

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

№ 4, 2002

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

Издается с января 1989 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

ДОЛИНСКИЙ В. М., ЧЕРЕМСКАЯ В. И. Несущая способность овалных цилиндрических обечаек	3
МАКОВСКИЙ А. М., ЛУКЬЯНОВ И. А., РЕДЬКО К. Н., КОЖЕВНИКОВ Б. П., КУРИННОЙ Е. Е., РУСИНОВ А. А., СКРЫПНИК П. С. Диагностирование грузоподъемных кранов при автоматизированном учете их технического состояния	6
БЕЖЕНОВ С. А. Прогнозирование долговечности деталей машин методом акустической эмиссии	9

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

ТРОИЦКИЙ В. А., ШЕВЧЕНКО И. Я., ФЕДОРЯКА П. В., БОРОВИКОВ А. В., НЕГЛЯД В. Н. Совершенствование методов и оборудования для неразрушающего контроля труб в процессе их производства	14
ЗЫБОВ В. Н. Одноканальные устройства для двухчастотного метода контроля	18
КОШЕВОЙ В. В., ЛЕВИЦКИЙ О. Е., ЛОЗИНСКИЙ А. Б. Метрологические исследования канала временных измерений УЗ томографа UST-2000	24
МЕДВЕДЬК О. В., СЛОБОДЯН Б. В., СЫСА Л. В., ЯВОРСКИЙ Г. А. Оценка степени коррозионной агрессивности грунтов на участках прохождения трубопроводов по комплексному физико-химическому критерию	32
ПОРЕВ В. А. Телевизионная пирометрия	36
СТОРОЖЕНКО В. А., МЕШКОВ С. Н., ГАПТРАКИПОВ А. А. Расчет оптимальных конструкционных параметров источников теплового возбуждения для активного теплового неразрушающего контроля	40
ЗАДОРЖНЫЙ Ю. Г., ДЕРКАЧ А. Л., СКОРИНА М. Н. Применение алгоритма «нелинейного» порога срабатывания в технологии детектирования металла арочными металлодетекторами	42
ТАРАРЫЧКИН И. А. Принципы рационального построения систем контроля и управления сварочными процессами	44
КИЯШКО Л. А., МУРЗИН Л. М. Особенности методики контроля качества сварных изделий в условиях ремонтных предприятий	48
НЕВЗЛИН Б. И. Повышение точности контроля влажности угля	50
БЕЛЫЙ Н. Г., ПАВЛИЙ А. В. Радиографическая пленка фирмы KODAK типа INDUSTREX CX	51

ХРОНИКА

ШЕКЕРО А. Л. Ялта собирает специалистов по НК на юбилейную конференцию	53
Юбилейная выставка «Гервикон-2002» — оценка прошлого, взгляд в будущее	56
III Международная выставка «Дефектоскопия-2002» и XVI Российская научно-техническая конференция «Неразрушающий контроль и диагностика»	58

РЕКЛАМА	62
---------------	----

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. Шведа,
И. Я. Шевченко,
А. В. Шимановский

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

Н. Г. Белый, А. А. Грузд

Редактор

Г. В. Ольшевская

Электронная верстка

И. Р. Наумова, А. И. Сулима,
Н. Н. Приймаченко,
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

№ 4, 2002

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

- DOLINSKY V.M., CHEREMSKAYA V.I.* Load-carrying capacity of oval cylindrical shells 3
MAKOVSKY A.M., LUKIANOV I.A., REDKO K.N., KOZHEVNIKOV B.P., KURINNOJ E.E., RUSINOV A.A., SKRYPNIK P. S. Diagnostics of hoisting cranes in automatic registration of their technical condition 6
BEZHENOV S.A. Forecasting the fatigue life of machine parts by the method of acoustic emission 9

NONDESTRUCTIVE TESTING

- TROITSKY V.A., SHEVCHENKO I.A., FEDORYAKA P.V., BOROVNIKOV A.V., NEGLYAD V.N.* Improvement of the methods and equipment for non-destructive testing of pipes during their manufacturing 14
ZYBOV V.N. Single-channel devices for a two-frequency control method 18
KOSHEVOJ V.V., LEVITSKIY O.E., LOZINSKY A.B. Metrological studies of the time measurement channel of UT tomograph UST-2000 24
MEDVEDYK O.V., SLOBODYAN B.V., SYSA L.V., YAVORSKY G.A. Evaluation of the degree of corrosion aggressiveness of soils in the sections of pipeline route by an integrated physico-chemical criterion 32
POREV V.A. TV pyrometry 36
STOROZHENKO V.A., MESHKOV S.N., GAPTRAKIPOV A.A. Calculation of optimal design parameters of thermal excitation sources for active thermal non-destructive control 40
ZADOROZHNY YU.G., DERKACH A.L., SKORINA M.N. Application of an algorithm of a «non-linear» operating threshold in the technology of metal detection with arc metal detectors 42
TARARYCHKIN I.A. Principles of rational design of systems of monitoring and control of welding processes 44
KIYASHKO L.A., MURZIN L.M. Features of the procedure of quality control of welded products under conditions of repair productions 48
NEVSLIN B.I. Improvement of accuracy of monitoring the humidity of coal 50
BELY N.G., PAVLII A.V. X-ray film of KODAK company of INDUSTREX CX type 51

NEWS

- SHEKERO A.L.* Yalta brings together NDT experts for a jubilee conference 53
Jubilee Exhibition «Hervicon – 2002» — assessment of the past, looking into the future 56
IIIrd International Exhibition «Defectoscopy-2002» and XVI Russian Science-Technology Conference «Non-Destructive Testing and Diagnostics» 58

- ADVERTISING 62

BOARD OF EDITORS

Editor-in-Chief

B. E. Paton

A. Ya. Nedoseka (vice-chief ed.),
V. A. Troitsky (vice-chief ed.),
Z. A. Maidan (exec. secr.),
I. P. Belokur, Yu. K. Bondarenko,
V. L. Vengrinovich, E. F. Garf,
A. A. Gruzd, Yu. B. Drobot,
V. I. Ivanov, O. M. Karpash,
V. V. Klyuev, L. M. Lobanov,
A. A. Lebedev, V. K. Lebedev,
G. G. Lutsenko,
N. V. Novikov, E. S. Pereverzev,
P. P. Prokhorenko, V. P. Radko,
I. Ya. Shevchenko,
A. I. Stepanenko, V. A. Strizhalo,
A. Ya. Teterko,
V. N. Uchanin, A. F. Ulitko,
T. M. Shvets, N. N. Zatsepin,
A. V. Shimanovsky

Address:

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

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

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

Scientific editors

N. G. Belyi, A. A. Gruzd

Editor G. V. Olshevckay

Electron galley

I. R. Naumova, A. I. Sulyma,
N. N. Priymachenko,
I. V. Petushkov

State Registration Certificate
KV 4787 of 09.01.2001



НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОВАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЕЧАЕК

В. М. ДОЛИНСКИЙ, В. И. ЧЕРЕМСКАЯ

Выполнена на основе деформационной теории оценка несущей способности овальных цилиндрических обечаек с учетом физической и геометрической нелинейности. Проведено сопоставление этих результатов с результатами, полученными с помощью методов, базирующихся на основании теории предельного состояния. Показаны преимущества предложенной методики расчета, позволяющей более полно использовать резервы прочности конструкции и обосновать возможность эксплуатации сосудов с овальностью обечаек, превышающей нормативные значения.

Proceeding from the deformation theory, an estimate was derived of the load-carrying capacity of oval cylindrical shells, taking into account the physical and geometrical non-linearity. These results are compared to those, derived using the methods, based on the theory of limit state. Advantages of the proposed calculation procedure are shown, allowing a more complete use of the structure strength margin, and substantiation of the serviceability of vessels with shell ovality in excess of the standard values.

Рассмотрим сосуды, для которых основной нагрузкой является внутреннее давление. Правила [1] регламентируют предельное значение овальности обечаек $\delta = 1\%$. Анализ данных, полученных в процессе эксплуатации, показывает, что возможна безаварийная работа сосудов с овальностью, превышающей указанное значение. Оценка работоспособности сосуда при таких условиях может быть определена по РД26-6-87 [2], где приводятся коэффициенты снижения несущей способности овальных обечаек. Однако в ряде случаев расчет [2] не позволяет обосновать работоспособность успешно эксплуатируемых объектов. Поэтому нами проведены исследования, позволяющие уточнить оценку работоспособности овальных обечаек.

Консервативную оценку работоспособности овальной цилиндрической обечайки можно получить на основе теории предельного состояния бесконечного тонкостенного цилиндра с эллиптической направляющей, подверженного воздействию внутреннего давления (рис. 1).

В соответствии с теорией предельного состояния [3] несущая способность твердого тела считается исчерпанной, если действующая на него нагрузка приводит к появлению пластических шарниров, преобразующих тело в геометрически изменяемую систему. В данном случае такое состояние достигается тогда, когда пластические шарниры возникают на образующих в вершинах эллипса.

При этом выполняется условие равновесия

$$M(0, b) = -M(a, 0) + \frac{q_e(a^2 - b^2)}{2} \quad (1)$$

и условия образования пластических шарниров

$$\begin{aligned} \frac{M(a, 0)}{M_T} + \left(\frac{N(a, 0)}{N_T} \right)^2 &= 1, \\ \frac{M(0, b)}{M_T} + \left(\frac{N(0, b)}{N_T} \right)^2 &= 1, \end{aligned} \quad (2)$$

где a, b — большая и малая оси эллипса; $M(a, 0)$, $M(0, b)$, $N(a, 0)$, $N(0, b)$ — соответственно изгибающие моменты и растягивающие усилия на

осях эллипса; $N_T = R_e S$; $M_T = 0,25 R_e S^2$; $N(a, 0) = q_e a$; $N(0, b) = q_e b$; R_e — предел текучести; q_e — предельное давление среды.

Из уравнений (1), (2) получаем коэффициент снижения несущей способности обечайки

$$P_e = \frac{-\delta\gamma + \sqrt{\delta^2\gamma^2 + 1 + 0,25\delta^2}}{1 + 0,25\delta^2} \quad (3)$$

При $(0,5\delta)^2 \ll 1$ $P_e = -\delta\gamma + \sqrt{1 + \delta^2\gamma^2}$.

Здесь $P_e = \frac{q_e}{q_T}$; $q_T = \frac{R_e}{\gamma}$ — давление, соответствующее пределу текучести R_e ; $\gamma = r/S$ — коэффициент податливости цилиндрической оболочки; $\delta = 2 \frac{a-b}{a+b}$.

Зависимость (3) показана на рис. 2, а. При этом диапазон овальности принят в соответствии с [2]. На рис. 2, б представлена зависимость от величин δ и γ относительного коэффициента снижения несущей способности обечайки $P'_e = \frac{P_e}{P_e(0,01)}$, где $P_e(0,01)$ — значение коэффициента снижения несущей способности обечайки при $\delta = 1\%$.

Полученный результат (рис. 2, б) совпадает с диаграммой, приведенной в [2]. Однако известны случаи, когда приведенная оценка предельной нагрузки дает заведомо заниженные результаты и не

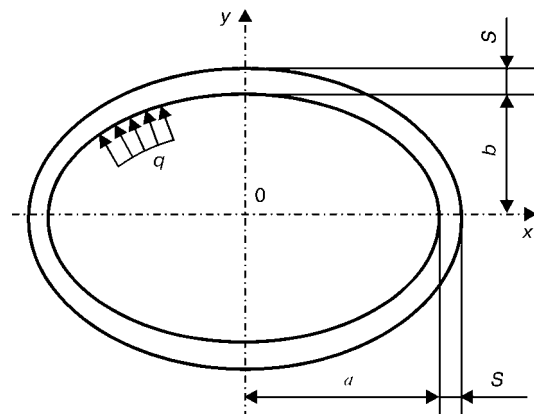


Рис. 1. Расчетная схема обечайки: S — толщина стенки; q — давление среды

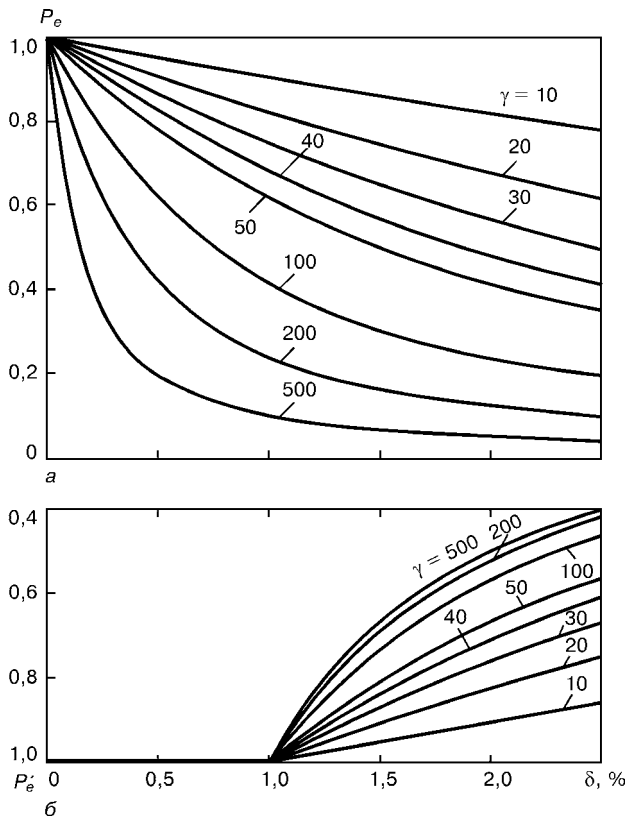


Рис. 2. Зависимости коэффициента снижения несущей способности обечайки P_e (а) и относительного снижения несущей способности P'_e (б) от овальности обечайки δ при различных γ

может оправдать практику эксплуатации сосудов. Проведенные в УкрНИИхиммаш эксперименты [4] также показали, что расчетная оценка [3] носит

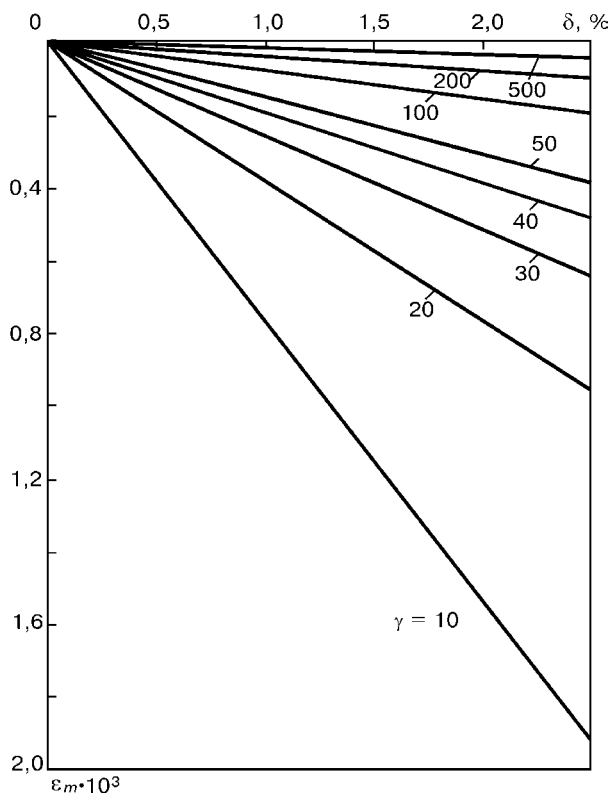


Рис. 3. Зависимости максимальных изгибных деформаций ϵ_m при рихтовке от овальности обечаек δ при различных значениях γ

консервативный характер. Объяснить это может то обстоятельство, что рассматриваемая задача является существенно геометрически (а иногда и физически) нелинейной, что не учитывалось в примененном варианте теории предельного состояния. Поэтому возможные уточнения решения следует ожидать в рамках деформационной теории, которая позволяет рассмотреть напряженно-деформированное состояние обечайки в процессе ее рихтовки под действием внутреннего давления.

Рихтовка обечайки осуществляется за счет изгибных деформаций, уменьшающих овальность и приближающих эллиптическую оболочку к круглой. Таким образом, несущая способность овальной обечайки при нагружении может возрастать. Максимальные изгибные деформации на большой оси эллипса

$$\epsilon_m = \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} \right) \frac{S}{2}, \quad (4)$$

где R, R' — радиусы кривизны эллипса соответственно до нагружения и в состоянии нагрузки, $R = b^2/a$.

Полная рихтовка обечайки достигается при $R = r$. Таким образом, максимально возможные изгибные деформации

$$\epsilon_m = \frac{1}{2\gamma} \left[\frac{1 + 0,5\delta}{(1 - 0,5\delta)^2} - 1 \right] \approx \frac{3}{4} \frac{\delta}{\gamma}. \quad (5)$$

Оценка области упругих изгибных деформаций (рис. 3) может быть получена при сравнении величины ϵ_m с предельными упругими деформациями ϵ_e или с деформациями, соответствующими образованию пластического шарнира ϵ_r :

$$\epsilon_e = \frac{R_e}{E}, \quad \epsilon_r = \frac{3}{2} \frac{R_e}{E},$$

где E — модуль Юнга.

Оказалось, что при овальности менее 2,5 % изгибные деформации при полной рихтовке обечаек внутренним давлением находятся в упругой области. Однако в процессе нагружения жесткость обечайки вследствие геометрической изменяемости последней возрастает. Поэтому полная упругая рихтовка возможна для достаточно податливых обечаек при $\gamma > 35$. Этот результат получен в рамках деформационной теории при пошаговом нагружении, что позволило учесть геометрическую изменяемость обечайки.

В соответствии с работой [5] в области упругих деформаций

$$\Delta \epsilon_i = \frac{6\gamma_0 \gamma^2 \Delta q_i}{E}. \quad (6)$$

В соответствии с работой [6] в области пластических деформаций при степенном законе деформирования материала

$$\Delta \epsilon_i = \left[(n + 2) \frac{\Delta q_i \gamma^2 \delta}{A} \right]^{-1/n}. \quad (7)$$

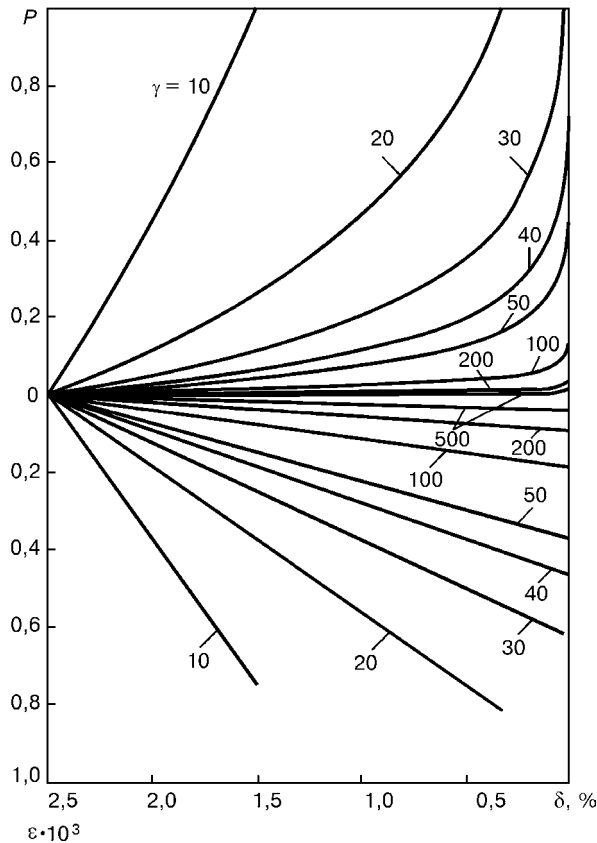


Рис. 4. Зависимости относительного давления P и изгибных деформаций ε при рихтовке обечаек от овальности δ при различных значениях γ

Здесь Δq_i , $\Delta \varepsilon_i$ — приращение давления и соответствующее ему приращение изгибных деформаций.

