оптических и геометрических характеристик канавочно-эталона чувствительности и основного фона металла. Все данные обработаны по эталонам чувствительности второго типа, геометрические параметры которого регламентированы ГОСТ 7512–82.

На качественно выполненном снимке оптические плотности канавок эталона чувствительности должны изменяться пропорционально и коррелировать с плотностями основного фона металла и основного фона эталона. В случае нарушения технологии получения снимков данные зависимости соблюдаться не будут. Причины искажений изображения могут быть различны и связаны с несо-

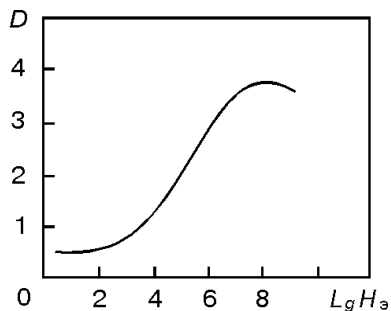


Рис. 1. Характеристическая кривая оптической плотности пленки.

© А. Э. Капустин, И. И. Бардусова, М. М. Дечко, 2001

людением технологии как просвечивания, так и проявления. Искажения на выбранных снимках оценивались по разности измеренной и расчетной оптической плотности канавок эталона чувствительности. Расчетная оптическая плотность D_p вычислялась из отношения толщины металла канавки t к высоте эталона H и разности плотностей общего фона металла D_m и общего фона эталона D_s :

$$D_p = D_m - (D_m - D_s) t/H. \quad (1)$$

По снимкам, выбранным для анализа, были рассчитаны отклонения Δ измеренных оптических плотностей канавок эталона чувствительности D_n от расчетных D_p , предполагающих пропорциональную зависимость:

$$\Delta = |D_n - D_p|. \quad (2)$$

На рис. 2 приведены отклонения расчетных значений плотностей от измеренных для 5-й канавки эталона чувствительности. Аналогичную картину дают данные и для 1–4-й канавок. Данные по 6-й канавке не анализировали ввиду нестабильности ее отображения на снимках. Из рис. 2 видно, что нет очевидной зависимости отклонений Δ от оптических плотностей канавок эталона чувствительности D_n , что подтверждает невысокий коэффициент линейной корреляции между указанными величинами: $k = 0,4$ [2].

Для оценки качества изображения введем коэффициент порога искажений

$$K_n = D_s - D_m/D_m, \quad (3)$$

где D_s , D_m — оптическая плотность соответственно основного фона эталона в зоне минимально видимой канавки и фона основного металла снимка.

Эталон чувствительности выбран в качестве базы для оценки искажений как стандартизированная величина с заведомо известными размерами.

На рис. 3 представлен график отклонений оптических плотностей Δ в зависимости от K_n для 5-й канавки эталона. Видно, что он носит нелинейный характер, характеризующийся значительным возрас-

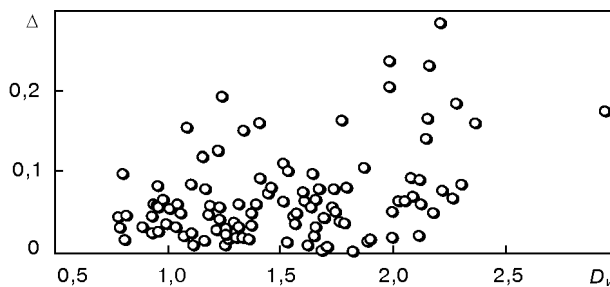


Рис. 2. Отклонения полученных оптических плотностей от измеренных для 5-й канавки эталона в зависимости от измеренной оптической плотности.

Оптические характеристики снимков с коэффициентом порога искажений $K_n > 0,3$

Оптическая плотность		Коэффициент порога искажений K_n
фона основного металла D_m	эталона чувствительности D_n	
1,09	0,76	0,305
1,32	0,91	0,309
1,34	0,92	0,312
3,38	2,32	0,314
1,66	1,14	0,315
2,57	1,71	0,334
1,76	1,17	0,336
2,06	1,36	0,340
1,44	0,95	0,342
1,46	0,96	0,342
3,20	2,07	0,352
1,92	1,21	0,369
1,48	0,93	0,370
1,51	0,94	0,376
3,61	2,20	0,391
1,98	1,20	0,394
3,72	2,21	0,406
3,33	1,96	0,411
3,60	2,11	0,414
1,91	1,12	0,415
2,39	1,37	0,426
2,27	1,30	0,428
3,38	1,91	0,435
1,41	0,78	0,447
1,96	1,07	0,453
3,08	1,67	0,458

танием отклонений при $K_n > 0,3$. Аппроксимация полученной зависимости квадратичной функцией вида

$$D = 0,0115 + 0,784K_n^2 \quad (4)$$

дает коэффициент корреляции $k = 0,7$, что позволяет говорить о наличии более тесной связи отклонений Δ с коэффициентом K_n , чем с измеренной оптической плотностью снимка D_n . Аналогичную картину дают данные для 1–4-й канавок эталона чувствительности. На рис. 4 показаны отклонения оптических плотностей 1–5-й канавок по всем анализируемым снимкам, отсортированным по возрастанию K_n . Наблюдается тенденция синхронного изменения минимальных и максимальных отклонений оптической плотности по всем пяти канавкам.