Величину γ определяем из соотношения

$$2\gamma_0 = 1 - \frac{a}{L} \left(\frac{f_2}{\beta^2} + f_1 - \frac{f_1}{\beta^2} \right)$$

где

$$L = \frac{\pi r}{2} \frac{64 - \frac{3}{16} \delta^4}{64 - 48\delta^2}; \quad r = \frac{a+b}{2}; \quad a = r(1 + \delta/2);$$

$$b = r(1 - \delta/2);$$

$$f_1 = \frac{1}{3B^2} [(1 + B^2)E(\pi/2, B) - (1 - B^2)F(\pi/2, B)];$$

$$f_2 = E(\pi/2, B); \quad B = \sqrt{1 - \beta^2}; \quad \beta = \frac{b}{a};$$

$F(\pi/2, B)$, $E(\pi/2, B)$ — эллиптические интегралы 1- и 2-го порядка; A , n — параметры степенной зависимости диаграммы растяжения образца.

Относительное давление P и изгибные деформации ε вычисляем следующим образом:

ОАО «УкрНИИХиммаш»,
Харьков

$$P = \frac{1}{q_T} \sum_{i=1}^k \Delta q_i, \quad \varepsilon = \sum_{i=1}^k \Delta \varepsilon_i, \quad (8)$$

где k — число ступеней нагружения.

Результаты расчетов по выражениям (6)–(8) представлены на рис. 4, из которого следует, что для жестких обечаек полная упругая рихтовка возможна при пластическом деформировании срединной поверхности обечайки. Однако уже при допусковом давлении $P[n_T]$ (здесь $[n_T]$ — допускаемый запас прочности) обечайки с исходной овальностью 2,5 % во всем диапазоне изменения геометрических параметров [7] рихтуются до овальности, не превышающей допускаемое значение [1].

Оценка работоспособности овальных обечаек при статическом нагружении может быть выполнена в соответствии с ДСТУ 4003-2000 [8]:

$$\varepsilon + \varepsilon_p \leq [\varepsilon], \quad (9)$$

где ε_p — окружные деформации растяжения срединной поверхности; $[\varepsilon]$ — допускаемые деформации.

При циклическом нагружении оценка работоспособности обечаек может быть выполнена по ГОСТ 25859-83 [9]:

$$K_\sigma \frac{E}{2} (\varepsilon + \varepsilon_p) \leq [\sigma_A], \quad (10)$$

где K_σ — эффективный коэффициент концентрации напряжений; $[\sigma_A]$ — их допускаемая амплитуда.

1. ДНАОП 0.00-1.07-94. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. — Киев: Ком. Госназдорхрантруда Украины, 1994. — 373 с.
2. РД 26-6-87. Методические указания. Сосуды и аппараты стальные. Методы расчета на прочность с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек. — М.: Минхиммаш, 1987. — 26 с.
3. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1968. — 400 с.
4. Анализ разрушений и возможности контроля состояния металла кислородных баллонов / В. М. Долинский, В. Н. Стогний, В. Г. Новик и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 4. — С. 33–36.
5. Тимошенко С. П. Сопротивление материалов. — М.: Наука, 1965. — Т. 1. — 363 с.
6. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник. В 3 т. — М.: Машиностроение. — Т. 1 / Под общ. ред. И. А. Бергера, Я. Г. Пановко. — 831 с.
7. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
8. ДСТУ 4003-2000. Сосуды и аппараты. Выбор параметров упрочняющей обработки.
9. ГОСТ 25859-83. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках.

Поступила в редакцию
07.08.2002



ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ УЧЕТЕ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

А. М. МАКОВСКИЙ, И. А. ЛУКЬЯНОВ, К. Н. РЕДЬКО, Б. П. КОЖЕВНИКОВ, Е. Е. КУРИННОЙ,
А. А. РУСИНОВ, П. С. СКРЫПНИК

Рассмотрена система автоматизированного учета технического состояния кранов, предназначенная для накопления, хранения и обработки получаемой при диагностировании информации. Техническое состояние грузоподъемного крана описывают двумя показателями — остаточным режимным ресурсом и остаточным ресурсом по фактическому состоянию (целостности) конструкций. С учетом этого на выходе системы предусмотрено получение двух указанных диагностических параметров.

The paper describes a system of automated assessment of technical condition of the cranes, designed for acquisition, storage and processing of information, derived during diagnostics. Technical condition of the hoisting crane is described by two characteristics, namely residual operating life and residual life by the actual condition (integrity) of structures. Therefore, receiving the above two diagnostic parameters is envisaged at system output.

Грузоподъемные краны относятся к объектам повышенной опасности. Поэтому их техническое состояние в процессе эксплуатации периодически подвергается контролю с применением специальных нормативных мероприятий — осмотров, освидетельствований и обследований. Данные мероприятия носят диагностический характер. После выполнения каждого из них проводятся записи в специальных журналах и составляются акты по установленной форме.

При диагностировании сложных ответственных объектов в настоящее время применяют аппаратуру и вычислительные комплексы, объединенные в автоматизированные системы на базе ПК [1–4].

Система автоматизированного учета технического состояния кранов (рис. 1) предназначена для накопления, хранения и обработки информации, получаемой при выполнении контрольных мероприятий, а также при любом диагностировании крана.

Техническое состояние грузоподъемного крана при диагностировании описывают двумя показателями: остаточным режимным ресурсом RS и остаточным ресурсом по фактическому состоянию (целостности) конструкций FS [5–7]. С учетом этого на выходе системы (рис. 1) предусмотрено получение двух указанных выше диагностических параметров, для определения которых используется формируемая под эту задачу база данных.

Программный комплекс (ПМК) системы включает (рис. 2) ряд модулей, каждый из которых отвечает за реализацию своей задачи. В сочетании эти модули образуют единую «Систему учета технического состояния грузоподъемных кранов на предприятии». Отдельными модулями являются системная, программная и графическая части, а также база данных. Системная часть выполняет функции: распознавания координат; обработки исключительных ситуаций; обеспечения безопасности; активирования внешнего модуля. Программная часть реализует: выбор и открытие бинарного файла; обработку бинарного файла; расчет остаточного режимного ресурса крана RS ; расчет показателя

физического состояния конструкций крана FS . Графическая часть осуществляет заполнение таблиц Excel и построение на их основе графиков.

Интерфейс системы. После запуска программы на экран дисплея выводится стартовое окно, которое реализует две функции: вывод наименования системы и функцию системы безопасности, защищающей основную систему от несанкционированного доступа.

Следующее окно системы (рис. 3) раскрывает структуру предприятия (см. рис. 1). Предприятие может быть представлено топографической картой, таблицей или списком цехов, но так, чтобы при этом весь крановый парк был учтен в автоматизированной системе.

После выбора определенного цеха высвечивается окно с его планом (рис. 4). В общем случае план цеха (или другое подразделение, в котором используются грузоподъемные краны) может

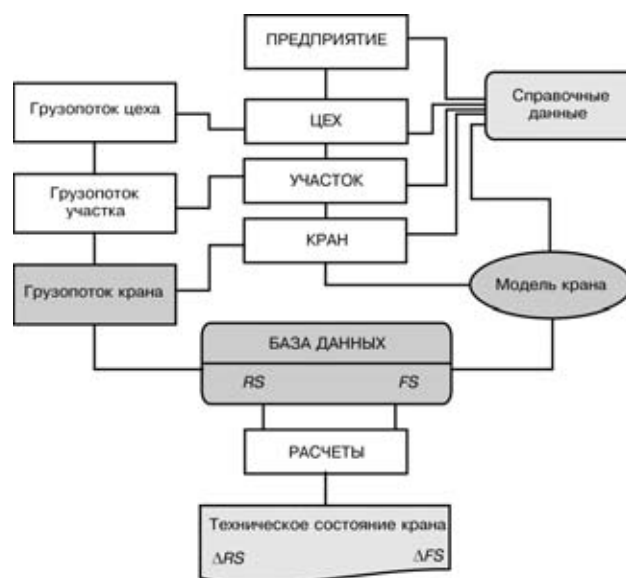


Рис. 1. Блок-схема автоматизированной системы учета технического состояния грузоподъемных кранов предприятия

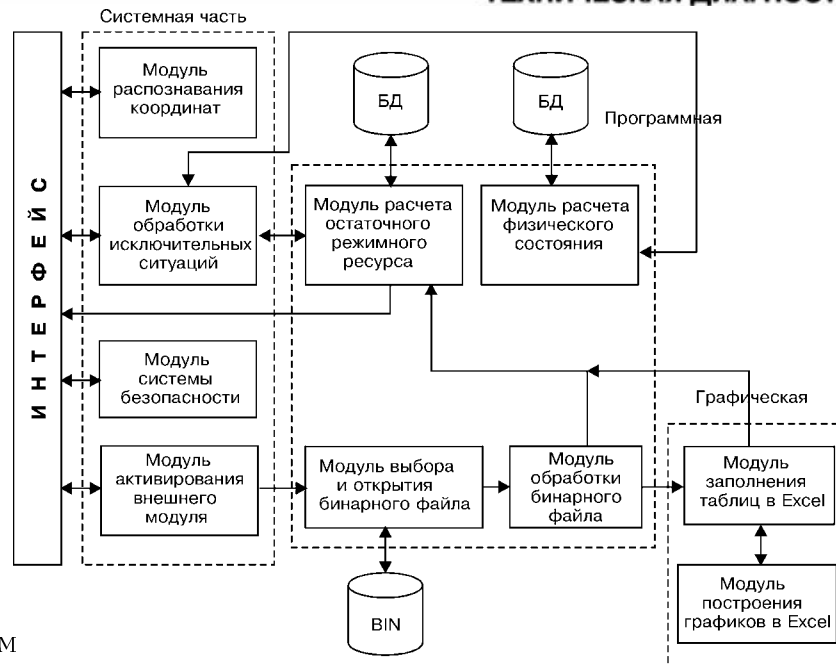


Рис. 2. Структурная схема ПКМ

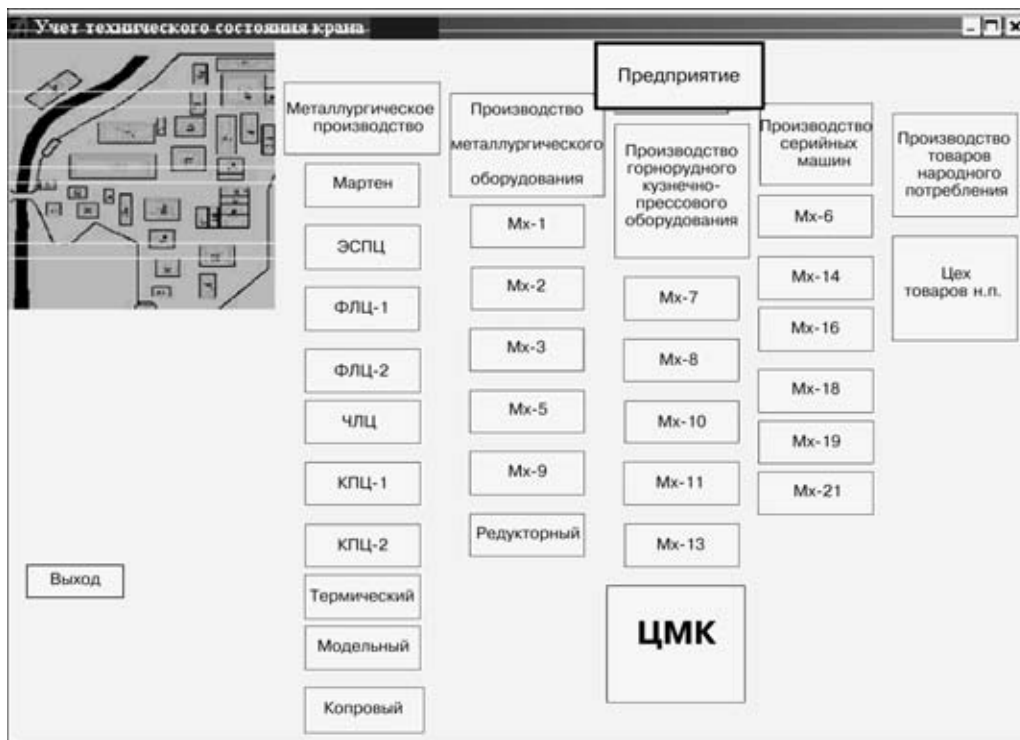


Рис. 3. Структурная схема предприятия

включать отдельные рабочие участки кранов. Они высвечиваются очередными окнами.

Диагностический параметр крана RS , указывающий на его остаточный режимный ресурс, рассчитывается на основе анализа *грузового потока*, который данный кран обслуживает. При нажатии кнопки «Грузопоток» пользователь получает возможность рассмотреть и получить необходимые данные грузопотока для выбранного участка (рис. 5), а также изображение и технические параметры крана (рис. 6). Диагностический параметр крана FS , указывающий на физическое состояние его конструкций, определяется после измерения диагностических признаков повреждения элемен-

тов крана — *износа, коррозии, усталости материала, объемных и местных деформаций и др.* Результаты диагностирования могут быть представлены базовой матрицей технического состояния конструкций крана, в ячейках которой размещены количественные показатели поврежденности *элементов* A [2]. В общем случае базовая матрица имеет следующий вид:

$$\begin{matrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{m1} & A_{m2} & \dots & A_{mn} \end{matrix}$$

Здесь A_{ij} — количественная оценка поврежденности i -го элемента конструкции по j -му виду пов-

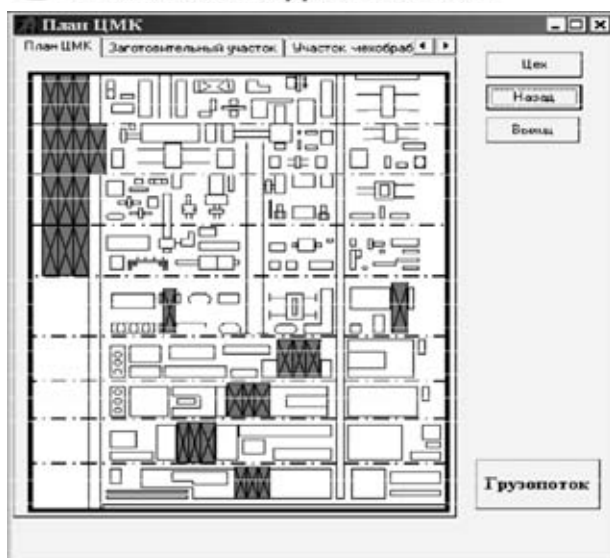


Рис. 4. План цеха

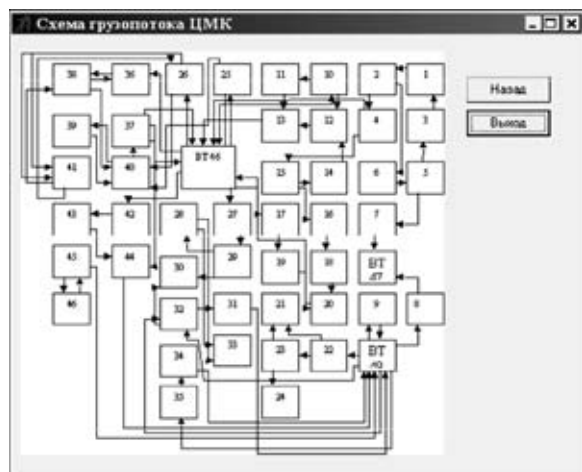


Рис. 5. Схема грузопотока на участке

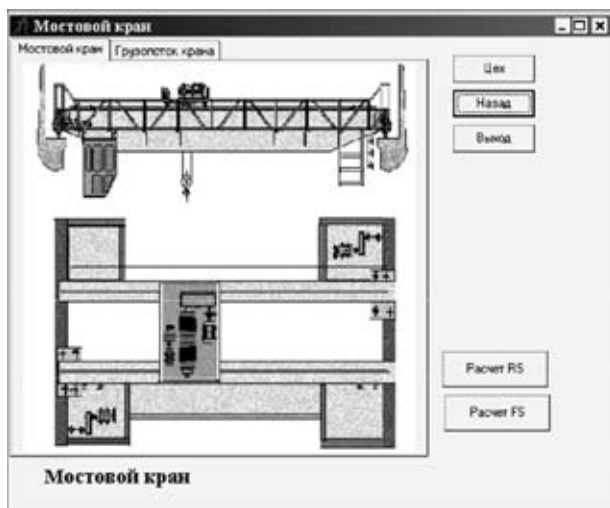


Рис. 6. Схема крана

реждения (диагностическому признаку). Весь кран для целей детальной диагностики разбиваем на

Донбас. гос. машиностроит. академия
Краматорск

Ресурс

Столбец мощности грузопотока

Код	Наименование	Масса, т	Направление
0		3 000	1500
0		4 500	2000
0		2 500	1000
0		4 000	750

Добавить

Удалить

Инвентарный номер груза

9521

00	3 000	4 500	2 500	4 000
01	1500	8000	3000	1500

Добавить

Удалить

Укажите G0

0

Укажите L

04

Укажите E0

0

Введите режимный ресурс

0

Финансовый ресурс в тоннах

14

Ограниченный режимный ресурс в тоннах

0

Назад

Распечатать табл.

Распечатать

Матрица кратности грузопереработки

MTYPE	1	2	3	4
0	1	0	2	0
0	0	3	1	0
0	0	1	0	2

Добавить строку

Удалить строку

Добавить

Удалить

Введите режимный ресурс

0

Финансовый ресурс в тоннах

14

Ограниченный режимный ресурс в тоннах

0

Назад

Распечатать табл.

Распечатать

Рис. 7. Окно расчета остаточного режимного ресурса крана

отдельные конструктивные модули. Требуемый для анализа модуль крана получаем в изображении, используя реакцию системы, путем попадания указателя манипулятора на выбранный модуль крана. В окне, содержащем изображение выбранного крана, находятся кнопки «Расчет RS » и «Расчет FS ». Первая активирует внешний модуль расчета остаточного ресурса для выбранного крана (рис. 7), вторая — модуль расчета его физического состояния. Требования к составу и параметрам технических средств: процессор Intel Pentium || 266; ОЗУ 64 Мб; SVGA монитор (разрешение 1024×768); свободное место на жестком диске не менее 4 Мб.

Требования к информационной и программной совместимости: операционная система Windows 98, NT4.0, 2000, XP; Web-браузер; средство разработки приложения — Borland Delphi 6.0.

1. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Техн. ком. ТК-78, 1996. — 294 с.
2. Чернаков Б. И., Сологунов Н. Ф. Техническая диагностика в системе технического обслуживания и ремонта оборудования // Организационно-экономические проблемы гибкого автоматизированного производства: Матер. семин. — М., 1988. — С. 130–134.
3. *Kontrolle* за функционированием и состоянием производственного оборудования — концепция построения автоматизированной диагностической системы для технического обслуживания в зависимости от состояния / Funktionsund Zustandsüberwachung von Fertigungseinrichtungen — Ein rechnerunterstütztes Diagnostik — Sistem — konzept für die Zustandsabhängige Ins tandhaltung / W. Weber, U. Siedel // Fertigungstechn. und Betr. — 1988. — **38**, № 11. — С. 641, 657–660.
4. Хансен Г., Хансен Д. Базы данных: разработка и управление. — М.: Бинном, 1999. — 547 с.
5. Сборник методических указаний по оценке технического состояния грузоподъемных кранов. — Харьков, 1995.
6. Маковский А. М. Система диагностирования грузоподъемных кранов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1990. — № 1. — С. 18–24.
7. Маковский А. М. Диагностирование кранов по остаточному режимному ресурсу на основе классификации стандарта // Там же. — 1991. — № 1. — С. 29–32.

Поступила в редакцию
19.08.2002



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

С. А. БЕЖЕНОВ

Исследована взаимосвязь механических и акустоэмиссионных характеристик лопаток компрессора из сплава титана. Установлено, что их долговечность определяется локальным напряженным состоянием материала, связанным с параметрами АЭ при фиксированном напряжении, а также его жесткостью, определяемой особенностями АЭ характеристики. Предложена методика прогнозирования долговечности лопаток на заданном уровне напряжений неразрушающим методом АЭ.

Interrelation of the mechanical and acoustoemission characteristics of titanium alloy compressor blades is studied. It is found that their fatigue life is determined by the local stressed state of material, associated with AE parameters at a fixed stress, as well as its rigidity, determined by the features of AE characteristic. A procedure is proposed for forecasting the fatigue life of blades at a specified level of stresses by the non-destructive AE method.

Основной задачей конструктора является создание конкурентоспособного изделия, выполняющего предназначенные ему функции в течение заданного срока. Ее успешное решение возможно при умении оценить техническое состояние элементов изделия (на любом этапе производства и эксплуатации) и предвидеть возможность его разрушения. Обычно при проектировании конструкции стремятся не допустить предельных состояний ее элементов. Однако практика изготовления и эксплуатации машин показывает, что детали, изготовленные по единой технологии, имеют большой разброс механических свойств, особенно долговечности. Поскольку ресурс изделия определяется минимальной долговечностью входящих в него деталей, актуальной является разработка простых и надежных методов НК технического состояния каждой конкретной детали. Одним из эффективных методов такого контроля является метод акустической эмиссии (АЭ), который основан на регистрации излучаемых материалом механических волн, вызванных внутренней динамической локальной перестройкой структуры материала, определяющей его механические свойства.

В работах [1, 2] показано, что в процессе деформирования вязких материалов интенсивность потока сигналов АЭ изменяется по выпуклой кривой Гаусса, особенности которой характеризуют механические свойства материала. В статьях [3, 4] описан разработанный метод ее коррекции, исключаяющий искажение сигналов АЭ при высокой интенсивности потока актов АЭ, что существенно повышает точность и достоверность результатов АЭ контроля и позволяет более достоверно изучать кинетику деформации и разрушения материала. В работах [5–8] приводятся результаты исследования зависимости характеристик сопротивления усталости от параметров АЭ при неоднородном напряженном состоянии материала деталей машин, а также методики их АЭ диагностики. Таким образом, данные проведенных исследований свидетельствуют о высокой информативности и эффективности метода АЭ при разработке методов НК технического состояния материала деталей и прогнозирования их долговечности.

В данной статье на примере лопаток компрессора из сплава титана мартенситного класса ВТ8 с различной технологической наследственностью исследуется взаимосвязь механических характеристик с параметрами АЭ с целью доработки методики прогнозирования долговечности деталей машин этим неразрушающим методом.

Материалы и методики исследований. Исследовали три партии лопаток компрессора из жаропрочного двухфазного $\alpha + \beta$ -сплава титана (Ti–Al–Mo–Si) мартенситного класса с различной технологической наследственностью: изготовленные по серийной технологии; с поверхностями, подвергнутыми низкотемпературному цианированию (НТЦ); изготовленные по серийной технологии с последующим НТЦ, у которых на входной кромке были выполнены надрезы треугольного профиля глубиной 0,5 мм, имитирующие забоину. Химико-термическая обработка заключалась в выдержке лопаток в течение 3 ч при температуре 560 °С в расплаве солей NaCNO–KCl–Na₂CO₃. Акустоэмиссионный контроль лопаток заключался в регист-

рации скорости счета сигналов АЭ $\dot{N}_{АЭ}$ на приборе АФ-15 при ступенчатом повышении амплитуды средних напряжений цикла σ_a с шагом $\Delta\sigma_a = 50$ МПа до уровня, соответствующего значению $\sigma_a = 0,9\sigma_{-1}$. Усталостные испытания проводились на электродинамическом вибростенде ВЭДС-400

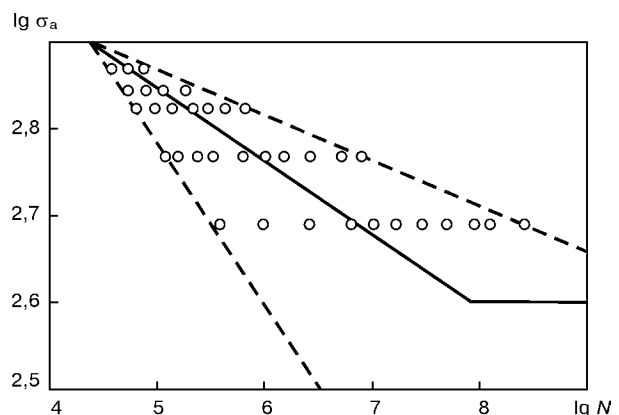


Рис. 1. Результаты усталостных испытаний лопаток компрессора из сплава ВТ8

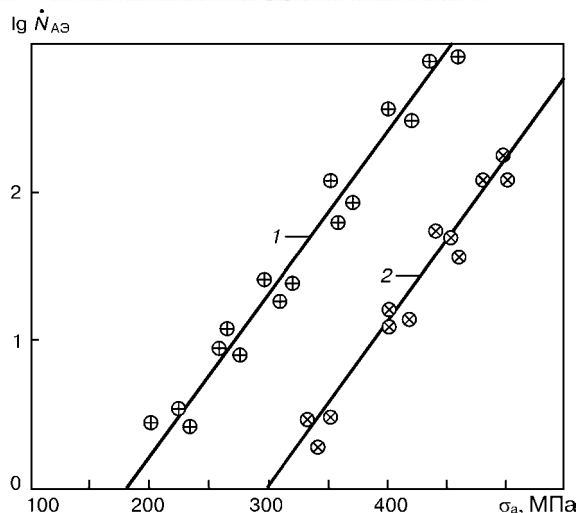


Рис. 2. Зависимости скорости счета сигналов АЭ от номинальных циклических напряжений в лопатках компрессора из сплава BT8, имеющих минимальную (1) и максимальную (2) долговечность

при действии циклических напряжений в консолюно закрепленных лопатках.

Результаты испытаний и их обсуждение. На рис. 1 представлена полная диаграмма усталости генеральной выборки лопаток компрессора из сплава титана с разной технологической наследственностью. Она характеризуется большим разбросом значений долговечности, увеличивающимся с уменьшением амплитуды приложенного напряжения. Обычно все поле разброса данных усталостной испытываемого объекта рассматривают с позиций математической статистики как семейство кривых, характерным параметром которых служит величина вероятности разрушения, — так называемые кривые усталости равной вероятности разрушения [9, 10]. В результате проведенных ранее исследований [11] установлено, что в подавляющем большинстве случаев для участка левой ветви кривой усталости при напряжениях, не превышающих предел текучести, между $\lg \sigma_a$ и $\lg N$ наблюдается линейная зависимость. Это позволяет представить ее в виде уравнения

$$\sigma_a^m N = C = \text{const}, \quad (1)$$

где σ_a — амплитуда циклических напряжений, Па; N — количество циклов до разрушения; m — показатель степени; C — постоянная.

Исходя из физической природы разброса значений долговечности, полную диаграмму усталостного разрушения исследуемых деталей можно рассматривать как семейство диаграмм усталости деталей, имеющих одинаковое техническое состояние. Иными словами, каждой конкретной детали соответствует определенная кривая усталости, описываемая уравнением (1), где показатель степени m и коэффициент C определяются опытным путем. При таком подходе случайными будут свойства конкретной детали, а ее долговечность уже становится величиной детерминированной, обусловленной предысторией детали. Тогда левая часть уравнения (1) представляет собой уровень энергетического воздействия на испытываемую деталь, а коэффициент C — уровень ее сопротивления усталости. Разрушение наступает при равенстве этих параметров. Поскольку усталостная прочность — это свойство конкретного изделия, обусловленное его техническим состоянием, то коэффициенты C и m для конкретного изделия неизменны на каждом уровне напряжений и, очевидно, связаны с параметрами АЭ при его нагружении. Такой подход позволяет реализовать неразрушающий метод определения долговечности конкретной детали по параметрам АЭ на заданном уровне напряжений, для чего достаточно установить связь параметров АЭ с уровнем напряжений в материале детали и с ее долговечностью. Прямые линии, проведенные через точки, соответствующие максимальным и минимальным значениям долговечности при разных уровнях напряжений (рис. 1), сходятся в одной точке (полюсе диаграммы) и описываются уравнением (1). С позиции принятого подхода все диаграммы усталости выборок деталей с одинаковой усталостной прочностью также должны выходить из этого полюса и образовывать с осью ординат некоторый угол, определяемый техническим состоянием деталей. Задача построения таких диаграмм усталости решалась путем установления взаимосвязи механических характеристик материала деталей со скоростью счета сигналов АЭ при соответствующих условиях их нагружения.

На рис. 2 показаны зависимости скорости счета

АЭ $\dot{N}_{АЭ}$ от уровня номинального напряжения σ_a для двух групп лопаток, имеющих соответственно максимальную и минимальную долговечность на одинаковом эквивалентном уровне приложенного циклического напряжения $\sigma_a = 1,2\sigma_{-1}$. При напряжениях, не превышающих предел усталости σ_{-1} , зависимости $\lg \dot{N}_{АЭ} = f(\sigma_a)$ представляют собой параллельные прямые, причем лопатки с более высоким уровнем АЭ при одинаковом уровне напряжения имеют меньшую долговечность. Из этого следует, что интенсивность потока АЭ в материале лопатки при фиксированном уровне напряжения, характеризуя интенсивность деформационных про-

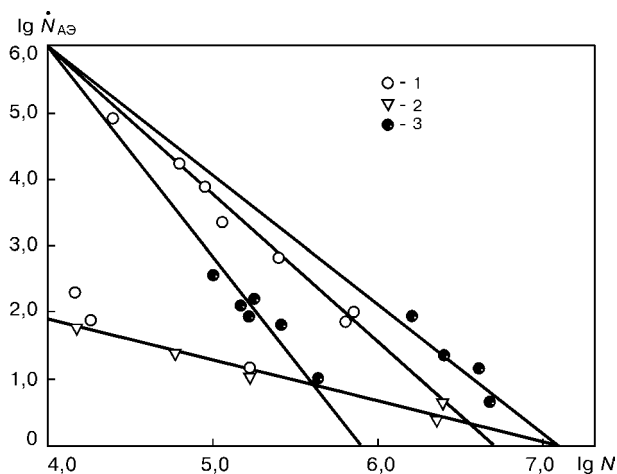


Рис. 3. Регрессионные зависимости скорости счета АЭ от долговечности лопаток компрессора из сплава BT8: 1 — изготовленные по серийной технологии; 2 — с надрезом; 3 — после НТЦ



цессов в материале, обуславливает усталостную прочность детали, в частности, ее долговечность сигналов на определенном уровне напряжений.

На рис. 3 приведены графики зависимости скорости счета сигналов АЭ $\dot{N}_{\text{АЭ}}$ при фиксированном напряжении $\sigma_a = 0,6\sigma_{-1}$ от долговечности лопаток N при фиксированном напряжении $\sigma_a = 1,2\sigma_{-1}$. Видно, что экспериментальные точки, соответствующие лопаткам без надреза с разной технологической наследственностью, хорошо укладываются на разные прямые, исходящие из одной точки — полюса, причем для лопаток после НТЦ точки располагаются на разных прямых. Следовательно, для лопаток без надреза аналогично зависимости $\lg \sigma_a = f(\lg N)$ справедливо уравнение

$$N \dot{N}_{\text{АЭ}}^m = C, \quad (2)$$

где N — долговечность лопатки на соответствующем уровне напряжения; $\dot{N}_{\text{АЭ}}$ — скорость счета сигналов АЭ в материале лопатки при фиксированном уровне его напряжения, одинаковом для всех лопаток генеральной выборки; C — постоянная, характеризующая усталостную прочность конкретной детали; m — показатель степени диаграммы усталости этой детали.

Расположение экспериментальных точек на разных прямых свидетельствует о действии разных механизмов усталостного разрушения. Согласно структурно-энергетической теории [12] разрушение материала происходит после преодоления определенного энергетического барьера, уровень которого определяется жесткостью его локального напряженного состояния. При этом переход от одного энергетического уровня к другому определяется законом дискретности параметров разрушения

$$z = \Delta^{1/n} = \mu, \quad (3)$$

где z — отношение параметров, характеризующих энергетический уровень разрушения материала; Δ — универсальная постоянная металла (для титана $\Delta = 0,104$ при $T = 300$ К [12]); n — число геометрической прогрессии со знаменателем 2; μ — коэффициент жесткости напряженного состояния материала, определяющий энергетический барьер разрушения последнего.

В уравнении (2) коэффициент C характеризует энергетический уровень разрушения материала с определенной жесткостью его напряженного состояния и представляет собой долговечность лопаток при $\lg \dot{N}_{\text{АЭ}} = 0$. Тогда согласно уравнению (3)

$$\lg C_{i-1} / \lg C_i = \Delta^{1/n_i}, \quad (4)$$

где значения $\lg C_i = \lg N_i$ при $\lg \dot{N}_{\text{АЭ}i} = 0$ определяются из зависимостей на рис. 3.

На рис. 3 показаны расчетные прямые уравнения (4) при $n_1 = 32$ и $n_2 = 64$, на которые достаточно хорошо укладываются экспериментальные точки

для лопаток без надреза, что согласуется с законом дискретности параметров разрушения.

Разная жесткость напряженного состояния материала лопаток после НТЦ, очевидно, обусловлена действием разных механизмов усталостного разрушения. При НТЦ происходит насыщение поверхностного слоя материала одновременно углеродом и азотом, причем азотом поверхность насыщается в большей степени, чем углеродом. При этом усталостные характеристики сплава изменяются за счет, во-первых, усадочных напряжений, возникающих при действии высоких градиентов температур; во-вторых, соединения азота и углерода с другими элементами и связанного с этим объемного расширения материала, вызывающего возникновение остаточных напряжений; в-третьих, образования твердых нитридов и карбидов в поверхностном слое материала.

При неоднородном напряженном состоянии материала в процессе его нагружения действуют изменяющиеся по глубине внутренние остаточные σ_o и растягивающие напряжения от внешней нагрузки σ_p . Поэтому механизм распространения трещины, существенно влияющий на долговечность детали, определяется суммарным напряжением $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_o + \bar{\sigma}_p$, зависящим от соотношения градиентов рассмотренных напряжений. Если имеют место сжимающие остаточные напряжения, но $|\text{grad } \sigma_p| > |\text{grad } \sigma_o|$, то трещина, зарождаясь на некоторой глубине поверхностного слоя, распространяется к поверхности с увеличивающейся скоростью, так как размах коэффициента интенсивности напряжений ΔK при росте трещины в этом направлении растет. Толщину поверхностного слоя трещина при этом проходит достаточно быстро. Если же при сжимающих остаточных напряжениях $|\text{grad } \sigma_p| < |\text{grad } \sigma_o|$, то скорость роста трещины к поверхности уменьшается, так как размах ΔK при этом уменьшается. Времени для прохождения трещиной такого упрочненного слоя требуется больше, а долговечность такой детали выше.

При каждом механизме разрушения разный уровень пластически деформированных микрообъемов обуславливает разную скорость процесса усталостного разрушения. Поскольку метод АЭ основан на регистрации излучаемых материалом механических волн, вызванных внутренней локальной динамической перестройкой структуры твердого тела, то скорость счета сигналов АЭ пропорциональна объему пластически деформированного материала. Это объясняет связь интенсивности потока АЭ при фиксированном напряжении с долговечностью детали на определенном уровне напряжений.

Специфика долговечности лопаток с надрезом состоит в том, что под действием растягивающих напряжений от внешней нагрузки неравномерно распределенные напряжения в области концентратора напряжений превосходят предел текучести в очень ограниченных зонах, где происходит пластическая деформация. После снятия нагрузки пластически деформированные участки в области мак-



симальных напряжений не могут восстановиться до своих первоначальных размеров. Вследствие этого они оказываются под действием сжимающих напряжений и могут существенно уменьшить максимальные результирующие растягивающие напряжения при последующих циклах нагружения, а следовательно, и увеличить свою долговечность. Если же растягивающие напряжения от внешней нагрузки не вызывают пластической деформации материала в области концентратора напряжения, то материал постоянно находится под действием повышенных напряжений, и долговечность его будет пониженной. В любом случае концентратор напряжений локализует область повышенного уровня напряжений, что снижает объемы пластически деформированного материала, а следовательно, и уровень скорости счета сигналов АЭ в начале нагружения материала, но при этом изменяется его жесткость локального напряженного состояния.

Высокая степень приближения зависимостей

$\lg \dot{N}_{АЭ} = f(\lg N)$ для некоторых лопаток без надреза к таковым для лопаток с надрезом свидетельствует о том, что в материале этих лопаток без явно выраженного концентратора напряжений последний фактически присутствует. Это могут быть различные включения, несплошности материала или просто крупные неблагоприятно ориентированные зерна, что снижает характеристики сопротивления усталости.

Результаты проведенного исследования показали наличие достаточно тесной связи между долговечностью лопаток и скоростью счета сигналов АЭ на определенном уровне их нагружения. Однако эта зависимость неоднозначна и определяется жесткостью напряженного состояния микрообъемов поверхностного слоя, обуславливающего действие разных механизмов усталостного разрушения лопаток. Следовательно, для прогнозирования долговечности последних на заданном уровне напряжений необходимо определить не только действительное локальное напряженное состояние материала, но и его жесткость, которая обусловлена объемом пластически деформированной его части и может определяться по параметрам АЭ.

Уровень локального напряженного состояния конкретной детали — величина перманентная, определяемая уровнем $\dot{N}_{АЭ}$ при $\sigma_a = 0,6\sigma_{-1}$. Жесткость напряженного состояния является величиной дискретной и может быть определена по особенностям АЭ характеристик. В работе [13] показано, что АЭ характеристики лопаток компрессора из сплава титана без надреза имеют вид S-образных кривых, но у лопаток после НТЦ наблюдается задержка появления АЭ, что объясняется упрочнением поверхностного слоя. При этом у лопаток с большей долговечностью задержка более длительна. Специфика образования АЭ, характеризующая локальное напряженное состояние материала лопаток с концентратором напряжений, состоит в явной задержке излучения сигналов АЭ с последующим его интенсивным ростом. При этом АЭ характеристика имеет Г-образную форму.

Наличие тесной связи между скоростью счета сигналов АЭ $\dot{N}_{АЭ}$ при номинальных напряжениях, меньших предела усталости ($\sigma_a < \sigma_{-1}$), и долговечностью N_p лопаток при номинальных напряжениях выше предела усталости ($\sigma_a > \sigma_{-1}$) свидетельствует о взаимосвязи деформационных процессов в микрообъемах материала на этих уровнях макронапряжений в нем. Тот факт, что зависимости (1), (2) представляют собой одинаковые функции разных аргументов, свидетельствует о подобии процессов, которые они описывают, что позволяет прогнозировать долговечность конкретной детали на заданном уровне усталостных испытаний методом АЭ.

Зависимость скорости счета сигналов АЭ $\dot{N}_{АЭ}$ на фиксированном уровне напряжения $\sigma_{АЭ}$, меньшем предела усталости σ_{-1} , от долговечности лопаток N на фиксированном уровне напряжений σ_{a1} в области многоциклового усталости дает возможность по скорости счета сигналов $\dot{N}_{АЭ}$ при $\sigma_{АЭ}$ и особенностям АЭ характеристики определить долговечность конкретной лопатки N_1 при напряжении σ_{a1} . Тогда прямая, проведенная из полюса диаграммы усталости генеральной выборки через точку с координатами (N_1, σ_{a1}) , является диаграммой усталости выборки лопаток одинаковой усталостной прочности с исследуемой лопаткой. Она позволяет прогнозировать долговечность последней на любом уровне напряжений в области многоциклового усталости.

Следует отметить, что даже незначительное изменение в технологии изготовления детали может существенно изменить жесткость напряженного состояния ее материала, а следовательно, и ее долговечность. При этом необходима корректировка как диаграммы усталости генеральной выборки в координатах $\lg \sigma_a = f(\lg N)$, так и зависимости $\lg \dot{N}_{АЭ} = f(\lg N)$.

ВЫВОДЫ

1. Деформационные процессы, проходящие в микрообъемах материала при действии монотонных макронапряжений, меньших предела выносливости, и переменных напряжений в области многоциклового усталости описываются одинаковыми уравнениями, что свидетельствует о их подобии.
2. Долговечность детали определяется локальным напряженным состоянием материала и его жесткостью, причем первый параметр материала определяется интенсивностью потока АЭ на фиксированном уровне макронапряжения, а второй — особенностями АЭ характеристик.
3. Результаты проведенных исследований дают возможность прогнозировать неразрушающим методом АЭ долговечность конкретных деталей в области многоциклового усталости.

1. Трипалин А. С., Буйло С. И. Акустическая эмиссия. Физико-механические аспекты. — Ростов. гос. ун-т, 1986. — 160 с.
2. Бунина Н. А. Исследование пластического деформирования металлов методом акустической эмиссии. — Ленинград. гос. ун-т, 1990. — 156 с.