Как видно из таблицы, где приведены характеристики оптической плотности снимков, имеющих $K_n > 0,3$, значительные искажения могут быть при разных значениях оптической плотности снимков в интервале от 1,1 до 3,7, включая и установленное ГОСТом пороговое значение 1,5.

Таким образом, коэффициент K_n более полно характеризует уровень качества получаемого снимка, чем оптическая плотность фона основного металла, так как учитывает нелинейность плотности почернения изображения дефектометра. Поэтому

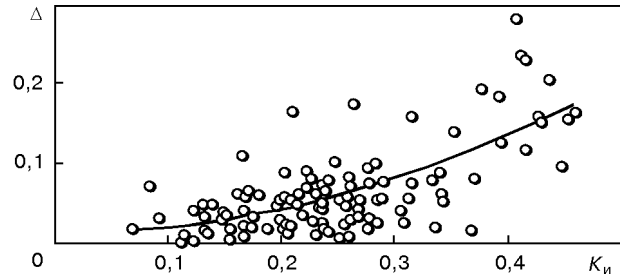


Рис. 3. Отклонения полученных значений оптических плотностей от измеренных для 5-й канавки эталона в зависимости от коэффициента порога искажений K_n .

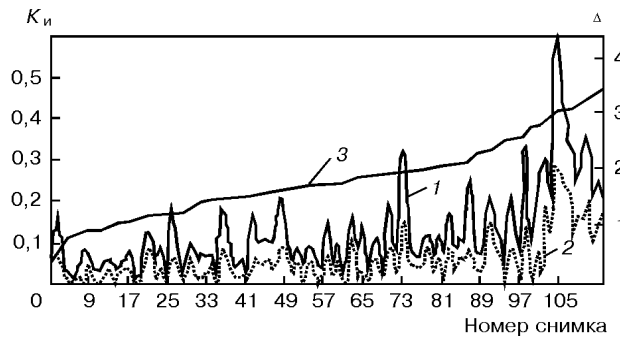


Рис. 4. Отклонения расчетных оптических плотностей канавок эталонов (1 — максимальные; 2 — минимальные) и расчетные значения коэффициента K_n (3).

этот параметр может быть рекомендован в качестве еще одного критерия оценки качества снимков в дополнение к вышеупомянутому ГОСТ 7512–82. Критическое значение K_n , выше которого качество снимков следует считать неудовлетворительным, можно выбирать исходя из допустимого уровня отклонений. Так, например, если для рассматриваемой нами 5-й канавки принять допустимую относительную погрешность между измеренным и расчетным значением оптической плотности, равную 5 %, то при среднем значении измеренной плотности 1,5 в нашем эксперименте Δ должна быть не менее 0,075. Отсюда, решив уравнение (4), получим пороговое значение $K_n = 0,285$. Поэтому можно рекомендовать для большинства практических случаев $K_n < 0,3$.

С точки зрения практического использования критерия K_n для оценки снимков сварных швов труб небольшого диаметра необходимо при просвечивании располагать эталон вдоль трубы без накладки его на зону шва. Данные должны сниматься по одной горизонтальной линии вдоль изображения трубы без смещения по вертикали. Методика расчета K_n не зависит от типа применяемого эталона.

Использование предлагаемой методики для оценки качества полученных снимков позволит без дополнительных затрат проводить их отбраковку и максимально исключить ошибки в оценке сварных соединений дефектоскопистами.

1. Методы дефектоскопии сварных соединений / В. Г. Щербинский, В. А. Феоктистов, В. А. Полевик и др. — М.: Машиностроение, 1987. — 254 с.
2. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул. — М.: Высш. шк., 1982. — 224 с.