3. Буйло С. И. Искажение параметров сигналов АЭ и некоторые особенности восстановления статистических характеристик источников излучения // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1989. — № 1. — С. 15–23.
4. Буйло С. И. Вероятностно-информационные аспекты оценки достоверности результатов неразрушающего контроля и диагностики прочности твердых тел // Дефектоскопия. — 1996. — № 5. — С. 20–25.
5. Буйло С. И. О связи параметров акустической эмиссии с особенностями кинетики деформации и микроразрушения твердых тел // Акустическая эмиссия материалов и конструкций. — Ростов. гос. ун-т, 1989. — Ч. 1. — С. 125–132.
6. Беженов А. И., Беженов С. А. Исследование методом акустической эмиссии влияния поверхностной обработки на характеристики циклической прочности образцов из никелевого сплава // Пробл. прочности. — 1999. — № 3. — С. 139–145.
7. Беженов С. О. Методика дослідження поверхневого шару конструкційних матеріалів методом акустичної емісії // Нові матер. та технології в металургії та машинобуд. — 1999. — № 1. — С. 16–19.
8. Беженов С. А., Буйло С. И. Некоторые аспекты диагностики долговечности и предразрушающего состояния конструкционных материалов методом акустической эмиссии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 4. — С. 24–27.
9. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. — М.: Мир, 1984. — 624 с.
10. Геминев В. Н., Балыбердин В. С. Обобщенная функция накопления повреждений при усталости // Усталость и вязкость разрушения металлов. — М.: Наука, 1974. — 262 с.
11. Школьник Л. М. Методика усталостных испытаний. Справочник. — М.: Машиностроение, 1978. — 302 с.
12. Иванова В. С., Терентьев В. Ф. Природа усталости металлов. — М.: Металлургия, 1975. — 456 с.
13. Буйло С. И., Беженов С. А. Исследование особенностей акустического излучения при деформировании сплава титана и некоторые результаты АЭ диагностики его предразрушающего состояния // Дефектоскопия. — 2000. — № 5. — С. 3–11.

Запорозж. нац. техн. ун-т

Поступила в редакцию
03.06.2002

СТМ фирма «СЕРВИС ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН»

**Производит приборы для контроля, диагностики,
наладки и ремонта технологического оборудования**



Анализатор спектра вибрации 795М — прибор для измерения и анализа параметров вибрации, балансировки, ремонта и наладки оборудования. Основные технические характеристики прибора ставят его в ряд современных диагностических средств, высокая разрешающая способность позволяет точно выявить любой дефект в полевых условиях, на месте эксплуатации механизма. Возможности выполнения многоплоскостной динамической балансировки в собственных опорах, измерения амплитудно-фазочастотных характеристик на режимах разгона/выбега, контроль подшипников по огибающей и методу ударных импульсов существенно расширяют возможности использования прибора при ремонте и наладке.

**Работы по обслуживанию, наладке и ремонту
оборудования**

по фактическому состоянию.

Балансировка роторов на месте.

**Лазерная выверка соосности валов
и валопроводов**

**тел./факс: (0512) 24 31 97; e-mail: stm@aip.mk.ua;
<http://www.stmnik.narod.ru>**



Индикатор вибродиагностический 77Д11 — прибор для контроля технического состояния подшипников качения методом ударных импульсов.



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТРУБ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

В. А. ТРОИЦКИЙ, И. Я. ШЕВЧЕНКО, П. В. ФЕДОРИКА, А. В. БОРОВИКОВ, В. Н. НЕГЛЯД

Рассмотрены методы, применяемые для НК электросварных труб большого диаметра в процессе их производства. Предложены пути совершенствования аппаратуры и методов НК для обнаружения и идентификации дефектов шва и зоны термического влияния.

The paper considers the methods, applied for NDT of electrically welded large-diameter pipes during their manufacture. Methods to improve NDT equipment and hardware for detection and identification of defects in the weld and HAZ are proposed.

При анализе причин аварий на газонефтепроводах установлено, что они связаны прежде всего с развитием коррозионных и усталостных повреждений, очагами которых являются различные производственные дефекты, допущенные при изготовлении труб, проведении строительно-монтажных работ и, в частности, при выполнении сварных швов.

По данным Российской акционерной компании «Транснефть» в 1996 г. причинами аварий (0,19 аварий/1000 км) послужили: брак кольцевых сварочно-монтажных стыков (44 %); коррозионные повреждения (22 %); брак продольных заводских швов (11 %, в том числе 5,5 % по дефектам прикромочной зоны); повреждения газонефтепроводов сторонними лицами и строительной техникой (23 %). Эти данные относятся к трубам разных производителей, в том числе и ОАО «Харьковский трубный завод» (ОАО «ХТЗ»).

Учитывая количество аварий по заводскому браку — до 11 %, в том числе 5,5 % по дефектам в околошовной зоне (ОШЗ), актуальной задачей является совершенствование методов и оборудования для НК труб при их производстве.

Для контроля сварных швов труб при их производстве применяют, как правило, комплексные методы НК — 100 %-ный автоматизированный УЗ контроль (АУЗК) по всей длине шва и выборочный рентгенотелевизионный контроль (РТК) труб, забракованных при АУЗК [1, 2]. Однако не всегда удается достаточно точно идентифицировать вид дефекта, так как при РТК не всегда выявляются тонкие непровары и трещины, расположенные под углом. Если результаты АУЗК и РТК противоречивы, то решение принимают по результатам ручного УЗК (РУЗК).

Возникновение различного вида дефектов в сварных швах прямошовных труб, а также их количественные соотношения зависят от многих факторов: степени отработки технологического процесса, марок применяемых сталей, качества применяемых флюса и присадочных проволок, толщины стенки трубы, формы разделки кромок под сварку и др.

Обнаружение дефекта, а также измерение его с минимальной погрешностью, оценка характера и степени допустимости относятся к основным зада-

чам НК. Они решаются в каждом конкретном случае путем разработки определенных методик и средств НК.

Неодинаковая информативность УЗК и РТК при большом разнообразии дефектов в сварных соединениях трубопроводов, различной их ориентации и отражательных свойствах не обеспечивает надежной идентификации дефектов, поэтому процесс обнаружения дефектов и измерение их размеров носит вероятностный характер.

Изучение статистических данных при обнаружении дефектов способствует разработке более эффективной технологии УЗК. Так, при анализе количественного распределения дефектов по сечению шва можно выделить зоны, которые необходимо контролировать наиболее тщательно.

Анализ количественных соотношений дефектов различного вида и размеров в изделии определяет уровень дефектности, позволяет оценить динамику изменения качества в технологическом процессе, определить правомерность использования выбранной методики АУЗК и дать априорную оценку эффективности всей системы НК.

Анализ количественного соотношения дефектов различного вида в сварных соединениях труб большого диаметра, проведенный на ОАО «ХТЗ», показал, что более 80 % дефектов — объемные (поры и шлаковые включения), и только 10 % — потенциально опасные (непровары и трещины).

Исследованиями установлено, что раскрытие плоскостных дефектов типа трещин и непроваров увеличивается после экспандирования, так как растягивающие усилия при этом достигают 0,9 предела текучести. А так как трубы после экспандирования и гидроиспытаний проходят повторный НК, то плоскостные дефекты, не обнаруженные на технологическом участке РТК, после экспандирования «раскрываются» и выявляются на сдаточном участке РТК. Что касается трещин, то на сдаточном участке дополнительно обнаруживаются поперечных трещин столько же, сколько и на технологическом, а продольных трещин даже в 2–10 раз больше, т. е. трещины после экспандирования «раскрываются» сильнее непроваров.

Исследованиями установлено, что «перебраковка» при АУЗК связана также с наличием на кром-

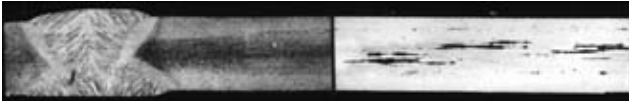


Рис. 1. Макрошлиф с дефектами в прикромочной зоне сварного соединения труб (неметаллические строчные включения)

ках исходного листа дефектов типа расслоений и раскатанных строчечных включений металлургического характера. Дефекты типа строчечных включений, хорошо отражая ультразвук, приводят к повышенному проценту браковки труб, но, располагаясь на пути УЗ волны и рассеивая ее, строчечные включения могут «маскировать» дефект, ухудшая его выявляемость.

Известно [2], что качество прикромочной зоны основного металла исходного листа влияет на качество сварных соединений трубопроводов при их производстве. Сопоставление количества дефектов металлургического происхождения в прикромочных зонах листов, определенных по результатам входного УЗК, с количеством дефектов сварных соединений труб по результатам технологического и сдаточного контроля показало прямую связь между ними.

Увеличение количества дефектов в результате трубного передела связано как с развитием (трансформацией) дефектов в металле зоны термического влияния (ЗТВ), так и с образованием дефектов сварного соединения, часть которых вызвана дефектами металла в прикромочной зоне листа. Особую опасность представляют расслоения, расположенные в приповерхностных областях металла ЗТВ, поскольку они могут приводить к разрушению поверхностного слоя трубы или металла шва.

Обнаружение дефектов в ОШЗ возможно с помощью УЗ методов НК (рис. 1), для чего применяют специальные методики идентификации такого вида дефектов. Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (ИЭС) вместе с ОАО «ХТЗ» проведены научно-исследовательские работы по раздельной идентификации дефектов шва и ОШЗ.

В установках, разработанных и изготовленных ИЭС для ОАО «ХТЗ», предусмотрены технические возможности реализации раздельной идентификации дефектов.

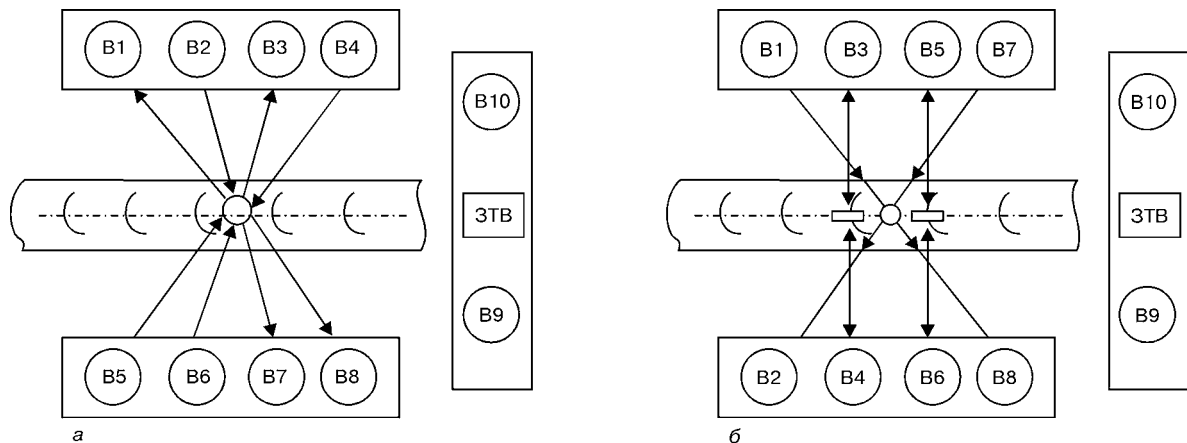


Рис. 3. Схема прозвучивания швов труб магистральных трубопроводов с толщиной стенки 7... 13 (а) и 14... 25 мм (б): В1... В8 — наклонные пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) для контроля дефектов шва; В9, В10 — прямые ПЭП для контроля дефектов ЗТВ

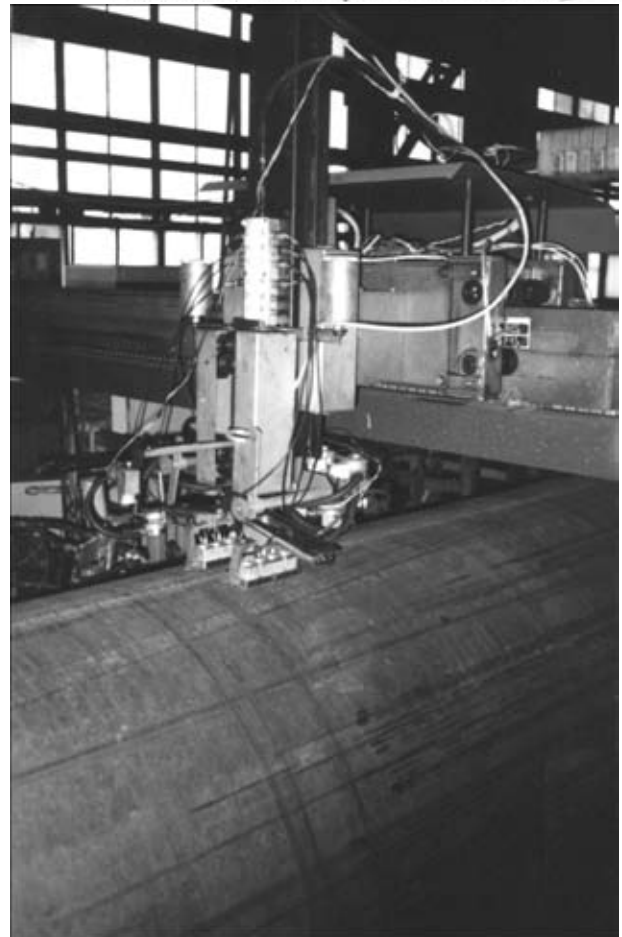


Рис. 2. Установка НК-205 для контроля швов толстостенных труб

ИЭС разработаны, изготовлены и внедрены в производство на ОАО «ХТЗ» установки для АУЗК — НК-204 и НК-205. Установка НК-205 (рис. 2) представляет собой многоканальную систему УЗК и позволяет обнаруживать дефекты шва и ОШЗ, а также контролировать трубы с толщиной стенки до 25 мм и выявлять дефекты продольной и поперечной ориентации.

В установке НК-205 использована схема прозвучивания швов, приведенная на рис. 3.



Поскольку АУЗК в настоящее время не позволяет однозначно определять характер дефекта, а РТК не всегда обнаруживает тонкие и наклонные трещины (это даже оговорено ГОСТ 7512–82 [3]), а также стянутые непровары, необходимо продолжить работы по совершенствованию АУЗК.

При современном УЗ оборудовании, имеющем выход на компьютер, запись сигналов с экрана УЗ дефектоскопа не составляет большого труда. Проблема при УЗК заключается в методике идентификации дефектов по их расположению в шве, форме и размерам, а также разделению дефектов шва и ОШЗ с учетом ложных сигналов (акустические и электрические шумы, сигналы от валика усиления и т. п.).

В настоящее время на ОАО «ХТЗ» для уточнения характера дефекта при несовпадении результатов АУЗК и РТК применяется РУЗК. Если АУЗК будет совершенствоваться в части повышения достоверности обнаружения наиболее опасных дефектов с учетом дефектов прикромочной зоны, то технологии арбитражного РУЗК будут насыщаться элементами компьютерной техники, применением более совершенных методов типа дифрагированных волн (TOFD) или синтезированной акустической апертуры (SAFT) и др. Эти технологии позволяют с большей точностью (до долей миллиметра) определять размеры и расположение плоскостных дефектов и реализуются с помощью современных компьютеризированных УЗ дефектоскопов.

Есть все основания предполагать, что в ближайшие годы с развитием цифровой радиографии [4, 5] просвечивать рентгеновскими лучами будут не только торцы труб, а и все сварное соединение. Следует отметить, что в общие затраты времени и средств по цифровой радиографической технологии почти не отличаются от таковых при традиционных вариантах контроля, а надежность НК повышается существенно. При этом будет полностью просвечено все сварное соединение, включая концы труб, а результаты контроля зафиксированы документально.

В последнее время для задач НК трубопроводов наблюдается возобновление работ по бесконтактному УЗК, использующему электромагнитно-акустический метод (ЭМА). Опыты, проведенные ИЭС на Кременчугской насосно-перекачивающей станции, показали перспективность ЭМА-метода для УЗК труб магистральных трубопроводов. Бесконтактный ЭМА-метод УЗК имеет ряд преимуществ перед традиционным УЗК [6].

В последние годы для механизации магнитопорошкового контроля (МПК) используются магнитные линзы, применение которых значительно улучшает условия гигиены МПК и уменьшает стоимость используемых материалов. В ИЭС имеется опыт их изготовления [7].

Настало время автоматизации контроля качества изоляционных покрытий труб, в том числе и послойных. Для этих целей используются ультразвуковые, электропотенциальные и емкостные методы НК [8].

Невостребованными остались известные положительные результаты, полученные в ИЭС по применению метода акустической эмиссии (АЭ) при производстве труб [9]. Такие эксперименты в свое время были проведены на ОАО «ХТЗ» на участке охлаждения труб после сварки. При охлаждении металла в его структуре происходит перераспределение внутренних напряжений. Кроме того, внутри всего тела трубы (а не только сварного соединения) могут быть сформировавшиеся дефекты, являющиеся концентраторами напряжений. Поэтому записи сканограмм АЭ и последующие исследования соответствующих дефектов методами УЗК, рентгено- и металлографии показали, что излучения наблюдаются от наиболее опасных дефектов с острыми краями или мелкими трещинами. По результатам записи и анализа сигналов АЭ все трубы можно разделить на три категории:

1) «спокойные» — без дефектов с острыми краями, которые могут перерасти в трещины и далее разрушиться;

2) трубы с умеренным излучением сигналов АЭ (их большинство), которые должны проверяться по ныне действующей технологии НК;

3) «опасные» с повышенным уровнем сигналов АЭ, которые должны подвергаться НК по особой технологии.

Установлено, что соотношение количества труб указанных категорий зависит от общего состояния сварочного процесса. Так, трубы третьей категории наблюдаются в большом количестве в период каких-либо нарушений в технологии сварки или при применении новых сварочных материалов.

Такая технология НК может быть использована на первом этапе в период передела или освоения каких-либо изменений при сварке. Более тщательный НК для труб третьей категории может выполняться по прежней схеме АУЗК–РТК–РУЗК, но с более высокой чувствительностью каждого из методов.

Каждый из используемых методов НК имеет свои пути совершенствования. При этом первоочередными задачами являются:

1) документирование результатов АУЗК и РУЗК — для этого имеются все предпосылки. Запись информации АУЗК может быть реализована в разных вариантах (например, многоканальные дефектоскопы установок НК-205 подключаются к ПК, который запоминает, анализирует и сопоставляет, при необходимости, с результатами РУЗК и других видов НК);

2) освоение информации, получаемой при АУЗК прикромочной зоны, что можно сделать только после выполнения определенных исследований и накопления статистических данных, выработки нормативной базы по разбраковке дефектов шва и ЗТВ;

3) освоение контроля концов труб методом цифровой радиографии с переходом впоследствии на радиографическую запись всего сварного соединения, что по времени и средствам выгоднее, чем выполнение радиографии концов сварного соединения на пленку. При этом информация от радиографического контроля сохраняется в памяти ПК;



4) для четкого разрешения противоречий между АУЗК и РТК при РУЗК, кроме традиционных эхо-методов, следует применять современные методы типа TOFD, SAFT и др.;

5) независимо от освоения метода МПК для обнаружения мелких трещин на поверхности и торце трубы желательно применять вихретоковый метод, легко поддающийся автоматизации;

6) желательно проводить измерение толщины каждого из наносимых на трубы изоляционных покрытий и документирование результатов контроля, что повысит качество изготовления этих труб;

7) о качестве трубы можно судить и по сведениям о состоянии сварочного процесса, которые в сочетании с информацией по п. п. 1–8 должны архивироваться в едином компьютере, выдающем впоследствии подробный сертификат на изделие.

Такое развитие технологии НК будет способствовать повышению качества, а следовательно, и конкурентоспособности отечественных труб для магистральных газопроводов.

1. Шевченко И. Я. Неразрушающие методы контроля сварных соединений труб большого диаметра. — Киев: Об-во «Знание», 1982. — 20 с.

2. Троцкий В. А., Шевченко И. Я., Федоряка П. В., Боровиков А. В., Негляд В. Н. Совершенствование методов и оборудования неразрушающего контроля электросварных труб в процессе их производства // Тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. «Магистральным газонефтепроводам — трубы нового поколения», Ялта–Харьцызск, 2002. — С. 64–68.
3. ГОСТ 7512–82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. — М: Изд-во госстандартов, 1982.
4. Троцкий В. А., Белый Н. Г. Методы цифрового радиационного контроля сварных соединений // Матер. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики», Ялта, 2002. — С. 106–107.
5. Pedersen T. K., Larsen B., Jeppesen L. Experiences with a Digital Radiographic System and phosphor screens // Тр. 15-го Всемир. конгр. WCNDT, Рим, 2000.
6. Троцкий В. А., Радько В. П., Шевченко И. Я., Федоряка П. В., Дзыганский А. И. Электромагнитоакустические приборы для неразрушающего контроля металлоконструкций и элементов изделий, эксплуатируемых в космосе // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2002. — № 3. — С. 26–30.
7. Троцкий В. А. Магнитопорошковый контроль сварных соединений и деталей машин. — Киев: Феникс. — 2002. — 300 с.
8. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1995.
9. Троцкий В. А., Дони А. Р. Применение акустоэмиссионного контроля // Автомат. сварка. — 1989. — № 6. — С. 64–72.

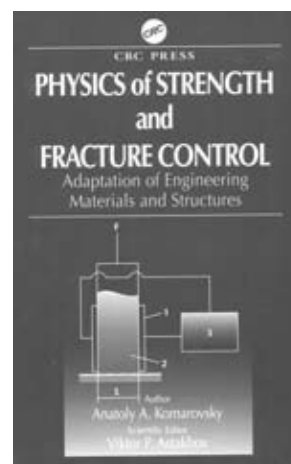
Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев;
ОАО «Харьцыз. трубный з-д»

Поступила в редакцию
05. 04. 2002

НОВАЯ КНИГА

В издательстве CRC Press вышла новая книга А. А. Комаровского «Физика прочности и управление разрушением» (адаптация материалов и конструкций к условиям эксплуатации).

В ней описана новая физическая концепция сопротивления материалов внешним полям (силовым, радиационным, электрическим, электромагнитным и др.). Предлагаемая концепция открывает новое направление в обеспечении прочности и надежности инженерных объектов. Основанный на термодинамическом уравнении состояния, полученном автором, подход предлагает общую методологию связи физических и механических свойств материалов, раскрывает их физическую природу и степень влияния на физическое состояние. Показано, что такой подход позволяет управлять напряженно-деформированным состоянием, предотвращать разрушение и предсказывать поведение материалов. Обсуждаемый подход позволяет решать актуальные практические задачи нетрадиционными методами.



По вопросу приобретения книги или получения дополнительной информации
обращаться по адресу:

CRC Press LLS, 2000 N.W. Corporate Blvd, Boca Raton,
Florida 33431; USA, www.crcpress.com



ОДНОКАНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДВУХЧАСТОТНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ

В. Н. ЗЫБОВ

Рассмотрены особенности построения одноканальных устройств для двухчастотного метода вихретокового контроля на основе векторного суммирования сигналов основной и вспомогательной частот, предварительно преобразованных в сигналы одной промежуточной частоты. Определены условия подавления влияния мешающего фактора и выбора промежуточной частоты в зависимости от влияния мешающего фактора на фазы выходных сигналов вихретокового преобразователя. Переход к одноканальным устройствам позволяет сосредоточить процессы отстройки от влияния мешающего фактора и компенсации начального уровня суммарного сигнала в одном функциональном узле — преобразователе спектра сигналов.

The paper deals with the features of construction of single-channel devices for a two-frequency method of eddy current control, based on vector summing-up of the signals of the base and auxiliary frequency, after their conversion into signals of one intermediate frequency. Conditions are determined of suppressing the influence of the interfering factor and selection of the intermediate frequency, depending on the influence of the interfering factor on the phases of output signals of eddy current converter. Transition to single-channel devices allows focusing the processes of tuning away from the influence of the interfering factor and compensation for the initial level of the summary signal in one functional component - signal spectrum converter.

При разработке устройств для двухчастотного метода вихретокового контроля на основе векторного суммирования выходных сигналов вихретокового преобразователя (ВТП) основной ω_1 и вспомогательной ω_2 частот, предварительно преобразованных в сигналы промежуточной частоты, для формирования суммарного сигнала [1] проводится предварительное частотное разделение сигналов основной и вспомогательной частот, поступающих с выхода ВТП. После разделения они преобразовываются в сигналы одной промежуточной частоты ω_0 и суммируются на переменном токе. В полученном таким образом суммарном сигнале изменение сигнала основной частоты, вызванное воздействием мешающего фактора (МФ), компенсируется соответствующим изменением сигнала вспомогательной частоты, обусловленным изменением того же МФ. Частотное разделение сигналов приводит к необходимости построения такого устройства по двухканальной схеме.

В данной статье анализируются возможности одноканальных устройств в реализации рассмотренного двухчастотного метода контроля и в задаче компенсации начального суммарного сигнала.

В основе построения одноканальных устройств, реализующих двухчастотный метод контроля, лежит преобразование спектра временных функций $U(t)$ и $x(t)$ при их перемножении [2, 3]:

$$Z(t) = U(t)x(t). \quad (1)$$

Основным функциональным узлом устройства, реализующим это преобразование спектра временных функций, будет преобразователь спектра сигналов (ПСС) (рис. 1). Пусть входным сигналом такого ПСС будет сумма гармонических сигналов разных частот и начальных фаз

$$U(t) = \sum_{n=1}^Q A_n \cos(\omega_n t + \varphi_n), \quad (2)$$

которые необходимо преобразовать в сигналы одной промежуточной частоты ω_0 . Для реализации

© В. Н. Зыбов, 2002

такого преобразования выберем коммутационный множитель также в виде суммы гармонических сигналов

$$x(t) = \sum_{m=1}^D U_m \cos(\tilde{\omega}_m t + \psi_m), \quad (3)$$

где U_m , $\tilde{\omega}_m$ и ψ_m — соответственно амплитуды, частоты и начальные фазы составляющих этого множителя.

Согласно уравнению (1) с учетом формул (2), (3) выходной сигнал ПСС будет включать следующие спектральные составляющие:

$$Z(t) = \sum_{n=1}^Q \sum_{m=1}^D \frac{A_n U_m}{4} \{ \exp j[(\omega_n + \omega_m)t + \varphi_n + \psi_m] + \exp(-j[(\omega_n + \omega_m)t + \varphi_n + \psi_m]) + \exp j[(\omega_n - \omega_m)t + \varphi_n - \psi_m] + \exp(-j[(\omega_n - \omega_m)t + \varphi_n - \psi_m]) \}. \quad (4)$$

Для преобразования спектральных составляющих входного сигнала $U(t)$ в сигналы промежуточной частоты необходимо, чтобы частоты составляющих коммутационного множителя удовлетворяли условию

$$\pm(\omega_n \pm \omega_m) = \omega_0,$$

из которого следует, что

$$\omega_m = \pm(\omega_0 \mp \omega_n). \quad (5)$$

В этом случае в спектре выходного сигнала ПСС будут спектральные составляющие с частотой ω_0 . Из выражения (4) следует, что для рассмотренного преобразования число составляющих входного сигнала и коммутационного множителя должны быть одинаковыми.

Применительно к устройствам двухчастотного метода контроля ограничимся случаем, когда входной сигнал ПСС имеет три составляющие, в которых $\omega_1 \neq \omega_2 \neq \omega_3$. В соответствии с рассмотренным формированием спектра выходного сигнала ПСС

для преобразования этих составляющих в сумму сигналов промежуточной частоты ω_0 коммутационный множитель должен иметь также три составляющие с частотами

$$\tilde{\omega}_1 = \pm(\omega_0 \mp \omega_1), \quad \tilde{\omega}_2 = \pm(\omega_0 \mp \omega_2), \quad \tilde{\omega}_3 = \pm(\omega_0 \mp \omega_3).$$

При таком числе составляющих коммутационного множителя будет значительным и спектр выходного сигнала ПСС. Для его упрощения рассмотрим случай, когда входной сигнал ПСС имеет две составляющие. Согласно формуле (5)

$$\tilde{\omega}_1 = \pm(\omega_0 \mp \omega_1), \quad \tilde{\omega}_2 = \pm(\omega_0 \mp \omega_2). \quad (6)$$

Приняв $\tilde{\omega}_1 = \tilde{\omega}_2$, из равенства

$$\pm(\omega_0 \mp \omega_1) = \pm(\omega_0 \mp \omega_2)$$

определяем промежуточную частоту преобразования ω_0 для этого случая:

$$\omega_0 = \frac{(\omega_2 \pm \omega_1)}{2}.$$

Подставляя найденные значения промежуточной частоты преобразования в выражение (4) при $Q = 2$ и $D = 1$, найдем, что для $\omega_{01} = (\omega_2 + \omega_1)/2$ частота составляющей коммутационного множителя будет $\tilde{\omega}_{01} = (\omega_2 - \omega_1)/2$, а частоту $\omega_{02} = (\omega_2 - \omega_1)/2$ обеспечивает коммутационный множитель с частотой $\tilde{\omega}_{02} = (\omega_2 + \omega_1)/2$. Таким образом, путем выбора частоты коммутационного множителя $\tilde{\omega}_{01}$ либо $\tilde{\omega}_{02}$ возможно формирование суммарного сигнала на промежуточной частоте ω_0 при использовании коммутационного множителя с одной спектральной составляющей. В этом случае значительно упрощается спектр выходного сигнала ПСС.

Воспользовавшись полученным результатом, перейдем к рассмотрению преобразования входного сигнала ПСС вида:

$$U_{\text{вх. ПСС}} = U_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + U_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2) + w U_k \cos(\omega_3 t + \theta_0).$$

Здесь два первых слагаемых — составляющие выходного сигнала ВТП соответственно на основной и вспомогательной частотах, а третье слагаемое — дополнительная составляющая входного сигнала ПСС с масштабным множителем w для изменения амплитуды U_k . Для его преобразования рассмотрим коммутационный множитель вида

$$x(t) = U_0 \cos\left(\frac{\omega_2 \pm \omega_1}{2} t + \xi_0\right) + U_0 \cos(\tilde{\omega}_x t + \psi_k).$$

Принимая $\omega_0 = (\omega_2 \pm \omega_1)/2$, из соотношения (5) найдем, что частота второй спектральной составляющей коммутационного множителя

$$\tilde{\omega}_x = \tilde{\omega}_{1,2} = \frac{\omega_2 \mp \omega_1}{2} - \omega_3. \quad (7)$$

Найдем составляющие выходного сигнала ПСС.

Пусть $\omega_0 = (\omega_2 - \omega_1)/2$. Согласно формуле (7) $\tilde{\omega}_1 = (\omega_2 - \omega_1)/2 - \omega_3$. Тогда

$$\begin{aligned} U_{\text{вых. ПСС}}(t) = & \frac{U_0}{4} \{ U_1 [\exp j(\omega_1 t + \varphi_1) + \exp(-j(\omega_1 t + \varphi_1))] + \\ & + U_2 [\exp j(\omega_2 t + \varphi_2) + \exp(-j(\omega_2 t + \varphi_2))] + \\ & + w U_k [\exp j(\omega_3 t + \theta_0) + \exp(-j(\omega_3 t + \theta_0))] \} \times \\ & \times \left\{ \left[\exp j\left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2} t + \xi_0\right) + \exp\left(-j\left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2} t + \xi_0\right)\right) \right] + \right. \\ & + \left[\exp j\left(\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} - \omega_3\right) t + \psi_k\right) + \right. \\ & \left. \left. + \exp\left(-j\left(\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} - \omega_3\right) t + \psi_k\right)\right) \right] \right\}. \quad (8) \end{aligned}$$

Для упрощения записи примем $U_0 = 1$. После несложных преобразований находим, что в спектре выходного сигнала ПСС присутствуют следующие основные спектральные составляющие на промежуточной частоте, которые отфильтровываются полосовым фильтром (ПФ):

$$\begin{aligned} U_{\text{вых. ПСС}}(t) \Rightarrow & \text{ПФ}(\omega_0) \frac{1}{4} \{ U_1 [\exp j\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t + \xi_0 - \varphi_1\right) + \\ & + \exp\left(-j\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t + \xi_0 - \varphi_1\right)\right)] + \\ & + U_2 [\exp j\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t + \varphi_2 - \xi_0\right) + \\ & + \exp\left(-j\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t + \varphi_2 - \xi_0\right)\right)] + \\ & + w U_k [\exp j\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t + \psi_k + \theta_0\right) + \\ & + \exp\left(-j\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t + \psi_k + \theta_0\right)\right)] \}. \end{aligned}$$

На выходе ПФ, настроенного на промежуточную частоту $\omega_0 = (\omega_2 - \omega_1)/2$, выделяются следующие составляющие:

$$\begin{aligned} U_{\text{вых. ПФ}}(t) = & U_1 \cos\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t + \xi_0 - \varphi_1\right) + \\ & + U_2 \cos\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t + \varphi_2 - \xi_0\right) + \\ & + w U_k \cos\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t + \psi_k + \theta_0\right). \quad (9) \end{aligned}$$

Два первых слагаемых в выражении (9) — это выходные сигналы ВТП основной и вспомогательной частот, преобразованные в сигналы промежуточной частоты ω_0 . Третья составляющая используется для компенсации начального уровня суммарного сигнала, образованного двумя первыми слагаемыми.

Компенсация осуществляется изменением параметров компенсирующего сигнала, т. е. его амплитуды U_k (изменение коэффициента w) и фазы ψ_k . Рассмотренное преобразование условно можно



представить в виде двух таких операций преобразования:

выходных сигналов ВТП основной и вспомогательной частот в сигналы промежуточной частоты, осуществляемое первой составляющей коммутационного множителя;

компенсирующего сигнала в сигнал промежуточной частоты, осуществляемое второй составляющей коммутационного множителя.

Преобразованные сигналы основной и промежуточной частот на выходе ПФ образуют векторную сумму

$$\begin{aligned} U_{\Sigma_0}(t) &= \operatorname{Re} \left[U_{10} \exp j \left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t + \xi_0 - \varphi_{10} \right) + \right. \\ &\quad \left. + U_{20} \exp j \left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t + \varphi_{20} - \xi_0 \right) \right] = \\ &= \operatorname{Re} \left[U_{10} \exp j (\xi_0 - \varphi_{10}) + \right. \\ &\quad \left. + U_{20} \exp j (\varphi_{20} - \xi_0) \right] \exp j \frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t. \end{aligned} \quad (10)$$

Определим условия подавления влияния мешающего фактора (МФ) в суммарном сигнале. Для этого достаточно рассмотреть сумму в квадратных скобках выражения (10)

$$\vec{U}_{\Sigma_0} = U_{10} \exp j (\xi_0 - \varphi_{10}) + U_{20} \exp j (\varphi_{20} - \xi_0),$$

где U_{10} , U_{20} , φ_{10} , φ_{20} — начальные амплитуды и фазы сигналов основной и вспомогательной частот соответственно.

Изменение МФ обуславливает изменение информативных параметров сигналов основной и вспомогательной частот на выходе ВТП. При этом изменяется и их суммарный сигнал на промежуточной частоте

$$\begin{aligned} \vec{U}_{\Sigma} &= U_1 \exp j [\xi_0 - \varphi_{10} - \Delta\varphi_1] + \\ &+ U_2 \exp j (\varphi_{20} + \Delta\varphi_2 - \xi_0) = U \exp (-j\Delta\varphi_1) \exp j (\xi_0 - \varphi_{10}) + \\ &+ U_2 \exp j \Delta\varphi_2 \exp j (\varphi_{20} - \xi_0), \end{aligned}$$

где U_1 , U_2 , $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2$ — амплитуды и приращения фаз этих сигналов при изменении МФ на некоторую величину.

Суммарный сигнал изменяется на величину

$$\begin{aligned} \Delta \vec{U}_{\Sigma} &= \vec{U}_{\Sigma} - \vec{U}_{\Sigma_0} = \\ &= \left(\frac{U_1}{U_{10}} \exp (-j\Delta\varphi_1) - 1 \right) U_{10} \exp j (\xi_0 - \varphi_{10}) + \\ &+ \left(\frac{U_2}{U_{20}} \exp j \Delta\varphi_2 - 1 \right) U_{20} \exp j (\varphi_{20} - \xi_0) = \\ &= [(q_1 \exp (-j\Delta\varphi_1) - 1) + m \exp j (\varphi_{20} + \varphi_{10} - 2\xi_0) \times \\ &\quad \times (q_2 \exp j \Delta\varphi_2 - 1)] U_{10} \exp j (\xi_0 - \varphi_{10}), \end{aligned}$$

где $q_1 = U_1/U_{10}$; $q_2 = U_2/U_{20}$; $m = U_{20}/U_{10}$.

Подавление влияния МФ в суммарном сигнале характеризуется нулевым приращением суммарного сигнала при изменении МФ, т. е. $\Delta \vec{U}_{\Sigma} = 0$, что выполняется при

$$(q_1 \exp (-j\Delta\varphi_1) - 1) + m \exp j (\varphi_{20} + \varphi_{10} - 2\xi_0) \times (q_2 \exp j \Delta\varphi_2 - 1) = 0.$$

Преобразуем это выражение к следующему виду:

$$\begin{aligned} &\sqrt{q_1^2 - 2q_1 \cos \Delta\varphi_1 + 1} \exp \left(j \arctg \frac{q_1 \sin \Delta\varphi_1}{q_1 \cos \Delta\varphi_1 - 1} \right) + \\ &+ m \sqrt{q_2^2 - 2q_2 \cos \Delta\varphi_2 + 1} \times \\ &\times \exp j \left(\arctg \frac{q_2 \sin \Delta\varphi_2}{q_2 \cos \Delta\varphi_2 - 1} + \varphi_{20} + \varphi_{10} - 2\xi_0 \right) = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Равенство (11) реализуется при выполнении амплитудных и фазовых условий

$$\begin{aligned} \sqrt{q_1^2 - 2q_1 \cos \Delta\varphi_1 + 1} &= m \sqrt{q_2^2 - 2q_2 \cos \Delta\varphi_2 + 1}, \\ \varphi_{20} + \varphi_{10} - 2\xi_0 + \arctg \frac{q_2 \sin \Delta\varphi_2}{q_2 \cos \Delta\varphi_2 - 1} + \\ &+ \arctg \frac{q_1 \sin \Delta\varphi_1}{q_1 \cos \Delta\varphi_1 - 1} = \pi. \end{aligned} \quad (12)$$

Проведем аналогичные преобразования для промежуточной частоты $\omega_0 = (\omega_2 + \omega_1)/2$. Как и в предыдущем случае, используем коммутационный множитель с двумя составляющими

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{1}{2} \left\{ \left[\exp j \left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t + \xi_0 \right) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \exp \left(-j \left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t + \xi_0 \right) \right) \right] + \right. \\ &\quad \left. + \left[\exp j \left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2} t - \omega_3 \right) + \psi_k \right] + \right. \\ &\quad \left. + \exp \left(-j \left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2} t - \omega_3 \right) + \psi_k \right) \right\}. \end{aligned}$$

На выходе ПСС в этом случае будут присутствовать спектральные составляющие промежуточной частоты, которые отфильтровываются ПФ.