ОБЗОР: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РАДИОГРАФИЧЕСКИЕ ПЛЕНКИ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Н. Г. БЕЛЫЙ

Ин-т электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины
тел.: (044) 261-56-63

А. В. ПАВЛИЙ

Научно-производственная фирма
«Диагностические приборы»
тел.: (044) 484-70-33,
484-03-69

Повышение требований к качеству промышленной продукции обуславливает применение современных технологий технической диагностики (ТД) и неразрушающего контроля (НК). В последнее время в нашей стране появилась устойчивая тенденция к оживлению промышленного производства и вследствие острой конкуренции на промышленных рынках Украины и других стран интерес потребителей к продукции предприятий все больше зависит от ее качества и надежности. В свете этого эффективное использование методов НК качества продукции становится одним из важных моментов достижения конкурентоспособности отечественных промышленных предприятий как на внутреннем, так и на внешних рынках. Как известно, одним из наиболее

эффективных и относительно недорогих методов НК является радиография. Общая схема процесса радиографического метода показана на рисунке, где 1 — источник излучения; 2 — рентгеновское или гамма-излучения; 3 — объект контроля; 4 — кассета с пленкой и усиливающими экранами.

Сущность радиографии заключается в просвечивании контролируемого объекта ионизирующим излучением и последующем анализе формы, размеров и расположения внутренних дефектов (неоднородностей) по их теневому изображению, полученному в результате фотографического преобразования скрытого радиационного изображения в видимое. Метод основан на свойстве рентгеновского и гамма-излучения вызывать почернение эмульсии пленки.

Применение радиографии. Сварные швы контролируются на предмет выявления трещин, непроваров, металлических и неметаллических включений, а также выявление наружных дефектов (утяжин, превышений проплава), недоступных для обнаружения при внешнем осмотре.

Также выявляются следующие типы дефектов в слитках, отливках черных и цветных металлов: газовые и усадочные раковины, земляные и шлаковые включения, трещины, спаи.

Радиографические пленки. Одним из важнейших элементов системы радиографического НК является радиографическая пленка как носитель информации об объекте контроля (ОК) и по сути протокол контроля. Фактически наличие «фотографии» ОК выгодно отличает радиографию от других методов НК.

На сегодняшний день в нашей стране используется достаточно большая номенклатура радиографических пленок различных производителей. Наибольшее распространение получила продукция следующих торговых марок:

- ✓ КОДАК ИНДАСТРЕКС (производитель — фирма КОДАК, США-Франция)
- ✓ АГФА СТРУКТУРИКС (производитель — фирма АГФА-Геварт, Бельгия)
- ✓ ФУДЖИ (производитель Фуджифильм, Япония)
- ✓ Пленки серии РТ (Шосткинское ПО «СВЕМА», Украина)
- ✓ ФОМАДУКС/ИНДУКС (ФОМА-Бохемия, Чехия)

Также используется продукция Казанского ПО «ТАСМА» и продукция завода Стерлинг-Украина. Последний предлагает на рынок дентальную пленку для технических целей.

Ниже приведена сравнительная табл. 1 соответствия различных радиографических пленок согласно международной классификации по EN 584-1.

Данная таблица позволяет определить примерное соответствие пленок при замене одного типа другим. Однако, не следует считать, что опираясь на приведенные данные можно при одних и тех же параметрах контроля добиться полного соответствия результатов. В любом случае режимы следует подбирать в каждом конкретном случае. Так, потребители, использующие пленку АА4000 вместо пленки СТРУКТУРИКС D7 лишь после отработки технологии контроля смогли добиться результатов, превосходящих результаты предыдущих исследований (меньшая

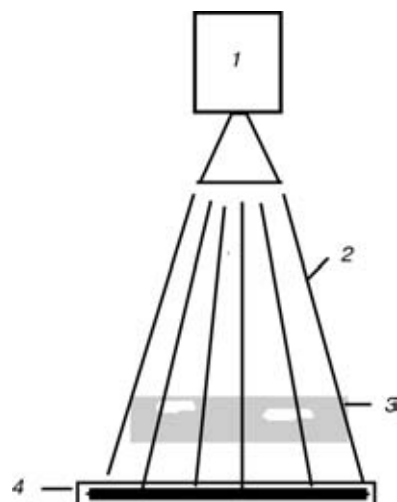


Таблица 1

Классификация по EN	КОДАК ИНДАСТРЕКС	Пленки РТ	АГФА СТРУКТУРИКС	ФОМАДУКС	ФУДЖИ
C6	CX	РТ-1	D8, FD8, F8	R8, RX	Ix400
C5	AA400	РТ-4	D7	R7	Ix150
C4	T200	(РТ-К)	D5	R5	Ix100
C3	MX125	РТ-5	D4	R4	Ix80
C2	M, M100	—	D3, D2	—	Ix50

Примечание. Для пленок РТ дано примерное соответствие.

зернистость, лучше контраст и, как следствие, большая выявляемость дефектов).

Для перехода от пленки одного класса чувствительности к пленке другого класса требуется изменение экспозиции, компенсирующее изменение чувствительности. Рассмотрим схему перехода на примере радиографических пленок фирмы КОДАК. Относительный фактор экспозиции для пленки АА400 принят равным единице (табл. 2).