Проведя преобразования, аналогичные предыдущему случаю, определим, что подавление влияния МФ в данном случае осуществляется, если

$$\begin{aligned} &\sqrt{q_1^2 - 2q_1 \cos \Delta\varphi_1 + 1} \exp \left(j \arctg \frac{q_1 \sin \Delta\varphi_1}{q_1 \cos \Delta\varphi_1 - 1} \right) + \\ &+ w \sqrt{q_2^2 - 2q_2 \cos \Delta\varphi_2 + 1} \exp j (\varphi_{20} - \varphi_{10} - 2\xi_0 + \\ &+ \arctg \frac{q_2 \sin \Delta\varphi_2}{q_2 \cos \Delta\varphi_2 - 1}) = 0, \end{aligned}$$

т. е. при выполнении условий

$$\begin{aligned} \sqrt{q_1^2 - 2q_1 \cos \Delta\varphi_1 + 1} &= w \sqrt{q_2^2 - 2q_2 \cos \Delta\varphi_2 + 1}, \\ \varphi_{20} - \varphi_{10} - 2\xi_0 + \arctg \frac{q_2 \sin \Delta\varphi_2}{q_2 \cos \Delta\varphi_2 - 1} - \\ &- \arctg \frac{q_1 \sin \Delta\varphi_1}{q_1 \cos \Delta\varphi_1 - 1} = \pi. \end{aligned} \quad (13)$$

Сопоставляя условия подавления влияния МФ в уравнениях (12) и (13), можно отметить следующее. Если в (12) фазовые условия выполняются при изменении фаз $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$ разных знаков, то в (13) эти же условия выполняются при приращении фаз одного знака. Это накладывает определенные условия на выбор промежуточной частоты преобразования выходных сигналов ВТП, состоящие в том, что выбор ω_0 зависит от влияния МФ на фазы сигналов основной и вспомогательной частот. Если при воздействии МФ изменения фаз $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$ одного знака, то выполняются условия (13) и выбирается $\omega_0 = (\omega_2 + \omega_1)/2$, а при разных знаках этих приращений фаз следует выбирать $\omega_0 = (\omega_2 - \omega_1)/2$. Выполнение отмеченных условий достигается изменением коэффициента m (изменение амплитуды U_2 сигнала вспомогательной частоты) и суммы начальных фаз $\Phi_0 = \varphi_{20} - \varphi_{10} - 2\xi_0$. При неизменной фазе сигнала основной частоты фаза Φ_0 может регулироваться изменением φ_{20} или фазы ξ_0 . Третья составляющая входного сигнала ПСС используется для компенсации остаточного небаланса ВТП, и ее информативные параметры не должны зависеть от параметров подсистемы «вихретоковый преобразователь – объект контроля» (ВТП – ОК). Возможны два варианта регулировки фазы компенсирующего сигнала: фазовый угол θ_0 , входящий в составляющую входного сигнала ПСС, и ψ_k , входящий в составляющую коммутационного множителя. На рис. 2 представлена структурная схема одноканального устройства для двухчастотного метода контроля с компенсацией начального небаланса ВТП. Генераторами 1 и 2 основной и вспомогательной частот соответственно в сумматоре 8 формируется двухчастотное напряжение возбуждения, поступающее на вход вихретокового преобразователя 9. В блоке 4 осуществляется регулировка амплитуды сигнала вспомогательной частоты (коэффициент m) для выполнения амплитудных условий подавления влияния МФ. В сумматоре 12 выходной двухчастотный сигнал ВТП суммируется с компенсирующим сигналом от генератора 3, амплитуда которого регулируется в блоке 5. Выходной сигнал сумматора 12 является входным для преобразователя спектра сигналов 14.

Полосовым фильтром 17 из спектра выходного сигнала ПСС 14 отфильтровывается суммарный сигнал промежуточной частоты ω_0 , который поступает на вход блока отображения результатов контроля 18. Остальные блоки служат для формирования составляющих коммутационного множителя. Так, ПСС 6 формируются сигналы суммарной (разностной) частот $\omega_2 \pm \omega_1$. В блоке 10, включающем делитель частоты и ПФ, выделяются сигналы с частотами $(\omega_2 \pm \omega_1)/2$ и $(\omega_2 \pm \omega_1)/2$. Пер-

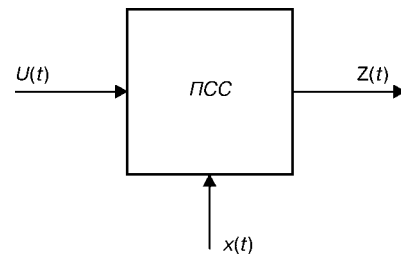


Рис. 1. Схема преобразования спектра временных функций с помощью ПСС

вый из них поступает с *вых. 1* блока 10 на вход фазовращателя 13, которым регулируется фаза ξ_0 первой составляющей коммутационного множителя. Второй сигнал с *вых. 2* блока 10 поступает на вход ПСС 7, и ПФ 11 формируется вторая составляющая коммутационного множителя, а фазовращателем 16 регулируется ее фаза ψ_k . В сумматоре аналоговых сигналов 15 строится сигнал коммутационного множителя, поступающий на управляющий вход ПСС 14. Как отмечалось, регулировку фазы компенсирующего сигнала можно осуществлять фазой третьей составляющей входного сигнала ПСС 14. В этом случае соответствующий фазовращатель стоит в канале компенсирующего сигнала. На рис. 2 блок этого фазовращателя отмечен штриховой линией.

Подготовка к работе устройства, реализованного по схеме рис. 2, включает две операции:

1) отстройку от влияния мешающего фактора, т. е. установку соответствующих значений начальных амплитуды и фазы сигнала вспомогательной частоты;

2) компенсацию начального уровня суммарного сигнала.

Первой для повышения глубины подавления влияния МФ, должна проводиться компенсация начального уровня суммарного сигнала. Однако при выполнении операции отстройки от влияния мешающего фактора (выбор коэффициента m фазы

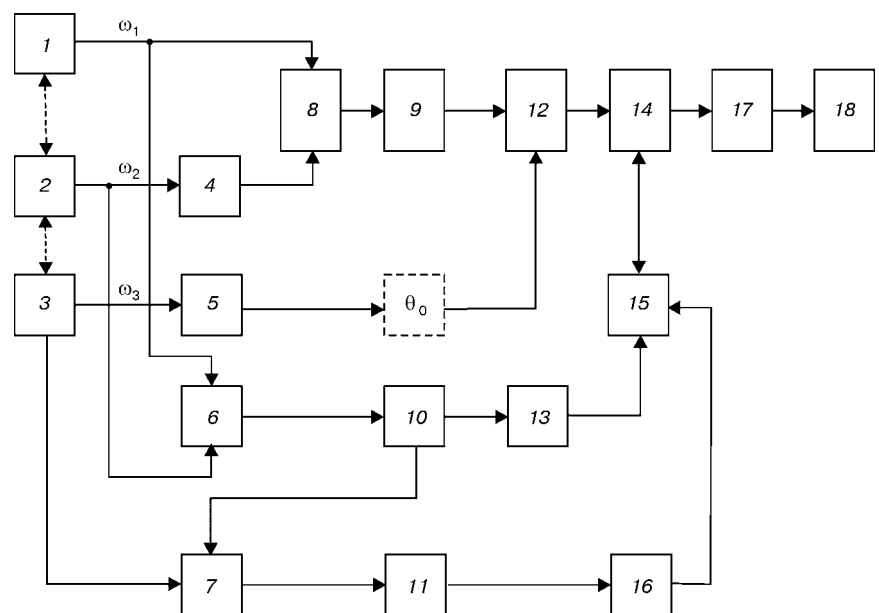


Рис. 2. Структурная схема одноканального устройства для двухчастотного метода контроля с компенсацией начального небаланса ВТП (обозначения см. в тексте)

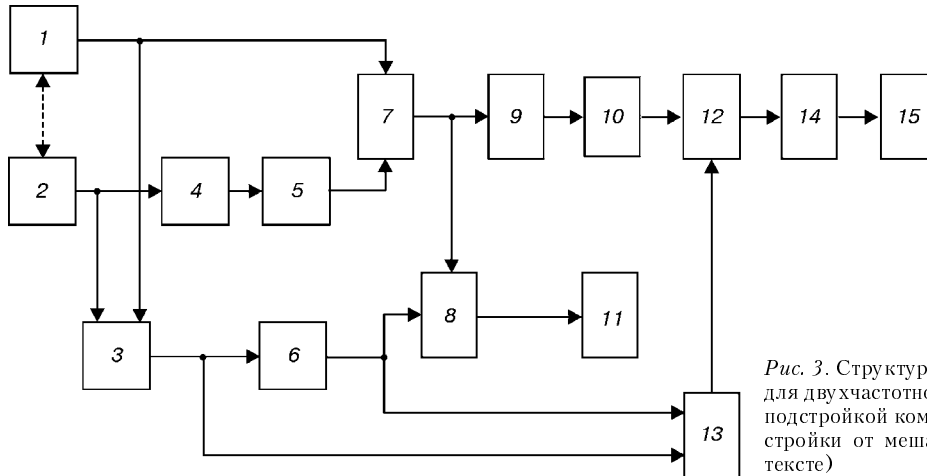


Рис. 3. Структурная схема одноканального устройства для двухчастотного метода контроля с автоматической подстройкой компенсирующего сигнала в процессе отстройки от мешающего фактора (обозначения см. в тексте)

Φ_0) изменяются параметры суммарного сигнала и нарушается его компенсация, что требует ее повторения уже для новых значений параметров сигнала вспомогательной частоты. Поэтому при реализации устройства по схеме рис. 2 эти операции оказываются взаимосвязанными, что затрудняет их выполнение.

Устройство, структурная схема которого представлена на рис. 3, лишена этого недостатка. В такой структуре изменение параметров сигнала вспомогательной частоты, вводимые в процессе уменьшения влияния МФ, автоматически отслеживаются в компенсирующем сигнале. Для этого частота третьей спектральной составляющей входного сигнала ПСС выбирается равной промежуточной частоте проводимого преобразования выходных сигналов ВТП.

Устройство включает следующие основные функциональные узлы: задающие генераторы основной 1 и вспомогательной 2 частот; регулятор амплитуды 4 и фазы 5 сигнала вспомогательной частоты; сумматор 7 для формирования двухчастотного напряжения возбуждения; ВТП 9; сумматор 10, в котором выходной сигнал ВТП суммируется с компенсирующим сигналом; умножитель 12, в котором осуществляется преобразование выходных сигналов ВТП и компенсирующего сигнала в сигналы промежуточной частоты; полосовой фильтр 14 для фильтрации этих сигналов и регистрирующее устройство 15. Умножителем 3 и делителем частоты 6 обеспечиваются сигналы суммарной (разностной) и полусуммарной (полуразностной) частот для формирования коммутационного множителя, осуществляемого в сумматоре 13. Умножителем 8 формируется компенсирующий сигнал, амплитуда и фаза которого регулируются в блоке 11. Для этого на его вход поступает с выхода сумматора 7 суммарный сигнал

$$U_{\text{вх. ПСС}} = U_{10} \cos(\omega_1 t + \varphi_{10}) + U_{20} \cos(\omega_2 t + \varphi_{20})$$

с регулируемыми параметрами сигнала вспомогательной частоты. Коммутационным множителем служит выходной сигнал делителя частоты 6

$$x(t) = U_0 \cos\left(\frac{\omega_2 \pm \omega_1}{2} t\right) \xrightarrow{U_0=1} \cos\left(\frac{\omega_2 \pm \omega_1}{2} t\right).$$

Для упрощения записи в коммутационном множителе не учитывается начальная фаза, так как она постоянна и не влияет на последующие преобразования.

В спектре выходного сигнала умножителя 8 формируется векторная сумма сигналов на промежуточной частоте

$$\begin{aligned} U_{\text{вх. ПСС}} &= \frac{1}{2} \left[U_{10} \cos\left(\frac{\omega_2 \mp \omega_1}{2} t + \varphi_{10}\right) + \right. \\ &\quad \left. + U_{20} \cos\left(\frac{\omega_2 \mp \omega_1}{2} t + \varphi_{20}\right) \right] = \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} [U_{10} \exp j\varphi_{10} + U_{20} \exp j\varphi_{20}] \exp j\left(\frac{\omega_2 \pm \omega_1}{2} t\right), \end{aligned}$$

которая и отфильтровывается. На выходе блока 11 регулируется амплитуда и фаза этого компенсирующего сигнала. С учетом этого входной сигнал ПСС 12 будет включать следующие составляющие:

$$\begin{aligned} U_{\text{вх. ПСС}} &= U_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + U_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2) + \\ &+ w [U_{10} \cos \omega_{10} + U_{20} \cos \varphi_{20}] \cos\left(\frac{\omega_2 \pm \omega_1}{2} t + \psi_k\right) = \\ &= \frac{1}{2} \{ U_1 [\exp j(\omega_1 t + \varphi_1) + \exp(-j(\omega_1 t + \varphi_1))] + \\ &\quad + U_2 [\exp j(\omega_2 t + \varphi_2) + \exp(-j(\omega_2 t + \varphi_2))] + \\ &\quad + w U_{\Sigma k} [\exp j\left(\frac{\omega_2 \pm \omega_1}{2} t + \psi_k\right) + \exp(-j\left(\frac{\omega_2 \pm \omega_1}{2} t + \psi_k\right))] \}, \end{aligned}$$

где

$$U_{\Sigma k} = [U_{10} (\exp j\varphi_{10} + \exp(-j\varphi_{10})) + U_{20} (\exp j\varphi_{20} + \exp(-j\varphi_{20}))].$$

Коммутационный множитель включает две частотные составляющие:

$$x(t) = U_0 \cos \left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2} t \right) + U_0 \cos (\omega_2 \pm \omega_1) t \Rightarrow U_0 = 1 \\ \Rightarrow \frac{1}{2} [\exp(j \frac{\omega_2 + \omega_1}{2} t) + \exp(-j \frac{\omega_2 + \omega_1}{2} t)] + \\ + [\exp(j(\omega_2 \pm \omega_1) t) + \exp(-j(\omega_2 \pm \omega_1) t)]$$

В этом случае в выходном сигнале ПСС присутствуют составляющие, формирующие искомую векторную сумму сигналов:

$$U_{\text{вых. ПСС}}(t) = \frac{1}{4} \{ U_1 [\exp(j(\omega_1 t + \varphi_1)) + \exp(-j(\omega_1 t + \varphi_1))] + \\ + U_2 [\exp(j(\omega_2 t + \varphi_2)) + \exp(-j(\omega_2 t + \varphi_2))] + \\ + \omega U \sum_k \left[\exp(j \left(\frac{\omega_2 \pm \omega_1}{2} t + \psi_k \right)) + \exp \left(-j \left(\frac{\omega_2 \pm \omega_1}{2} t + \psi_k \right) \right) \right] \} \times \\ \times \left\{ \exp(j \left(\frac{\omega_2 \pm \omega_1}{2} t \right)) + \exp \left(-j \left(\frac{\omega_2 \pm \omega_1}{2} t \right) \right) \right\} + \\ + [\exp(j(\omega_2 \pm \omega_1) t) + \exp(-j(\omega_2 \pm \omega_1) t)]$$

Так, для $\omega_0 = (\omega_2 + \omega_1)/2$ на выходе ПСС формируется следующая векторная сумма:

$$U_{\text{вых. ПСС}}(t) = \frac{1}{2} \text{Re} [\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1 U_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)} \times \\ \times \exp \left(j \arctg \frac{U_1 \sin \varphi_1 + U_2 \sin \varphi_2}{U_1 \cos \varphi_1 + U_2 \cos \varphi_2} \right) + \\ + \omega \sqrt{U_{10}^2 + U_{20}^2 + 2U_1 U_2 \cos(\varphi_{20} - \varphi_{10})} \times \\ \times \exp \left(j \left(\psi_k + \arctg \frac{U_1 \sin \varphi_{10} + U_{20} \sin \varphi_{20}}{U_{10} \cos \varphi_{10} + U_{20} \cos \varphi_{20}} \right) \right) \times \\ \times \exp(j \left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2} t \right))$$

Поскольку ВТП вносит дополнительные фазовые приращения, то разность фазовых углов $(\varphi_{20} -$

$\varphi_{10})_{\text{ВТП}}$ в первом слагаемом при неизменных значениях ВФ (разность фаз основной и вспомогательной частот на выходе ВТП) будет отличной от соответствующей разности фаз $(\varphi_{20} - \varphi_{10})_{\Sigma}$ на выходе сумматора 7. Однако это отличие

$$\Delta = (\varphi_{20} - \varphi_{10})_{\text{ВТП}} - (\varphi_{20} - \varphi_{10})_{\Sigma}$$

будет постоянным и компенсируется выбором коэффициента ω и фазы ψ_k .

С учетом этого процесс подготовки такого устройства к работе заключается в следующем:

1) компенсации начального уровня небаланса ВТП, реализуемой выбором соответствующих значений коэффициента ω и фазы ψ_k ;

2) отстройки от влияния МФ. Вводится вариация этого фактора и изменением параметров сигнала вспомогательной частоты (амплитуды и фазы) достигается минимум приращения выходного сигнала измерительного канала устройства. Поскольку параметры сигнала вспомогательной частоты φ_{20} и U_{20} входят и в компенсирующий сигнал, то при их вариации изменяется и последний.

Таким образом, переход к одноканальным устройствам позволяет снизить погрешность контроля, обусловленную двухканальностью измерительной части прибора, и сосредоточить процессы отстройки от влияния МФ и компенсации начального уровня суммарного сигнала в одном функциональном узле — ПСС.

1. А. с. 169680 СССР. Способ многопараметрового контроля изделий вихревыми токами / В. П. Денискин, Л. И. Трахтенберг. — Оpubл. 17.03.1965; Бюл. № 7.
2. Электронные узлы переносной низкочастотной измерительной аппаратуры / Л. Я. Мизюк, А. Э. Вишняков, В. И. Гольдгелтер, В. К. Рыбин. — СПб.: Энергия, 1969. — 69 с.
3. Зыбов В. Н. Выбор частоты и фазы коммутационного множителя для одноканального устройства при двухчастотном методе контроля // Отбор и передача информации: Респ. межвед. сб. науч. тр. / Физ.-мех. ин-т. АН УССР. — 1985. — Вып. 71. — С. 75–85.

Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины,
Львов

Поступила в редакцию
01.04.2002

НОВАЯ КНИГА!

Ж. Дюбрессон. Виды неразрушающего контроля и качества сварки. — Париж: Публикации по сварке и ее применениям, 2002 г. — 496 с.

Формат 21×29,7 см, в твердом переплете. Цена 150 евро.

По вопросам приобретения обращаться в издательство:

PUBLICATIONS du SOUDAGE et de ses APPLICATIONS

90, rue des Vanesses — Z. I. PARIS NORD II

BP 50362-93420 VILLEPINTE

Tel.: 01 49 90 36 00 — Telecopie: 01 49 90 36 50

E-mail: psa3@wanadoo.fr



МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАНАЛА ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ УЗ ТОМОГРАФА UST-2000

В. В. КОШЕВОЙ, О. Е. ЛЕВИЦКИЙ, А. Б. ЛОЗИНСКИЙ

Рассмотрен УЗ вычислительный томограф UST-2000, разработанный в Физико-механическом институте им. Г. В. Карпенко НАН Украины, в основу процедуры восстановления изображений которого положены закономерные аналитические связи между соответствующими физико-механическими (ФМХ) и акустическими характеристиками материала. Предназначен для определения пространственного распределения ФМХ в контрольных металлических толстолистовых образцах.

UT computing tomograph UST-2000 is considered, which is developed at G. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine. In this instrument image restoration procedure is based on regular analytical links between the appropriate physico-mechanical (PMC) and measured acoustic characteristics of the material. The instrument is designed for determination of spatial distribution of PMC in the reference metallic plate samples.

Основой УЗ реконструктивной томографии являются закономерные аналитические связи между соответствующими физико-механическими и измеренными акустическими характеристиками материала (скорость распространения разных типов волн, коэффициент затухания) [1–3]. Собственно аналогичные измерения положены в основу процедуры УЗ томографического восстановления изображений в УЗ вычислительном томографе UST-2000, разработанном в Физико-механическом институте им. Г. В. Карпенко НАНУ в рамках проекта НТЦУ (STCU) № 612. Этот томограф предназначен для определения пространственного распределения (ПР) ФМХ или остаточных напряжений в объеме материала в контрольных металлических толстолистовых образцах [4, 5].

Основой метода томографического восстановления изображений ПР ФМХ в исследуемых контрольных образцах (КО) материала путем регистрации лучевых проекций служит измерение времени распространения УЗ волны вдоль фиксированного пути L при прозвучивании этого образца УЗ колебаниями определенного типа фиксированной частоты под определенным ракурсом β (рис. 1) в разных точках его поверхности [6–8]. Здесь L — путь распространения УЗ волны; K — фиксированная база УЗ пары излучатель (И) — приемник (П), которая определяет максимум амплитуды принятого сигнала при данном угле ввода; β — вертикальный угол прозвучивания, или угол ввода.

Пусть ПР скорости распространения УЗ колебаний в двумерном сечении исследуемого КО описывается функцией $V(x, y)$ или адекватной функцией медленности УЗ колебаний $b(x, y)$, где $b = 1/V$. Тогда временная лучевая проекция определяется как

$$P_{\beta} = \int_L b(x, y) dL, \quad (1)$$

где β — угол, под которым получена проекция, отвечающий углу ввода УЗ колебаний в материал образца.

Для реконструкции внутренней структуры распределения ФМХ на основе лучевых проекций (1) необходимо знать полную систему лучевых проек-

ций для разных значений азимутального угла (угла поворота) положения пары И–П в плоскости поверхности сканирования в интервале $0 \dots 360^\circ$. Они представляют собою множество лучевых проекций, полученных при сканировании вдоль поверхности образца в заданном поле контроля с некоторым шагом при разных азимутальных углах.

В УЗ томографе UST-2000 УЗ блок прозвучивания представляет собою монолитную конструкцию, в которой по периметру круга равномерно размещены семнадцать УЗ пар с углом ввода 60° . Это обеспечивает прозвучивание образца в азимутальной плоскости с шагом 10° в интервале $0 \dots 360^\circ$ без применения системы механического поворота томографического блока прозвучивания.

Особенность соотношений, связывающих значения соответствующих ФМХ с измеренными скоростями УЗ волн, заключается в том, что для получения на их основании полезной информации нужна высокая точность определения скорости. В этом случае первоочередной интерес представляет измерение не столько абсолютной величины скорости УЗ волны, сколько ее изменений, причем чувствительность канала измерения должна быть достаточно высокой, поскольку возможные изменения скорости могут иметь порядок $0,1\%$ и менее ($0,01\%$), если речь идет о восстановлении пространственной структуры распределения остаточных напряжений [9].

В данной работе рассматриваются канал высокоточного измерения временных проекций УЗ томографа UST-2000, реализованного по принципу измерителя временных интервалов (ИВИ) методом автоциркуляции [10], и результаты его экспериментальных исследований в составе электронного блока томографа. Цель исследований — получение

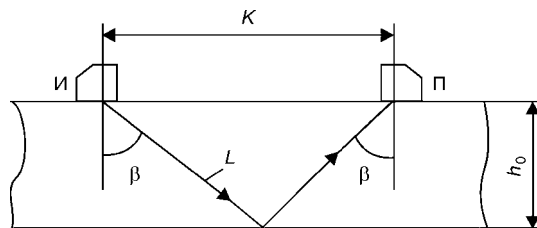


Рис. 1. Схема прозвучивания контрольного образца (обозначения см. в тексте)

реальной оценки точности и чувствительности сверху в реальных условиях проведения временных измерений.

Технические требования к блоку измерения временных интервалов. Оценим в абсолютных единицах минимальный временной дискрет, который должен фиксировать ИВИ. Это позволяет получить еще одну аналитическую оценку, помимо чувствительности, суммарной погрешности и временной нестабильности ИВИ, которые необходимо обеспечить аппаратно.

Рассмотрим геометрию распространения УЗ волны через зону неоднородности ΔL , в которой скорость V_2 отличается от скорости V_0 в основной зоне материала (рис. 2). При отсутствии неоднородности время пробега УЗ волны будет

$$T_0 = L / V_0, \quad (2)$$

а при учете неоднородности соответственно

$$T_{\Sigma} = \frac{L - \Delta L}{V_0} + \frac{\Delta L}{V_2} = \frac{L + \Delta L(V_0/V_2 - 1)}{V_0}. \quad (3)$$

Представим скорость V_2 относительно V_0 как

$$V_2 = V_0(1 \pm \delta_V), \quad (4)$$

где δ_V — относительное изменение скорости в зоне неоднородности. С учетом (4) соотношение (3) запишем в следующем виде:

$$T_{\Sigma} = \frac{L}{V_0}(1 \pm \frac{\Delta L}{L} \delta_V). \quad (5)$$

Отсюда относительное изменение времени распространения за счет неоднородности

$$\delta T_0 = \pm \frac{\Delta L}{L} \delta_V, \quad (6)$$

или в абсолютных единицах времени

$$|\Delta T| = T_0 \frac{\Delta L}{L} \delta_V = \frac{\Delta L}{V_0} \delta_V. \quad (7)$$

Видно, что абсолютное значение изменения времени распространения, которое нужно фиксировать, зависит от длины зоны неоднородности вдоль пути распространения УЗ волны и от относительного изменения скорости в этой зоне. Соотношения (6) и (7) позволяют получить оценку относительной и абсолютной чувствительности ИВИ при заданных величинах $L_{\max}$, $L_{\min}$ и $\delta V_{\min}$.

При $L_{\min} = 5$ и $\delta V_{\min} = 0,01\%$ ($\delta V_{\min} = 10^{-4}$) необходимая чувствительность тракта ИВИ в абсолютных единицах времени для случая распространения поперечных УЗ волн ($V_{от} = 3,2$ мм/мкс), согласно формуле (7), составляет ≈ 156 пс.

Суммарная погрешность тракта ИВИ, значение которой должно быть хотя бы в несколько раз меньше значения абсолютной чувствительности, составляет

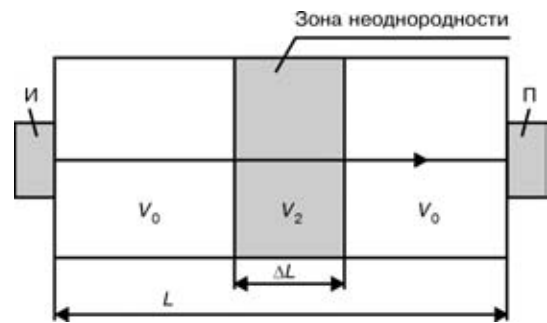


Рис. 2. Геометрия распространения УЗ волны (обозначения см. в тексте)

$$\Delta T \leq \frac{156}{3...4} = 39...52 \text{ пс.}$$

Метрологический анализ канала измерения временных интервалов. Для измерения временных интервалов в УЗ томографе UST-2000 используется метод автоциркуляции (рис. 3).

Ультразвуковой генератор генерирует короткий импульс, который возбуждает излучающий УЗ преобразователь (УЗП). Сигнал с приемного УЗП после усиления каналным услителем подается на компаратор, с помощью которого выделяется передний фронт принятого УЗ сигнала и формируется сигнал повторного перезапуска генератора возбуждения с некоторой задержкой, определяемой калиброванной УЗ линией задержки. Этот процесс непрерывно повторяется до тех пор, пока реверсивный счетчик количества циклов не установится на нуле. В состав канала измерения входит также формирователь измерительного строба. Последний формирует импульс с продолжительностью, равной продолжительности полного периода автоциркуляции, т. е. интервала времени между первым импульсом возбуждения излучающего УЗП и импульсом из компаратора, формирующимся в момент приема эхо-сигнала приемным УЗП в последнем цикле перезапуска.

Таким образом, длина временного интервала T , измеряемая собственно модулем ИВИ, состоит из числа циклов прохождения УЗ колебаний через исследуемый образец, числа циклов формирования

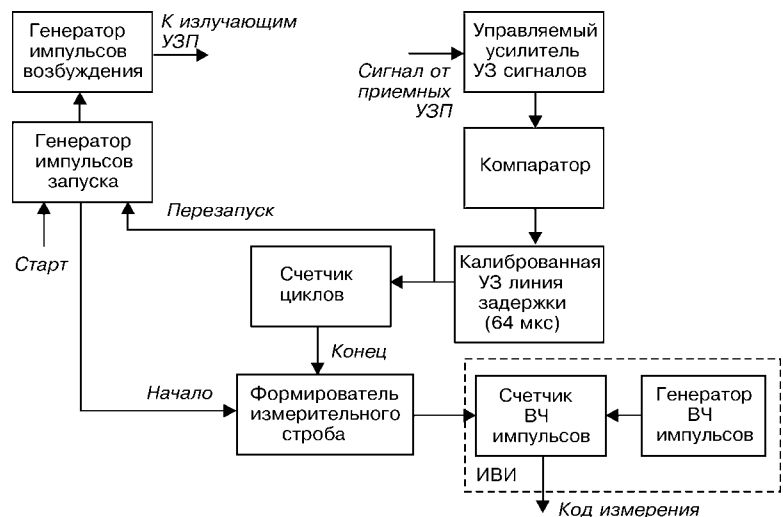


Рис. 3. Структурная схема канала измерения



рабочей паузы (калиброванная задержка) и суммарного времени задержек, вызванных прохождением эхо-сигнала в УЗП и электронном тракте:

$$T = N\tau + N\tau_{к.з} + N(\tau_{пр} + \tau_{тр}),$$

где τ — время распространения УЗ волны в материале образца; $\tau_{к.з}$ — продолжительность рабочей паузы; $\tau_{пр}$, $\tau_{тр}$ — время задержки соответственно в призме и электронном тракте; N — число циклов автоциркуляции.

Отсюда искомая величина τ определяется как

$$\tau = T/N. \quad (8)$$

Соответствующие изменения скорости распространения УЗ волн вычисляются по отклонениям измеренного интервала времени относительно некоторого номинального значения (например, среднего по полю контроля). Если учесть, что величины $\tau_{к.з}$ и $\tau_{пр}$ являются постоянными и в процессе измерений практически не изменяются (их девиации являются величинами 2- и 3-го порядков), а также то, что частотно-фазовая характеристика канала усиления в рабочей полосе линейна и стабильна, то влиянием этих временных параметров на точность определения изменения скорости распространения УЗ волн можно пренебречь. Таким образом, основная погрешность при вычислении изменений скорости фактически будет зависеть от того, с какой точностью система автоциркуляции формирует временной интервал τ , определяемый интервалом между двумя повторными запусками за исключением интервала рабочей паузы плюс время пробега УЗ волны в призмах. Поэтому любые девиации момента повторного запуска, не связанные с изменением скорости распространения УЗ волны, приводят к соответствующей девиации измеренной величины τ . Поскольку стабильность момента повторного запуска в значительной мере зависит от стабильности амплитуды эхо-сигнала и стабильности порогового напряжения на входе компаратора [11], то любые нерегулярные изменения амплитуды эхо-сигнала с приемного УЗП и локальная нестабильность источника опорного напряжения приводят к случайным изменениям величины τ и тем самым — к формированию нерегулярной погрешности при определении фактического времени распространения УЗ волны в образце.

Что касается предельной чувствительности измерений, то согласно алгоритму процедуры измерений автоциркуляционным методом она определяется методической погрешностью собственно ИВИ, в состав которого входят только генератор ВЧ периодической импульсной последовательности и счетчик импульсов (см. рис. 3). Абсолютное значение методической погрешности собственно блока ИВИ определяется из соотношения [10, 11]

$$|\Delta T| = \frac{0,5}{NF_0}, \quad (9)$$

где F_0 — частота ВЧ импульсной последовательности, которой «заполняется» измерительный строб-импульс, отвечающий измеренному интер-

валу времени; N — количество циклов перезапуска.

С целью повышения точности и чувствительности измерения временных интервалов, уменьшения суммарного канального времени измерений, т. е. уменьшения общего времени на проведение измерений в поле контроля, с одной стороны, а также устранения нагрева канальных УЗП томографического блока прозвучивания, с другой, в УЗ томографе UST-2000 частота высокочастотного заполнения была увеличена до 360 МГц. Это позволило при 30 циклах автоциркуляции обеспечить погрешность собственно блока ИВИ, т. е. методическую погрешность без учета влияния канала усиления, на уровне ≤ 50 пс, что соответствует относительной чувствительности измерений изменения скорости распространения УЗ волн порядка $\leq 0,01$ %.

Экспериментальное исследование канала измерения временных интервалов. Как следует из приведенного выше, предельная чувствительность метода автоциркуляции может быть реализована при условии высокой стабильности всей электронной части схемы, отвечающей за формирование сигнала временного интервала (измерительного временного строба-ворота). Сюда входят: канал формирования и приема измерительного УЗ сигнала; канал усиления измерительного УЗ сигнала; схема формирования постоянной (калиброванной) задержки сигнала повторного запуска импульсного генератора возбуждения канальных УЗП; собственно блок ИВИ.

Основная задача исследований состояла в первую очередь в экспериментальной оценке суммарной погрешности измерения времени распространения УЗ волны в тестовом образце и выявлении основных факторов, существенно влияющих на точность измерений.

Метрологические исследования проводили на контрольном плоскопараллельном толстословом образце толщиной 28 мм, изготовленном из стали марки Ст5.

При этом УЗ томографический блок прозвучивания размещали стационарно на его поверхности в некоторой выбранной точке поля контроля (рис. 1), т. е. измерение по все парам УЗП (каналам) проводили без сканирования поля контроля (режим сканирование отключен). Чтобы обеспечить достаточную статистику измерений, временные измерения по всем каналам прозвучивания выполняли при следующих условиях:

амплитуду первого положительного вступления принятого УЗ сигнала устанавливали порядка 2,5 В;

поканальные измерения проводили по каждому из установленных порогов компарации (нижнему и верхнему) $U_{ref1} = 0,5$ В и $U_{ref2} = 1,0$ В;

количество измерений по каждому из каналов принимали равным 100;

измерения в каждой канальной серии повторяли для разных значений временной паузы между двумя последовательными измерениями;

временную паузу между повторными измерениями в каждой канальной серии устанавливали соответственно равной 1; 10; 100 мс.



В томографической системе UST-2000 процессы проведения метрологических измерений и регистрации данных измерений полностью автоматизированы и осуществляются под управлением компьютера с помощью специальной программы «MEASURE TEST», входящей в состав программного пакета виртуальной панели управления аппаратного блока [5].

Эта программа обеспечивает трансляцию массива управляющих сигналов на шину управления канальными коммутаторами, ИВИ и канала усиления, а также последовательность выполнения циклов измерения. В соответствии с программой управления происходит подключение заданной пары УЗП соответственно к каналам возбуждения и приема эхо-сигнала и установление необходимых кодов, определяющих основные параметры режима измерения.

Результаты экспериментальных исследований. В результате проведенных измерений были получены протоколы серий измерений по каждой из 17 томографических пар УЗП для разных временных значений паузы между двумя последовательными измерениями. Каждая серия включала 100 измерений по двум порогам компарации. По данным измерений каждой серии вычисляли отклонение относительно среднего значения по каждому из порогов. По результатам обработки данной серии для каждого тестируемого канала было сформировано 6 расчетных таблиц (для 2 порогов и 3 значений паузы по каждому порогу). Далее по данным из полученных таблиц построили графическую зависимость отклонения относительно среднего значения в серии от номера измерения в серии.

Все необходимые расчеты, построение исходных таблиц и соответствующих графических зависимостей осуществляли с помощью программного пакета «Excel for Windows 95».

На рис. 4 приведены характерные поканальные (для каналов 1, 3 и 7) суммарные (наложенные один на другой) графики профиля временной погрешности относительно ее среднего значения в серии для выбранных дискретных значений паузы соответственно для двух порогов 1 и 2. Порог 1 (нижний) соответствует уровню компарации 0,5 В,

а 2 (верхний) — 1,0 В. Для серий (1'–3') на любом графике дискретные значения временной паузы выбраны соответственно 1; 10; 100 мс.

В таблицах представлены рассчитанные оценки основных статистических характеристик по каждому графику серии в зависимости от номера канала и порога компарации: стандартного отклонения — в табл. 1, а соответственные максимальные и минимальные значения абсолютного отклонения от среднего — в табл. 2.

Анализ приведенного графического материала позволяет отметить следующее:

1) разброс временных отклонений в серии носит случайный характер;

2) ширина «шумовой дорожки» в серии заметно превышает двойное значение необходимого номинального значения абсолютной погрешности согласно расчету 100 пс, что отвечает номинальному значению погрешности $\leq \pm 50$ пс при количестве циклов автоциркуляции $N = 30$. При этом максимальное значение локальных временных отклонений может достигать порядка 500...700 пс, что значительно превышает расчетное номинальное значение абсолютной погрешности измерения при $N = 30$ (см. табл. 2).

3) при увеличении временной паузы наблюдается тенденция некоторого уменьшения максимальных локальных временных отклонений, хотя в среднем эти отклонения превышают необходимое номинальное значение абсолютной погрешности измерения (см. табл. 2).

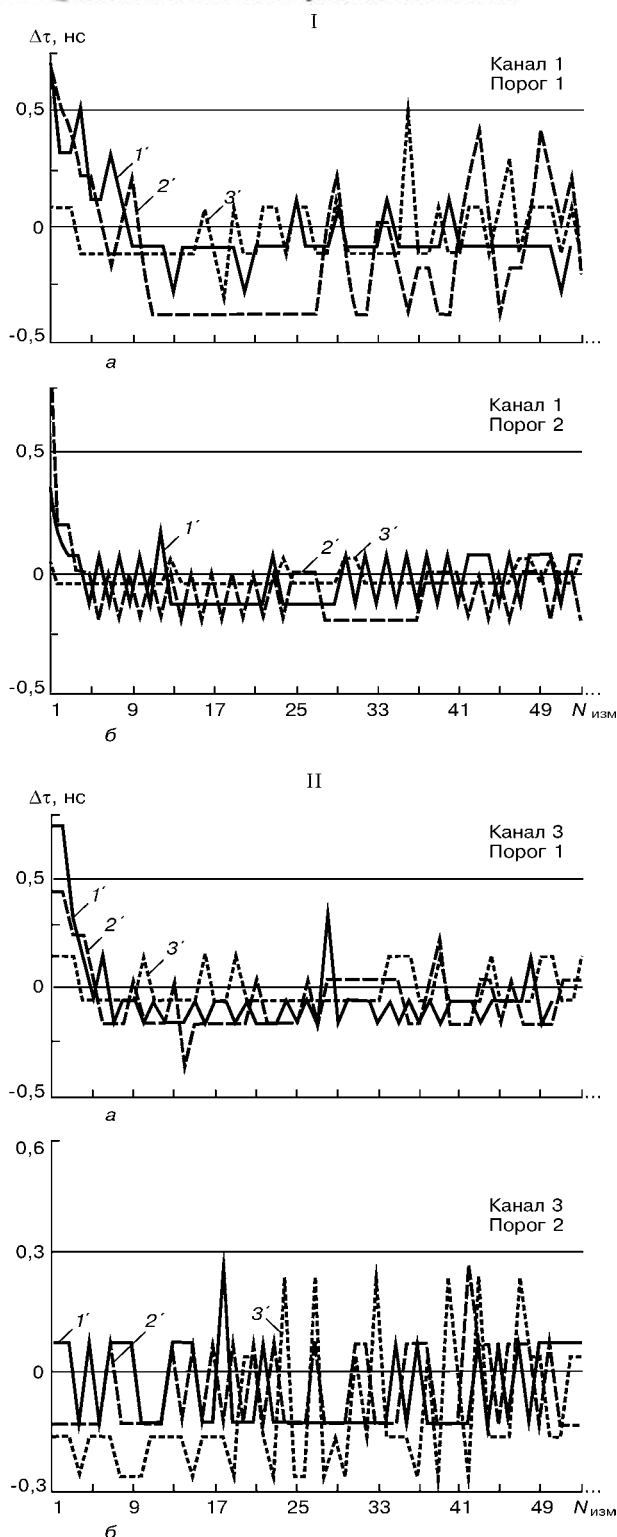
Как показали в дальнейшем проведенные уточняющие метрологические исследования полного тракта ИВИ, отмеченная выше нестабильность временных измерений обусловлена в первую очередь нестабильностью моментов формирования импульсов перезапуска генератора возбуждения канальных УЗП в полном цикле автоциркуляции. Последнее приводит к девиации продолжительности временного интервала, который отвечает одному циклу автоциркуляции, а тем самым — к нестабильности суммарного временного интервала, соответствующего полному циклу автоциркуляции (временная нестабильность заднего фронта измеренного временного окна). Накопленная нестабильность (дисперсия) заднего фронта измеренного вре-

Таблица 1. Статистическая оценка стандартных отклонений

Канал	Порог	Временная пауза, мс		
		1	10	100
1	1	0,166376	0,276113	0,142645
	2	0,115798	0,171635	0,054643
3	1	0,191356	0,149599	0,09121
	2	0,130155	0,131426	0,159785
7	1	0,171373	0,131794	0,06532
	2	0,077824	0,085847	0,156979
9	1	0,161746	0,158945	0,057525
	2	0,165889	0,149071	0,079137
13	1	0,079874	0,132969	0,09355
	2	0,124604	0,152007	0,142404
17	1	0,084537	0,152607	0,125831
	2	0,154082	0,16112	0,101921

Таблица 2. Статистическая оценка абсолютных (max/min) отклонений от среднего значения

Канал	Порог	Временная пауза, мс		
		1	10	100
1	1	0,714 / -0,286	0,718 / -0,382	0,484 / -0,316
	2	0,377 / -0,123	0,806 / -0,194	0,262 / -0,038
3	1	0,743 / -0,157	0,438 / -0,362	0,142 / -0,058
	2	0,573 / -0,127	0,47 / -0,13	0,238 / -0,262
7	1	0,55 / -0,15	0,6 / -0,2	0,18 / -0,02
	2	0,2 / -0,2	0,15 / -0,05	0,4 / -0,2
9	1	0,63 / -0,27	0,533 / 0,367	0,182 / -0,018
	2	0,566 / -0,234	0,34 / -0,26	0,44 / -0,06
13	1	0,58 / -0,02	0,54 / -0,16	0,46 / -0,04
	2	0,28 / -0,22	0,71 / -0,19	0,52 / -0,28
17	1	0,57 / -0,13	0,41 / -0,39	0,3 / -0,2
	2	0,35 / -0,25	0,25 / -0,25	0,35 / -0,05



менного окна во временном выражении заметно превышает шаг квантования ИВИ (период частоты ВЧ импульсной последовательности заполнения временного окна $T_{ВЧ} = 2,778$ нс).