Таблица 2

Излучение	СХ	АА400	Т200	МХ125	М100	М
50...150 кВ	0,65	1	1,6	2,9	4,1	3
220 кВ	0,65	1	1,7	2,8	4,5	3,5
Ir^{192}	0,65	1	1,9	3,1	5,4	4,4
Co^{60} и высокоомощные энергетические установки	0,65	1	1,9	3,3	6,3	5,1

Примечание. Данные приведены для случая автоматической обработки пленки, процессор В2000, 8 мин. Температура 26°С. При обработке в других режимах коэффициенты могут незначительно отличаться.

Экспозиция для новой пленки рассчитывается по формуле: $E_{np} = E_{sp} * (K_{эн}/K_{эс})$, где E_{np} — экспозиция новой пленки; E_{sp} — экспозиция старой пленки; $(K_{эн}/K_{эс})$ — отношение коэффициентов новой и старой пленок из таблицы. Так, при переходе от работы с пленкой АА400 к работе с пленкой СХ, если для АА400 требовалась экспозиция (используется Ir^{192}) 2 Ки/ч, то экспозиция для СХ: $E_{np} = 2 * (0,65/1) = 1,3$.

Упаковка пленок. Производители, особенно зарубежные, предлагают достаточно большой выбор упаковки пленки. Кратко остановимся на тех типах упаковок, которые нашли применение в Украине.

NIF — самый недорогой тип упаковки. Пленка упакована в пакеты из термозапающей фольги или в специальный полиэтилен, не переложена бумагой. Пакеты транспортируются в картонных коробках. В пакете 100 листов.

INT — пленка упакована в конверты, переложена бумажной прокладкой. Упаковка — 100 или 50 листов.

Leadpack Roll (Pb-rollpack)-рулоны со свинцовыми экранами (свинцовая фольга толщиной 25 или 27 мкм). Длина рулона 100 (или 90) м, ширина 60, 70, 100 мм. Эта упаковка удобна при контроле сварных швов, особенно, если работы ведутся на трубопроводах с панорамным просвечиванием.

Pb contactpak — листы упакованы в вакуумную герметичную упаковку со свинцовыми экранами (свинцовая фольга толщиной 25 или 27 мкм). Упаковка непроницаема для воды, масла, воздуха. Гарантирует наилучший контакт экранов с пленкой, и, как следствие, достижение наилучшего качества снимка.

Обработка экспонированных пленок. Возможен автоматизированный процесс в проявочном автомате или традиционный ручной в кюветах, в танках. Используются метол-гидрохиноновые, а также фенидонгидрохиноновые проявители. Изготовители, как правило, не раскрывают химический состав концентратов, предлагаемых для обработки пленок. Для ручного процесса обработки наибольшее распространение получили концентраты проявителя КОДАК Industrex manual developer, концентрат фиксажа Industrex manual fixer, концентрат проявителя АГФА G128, концентрат фиксажа — АГФА G328, концентрат проявителя FOMADUX-LPT, концентрат фиксажа FOMAFIX, концентрат проявителя FUJI SUPERDOL-1, а также отечественные сухие наборы реактивов — проявитель «РЕНТГЕН-2» и фиксаж «БКФ».

Жидкие концентраты поставляются в пятилитровых канистрах, предназначенных для приготовления 20...25 литров готового раствора. Таким количеством раствора можно обработать примерно 24 м² пленки. Это 200 листов пленки формата 30×40 см. Изготовители пленки рекомендуют использовать реактивы их производства.

** Все зарегистрированные торговые марки и товарные знаки являются собственностью их обладателей.*

1. Клюев В. В., Соснин Ф. Р. Теория и практика радиографического контроля. — М.: Машиностроение, 1998. — 170 с.
2. Kodak Industrex Films and Products. Kodak Industrex (2000) (информационный проспект).
3. Kodak Pb CONTACTPAK (информационный проспект).
4. Kodak Industrial Radiography Data Guide 2000 Edition. By C.D. Hillyard (информационный проспект).
5. Рентгеновские пленки АГФА СТРУКТУРИКС: описание и тех. характеристики (1997) (информационный проспект).
6. FUJIFILM IX. Промышленная рентгеновская пленка (информационный проспект).
7. Рентгеновские пленки ФОМАДУКС: описание и тех. характеристики (информационный проспект).

НПФ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

тел./факс: (38 044) 484-70-33 484-03-69

**приборы для дефектоскопии
рентгенографические пленки
пенетранты**

8. Неразрушающий контроль. Спецификатор различий в национальных стандартах разных стран / Под ред. В. Кершенбаума, — М.: Союз научных и инженерных обществ СССР, 1992. — 236 с.