Эта нестабильность обусловлена прежде всего двумя факторами. Первый — это влияние суммарного шума канала, накладывающегося на принятый каналный УЗ сигнал. Можно выделить две причины, обуславливающие каналный шум: собственный шум канала усиления и наложение на принятый каналный УЗ сигнал мешающего сигнала

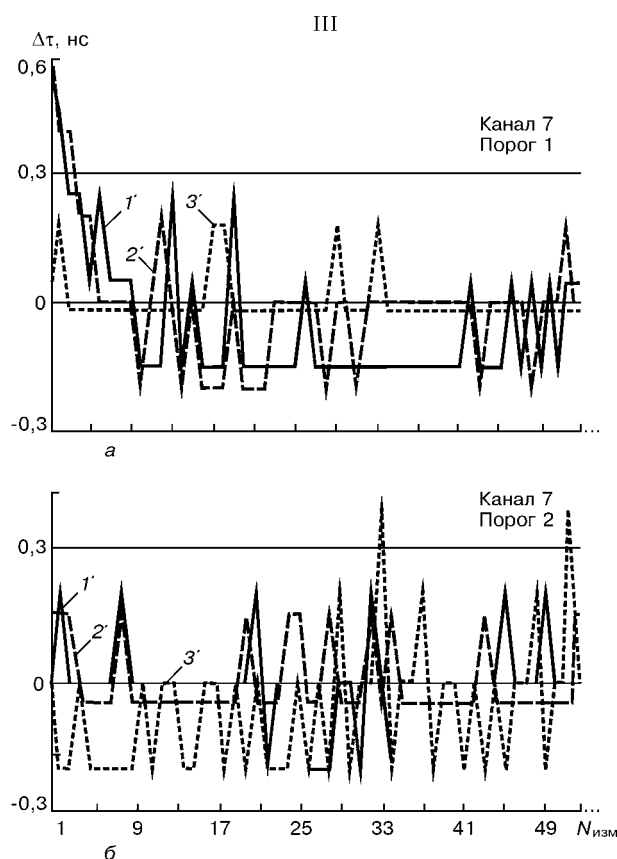


Рис. 4. Зависимости разброса погрешности измерения от часовой паузы между двумя последовательными измерениями для каналов 1 (I), 3 (II) и 7 (III) для порогов компарации 1 (a) и 2 (б): 1'–3' — серии измерений

«хвоста» от зондирующего сигнала за счет его проникновения во входные цепи канала усиления (эффект электрически наведенного сигнала).

Второй фактор — это прогрев излучаемых УЗП на начальных измерениях стационарной (равновесной) температуры. Он проявляется в том, что первые измерения в серии имеют заметно повышенную девиацию относительно среднего значения в серии. В особенности это проявляется при измерениях по порогу 1 (измерения всегда начинаются с нижнего порога) при относительно малых значениях временной паузы между текущими измерениями (см. рис. 4).

Ясно, что увеличение числа циклов автоциркуляции ИВИ не приводит к заметному уменьшению ширины «шумовой дорожки» разброса погрешности измерений при многократных измерениях (рис. 5). На приведенных графиках одно большое деление на временной шкале (по горизонтали) соответствует 1 нс. Можно заметить, что увеличение числа циклов приводит к заметному тренду за счет интенсивного нагрева УЗП.

Описание усовершенствованного алгоритма процедуры временных измерений. Для получения желательной точности временных измерений необходимо повысить временную стабильность канала ИВИ при многократных измерениях. Решение этой задачи возможно двумя путями: применением дополнительных схемно-конструктивных мероприятий (подбором активных элементов канала усиления

ния с меньшими собственными шумами, тщательным электромагнитным экранированием звеньев передачи сигнала с приемных УЗП на вход канала усиления, дополнительным термостатированием УЗ томографического блока и канала усиления и т. п.) или применением эффективной процедуры обработки многократных измерений в одной точке.

Первый путь, по своей эффективности являющийся локальной мерой, касается отдельных конструктивных и схемных элементов канала ИВИ, а главное, не радикален с точки зрения получения стойких результатов. На наш взгляд, более радикальной мерой является применение алгоритмического метода, базирующегося на процедуре статистической обработки многократных измерений, т. е. такого алгоритма обработки, который позволяет эффективно использовать статистические свойства самих измерений.

Напомним, что фактическое время распространения $\tau_{\text{распр}}$ УЗ волны определяется как временной интервал от момента ее возбуждения (момента подачи импульса возбуждения на излучаемый каналный УЗП) до момента появления первой положительной полуволны УЗ сигнала на приемном УЗП (рис. 6).

Для определения величины $\tau_{\text{распр}}$ используются данные автоциркуляционных измерений временных интервалов τ_1 и τ_2 по двум порогам (рис. 6, в). На основе значений τ_1 и τ_2 по соответствующему соотношению вычисляется фактическое значение величины $\tau_{\text{распр}}$, что отвечает моменту перехода сигнала через нуль [6, 10].

В то же время, как показала экспериментальная проверка, форма принятого УЗ сигнала не совсем точно описывается синусоидальной функцией переменной амплитуды. При этом было замечено, что первая положительная полуволна, по которой собственно проходит компарация, от нуля до уровня порядка 0,6 амплитудного значения имеет линейный характер нарастания (коэффициент нелинейности аппроксимации на уровне $0,6U_m$ порядка 1 %). Это позволяет для определения момента перехода сигнала через нулевой уровень применить метод линейной регрессии на основе статистики значений временных измерений по дискретной сетке порогов компарации.

Линейная регрессия предполагает линейную связь между двумя случайными величинами (y, x) [12]. При такой форме связи $\bar{y}(x)$ является линейной функцией от x , т. е.

$$\bar{y}(x) = a_0 + a_1 x, \quad (10)$$

где a_0, a_1 — коэффициенты регрессии; x — независимая случайная переменная.

Коэффициенты регрессии определяются по методу наименьших квадратов. Для этого за истинное значение переменной y принимается значение $\bar{y}(x)$, вычисляемое по соотношению (10), т. е. ищется такая прямая, сумма квадратов отклонений измеренных значений от которой была бы минимальна. Это требование формализуется в виде условия Лемандра

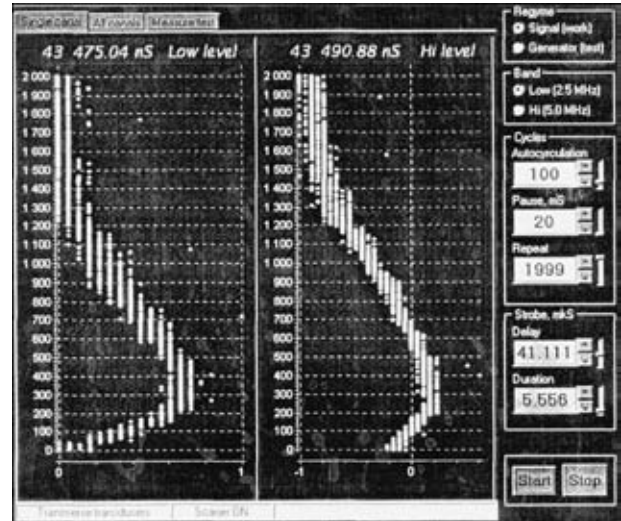


Рис. 5. Временной разброс измерений в стационарной точке поля контроля при многократных измерениях по каналу 1 (число циклов 100; длительность паузы 20 мс)

$$\sum_{i=1}^n [y_i - \bar{y}(x)]^2 = Q_{\min}. \quad (11)$$

Как известно, условию минимума функции отвечает условие равенства нулю его первой производной. Если теперь подставить в (11) соотношение (10), вычислить частные производные по a_0 и a_1 и приравнять их к нулю, то в результате получим систему нормальных уравнений относительно искомых коэффициентов регрессии a_0 и a_1 . Решив эту систему, получим следующие соотношения для расчета коэффициентов регрессии:

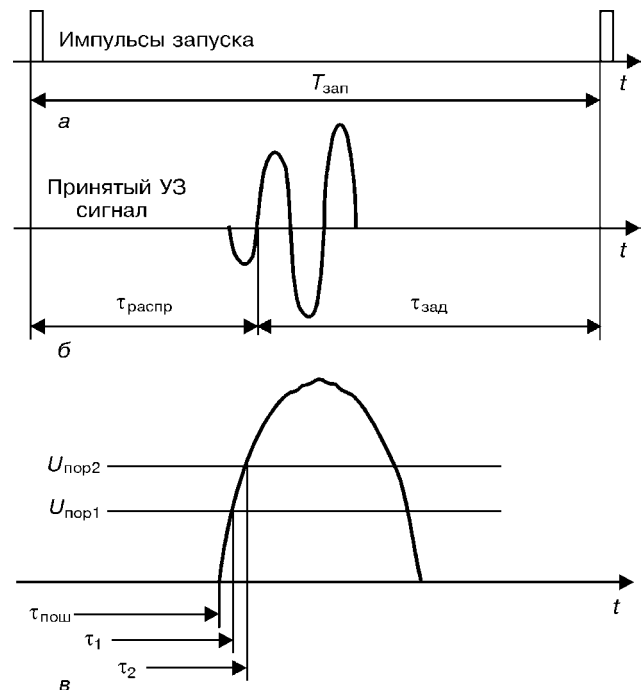


Рис. 6. Временные эпюры сигналов при проведении измерений по двум порогам: а — импульсного сигнала возбуждения; б — принятого УЗ сигнала на выходе канала усиления; в — процедуры компарации



$$a_0 = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum yx}{n \sum x^2 - \left(\sum x\right)^2}, \quad (12)$$

$$a_1 = \frac{n \sum yx - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - \left(\sum x\right)^2}.$$

Здесь для упрощения записи индексы при переменных опущены.

Рассмотрим коротко алгоритм процедуры многократных измерений на основе применения линейной регрессии. Он состоит из трех этапов: 1-й — оценки прямой линейной регрессии; 2-й — уточнения прямой линейной регрессии; 3-й — проведения рабочих измерений, определения временного интервала относительно нулевого уровня сигнала.

1-й этап

Шаг 1. Выбирают последовательно канал за каналом и по каждому из них проводят калибровку коэффициента усиления таким образом, чтобы амплитуда U_m^+ первой положительной полуволны УЗ сигнала была порядка 2,5 В.

Шаг 2. По эпюре сигнала, визуализирующейся в сигнальном окне панели управления на экране монитора, определяют значения нижнего и верхнего уровней компарации. Значение нижнего порога выбирают из условия превышения амплитуды шумов, попадающих в строб разрешения компарации (строб выбора зоны УЗ сигнала, в которой разрешены измерения; на данном этапе он широкий, его продолжительность устанавливается программно шириной 5,556 мкс). Значение верхнего порога устанавливается равным 1,02 В, что отвечает уровню, несколько меньшему $0,5U_m^+$.

Шаг 3. Разбивают выбранный интервал компарации равномерно на n дискретных уровней (рабочее значение $n = 10$). Полученные значения дискретных уровней компарации присваиваются всем каналам.

Шаг 4. Выбирают текущий номер канала и проводят последовательно одиночные измерения временных интервалов по установленному дискретному ряду пороговых уровней. Получают оценочную серию временных измерений.

Шаг 5. По полученной серии определяют коэффициенты регрессии a_0 , a_1 и прямую регрессии вида $\tau_n = a_0 + a_1 U_{ni}$.

2-й этап

Шаг 1. Получают для измеренных в серии данных оценку стандартного отклонения s_0 относительно прямой регрессии.

Шаг 2. Определяют по каждому порогу абсолютное значение отклонения Δ_n полученных временных измерений от прямой регрессии. Измерения, для которых выполняется условие $\Delta_n > 2s_0$, отбрасывают.

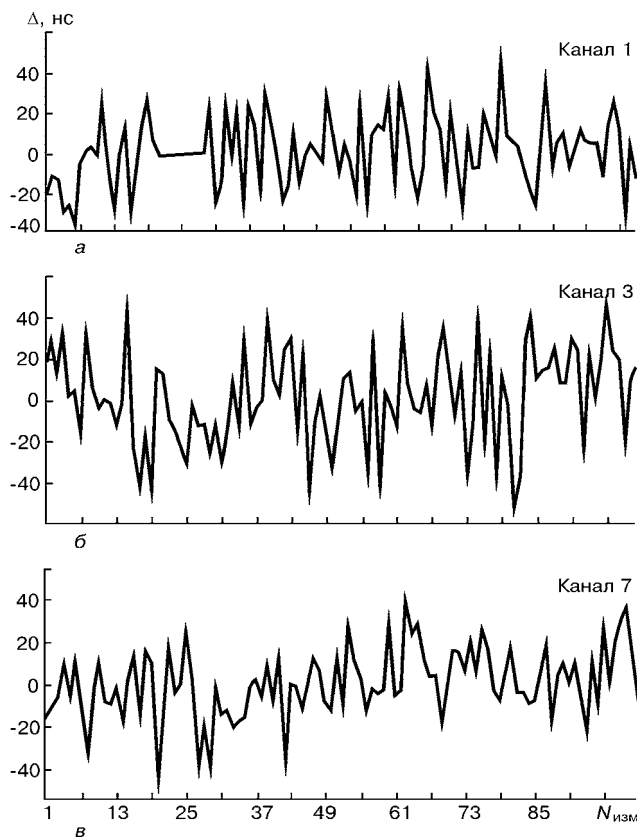


Рис. 7. График отклонения от среднего значения погрешности измерения времени распространения в соответствии с алгоритмом линейной регрессии для каналов 1 (а), 3 (б) и 7 (в)

Шаг 3. По полученной новой серии повторно определяют коэффициенты регрессии a_0 , a_1 и уточняют прямую регрессии.

Шаг 4. Вычисляют оценку времени распространения τ_n , которая отвечает моменту пересечения уточненной прямой регрессии с нулевым уровнем (см. рис. 6, б). Здесь n — текущий номер канала.

3-й этап

Шаг 1. По полученной оценке $\hat{\tau}_n$ вычисляют параметры положения строба выбора зоны УЗ сигнала: $\tau_{зад\ n} = \tau_n - 90$ нс; $\tau_{стр\ n} = \tau_n + 90$ нс.

Шаг 2. Повторяют серию измерений по дискретному ряду порогов. Отличие от предыдущего алгоритма измерений состоит в следующем: при проведении измерения на текущем значении порога проводится проверка условия $\Delta_n > 2s_0$. При этом в случае выполнения этого условия измерения на данном пороге снова повторяются. При двукратном выполнении данного условия значения измерения отбрасываются и проводится измерение по следующему порогу.

Шаг 3. Выполняют шаги 3 и 4 предыдущего этапа. Их результат — фактическое значение времени распространения УЗ волны — записывается в файл данных.

Далее алгоритм повторяется на последующем канале УЗ томографического блока прозвучивания.

Данный алгоритм реализуется соответствующей программой, которая входит в пакет рабочей программы сбора данных «UST coll.exe».

На рис. 7 приведены графики разброса погрешности измерения времени распространения согласно алгоритму линейной регрессии для тех же характерных каналов 1, 3, 7, которые представлены на рис. 4. Отметим, что данный алгоритм процедуры измерений при многократных измерениях в заданной точке поля контроля контрольного образца обеспечивает временную стабильность не хуже 50 пс.

1. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. — Новосибирск: Наука, 1996.
2. Зуев Л. Б., Семухов Б. С., Бушмелева К. И. Зависимость скорости ультразвука от действующего напряжения при пластическом течении поликристаллов // Журн. техн. физики. — 1999. — 69, № 12. — С. 100–101.
3. Зуев Л. Б., Семухов Б. С., Бушмелева К. И. Изменение скорости ультразвука при пластической деформации Al // Там же. — 2000. — 70, № 1. — С. 52–56.
4. Томография листовых изделий / В. В. Кошевой, Д. Э. Кривин, Э. В. Кривин, И. М. Романишин // Дефектоскопия. — 1998. — № 9. — С. 20–28.
5. Ультразвукова комп'ютеризована томографічна система для визначення фізико-механічних характеристик матеріалу в об'ємі виробу UST-2000 // З. Т. Назарчук, В. В. Кошовий, Є. В. Кривин, О. Е. Левицький та ін. // 36. наук. праць «Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів». — Київ-Львів, 2001. — С. 12–17.
6. Разработка ультразвуковых томографических методов и средств определения объемного распределения физико-механических характеристик материалов: (Заключит. отчет)

/ Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины. — № ГР 0197V003372. — Львов, 1998. — 148 с.

7. Z. T. Nazarchuk, V. V. Koshoviy, E. V. Krivin, I. M. Romaniushyn. Ultrasonic tomography technologies for NDT and monitoring of material degradation // Proc. of the Joint EC-IAEA Specialists Meeting, Petten, Netherlands, March 10–12, 1999 / Ed. U. von Estorff, L. M. Davies, P. Trampus. — Luxemburg, 1999. — P. 79–89.
8. Назарчук З. Т., Кошовий В. В., Кривин Є. В., Романишин І. М. Визначення просторового розподілу фізико-механічних характеристик матеріалу методами ультразвукової обчислювальної томографії // Мет. та прилади контр. якості. — 2000. — Вип. 5. — С. 7–10.
9. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г. Физические основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах // Прикл. механика. — 2000. — 36, № 39. — С. 3–34.
10. Кошевой В. В., Кривин Э. В., Левицкий О. Е. Измеритель временных интервалов с повышенной точностью для задач измерения скорости УЗ волн в конструкционных материалах // Сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. «Современные приборы, материалы и технологии для технической диагностики и неразрушающего контроля промышленного оборудования», Харьков, 16–19 марта 1998 г. — Харьков, 1998. — С. 309–317.
11. Кошевой В. В., Кривин Э. В., Левицкий О. Е. К вопросу анализа точности измерения временных интервалов методом автоциркуляции // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1998. — № 4. — С. 49–56.
12. Математическая статистика / Под ред. А. М. Длинна. — М.: Высш. шк., 1975. — 398 с.

Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины,
Львов

Поступила в редакцию
22.05.2002

НОВАЯ КНИГА

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

Рассмотрены элементы теории и практические вопросы магнитопорошкового контроля, происхождение различного рода ошибок. Освещены вопросы технологии контроля, выбора эталонов, подбора режимов намагничивания, организации работ.

Приведены примеры контроля различных металлоконструкций, трубопроводов и резервуаров, теплообменных установок и деталей машин.

Теоретический раздел книги относится ко всем магнитным методам. Здесь показаны пути уменьшения влияния размагничивающего фактора, эффективного намагничивания деталей сложной геометрии. Рассмотрены процессы перемангничивания детали как разветвленной магнитной цепи.

Рассчитана на инженерно-технических работников, дефектоскопистов и может быть полезна студентам вузов.



По вопросу приобретения книги обращайтесь по адресу:
03680, Украина, г. Киев-150, ул. Боженко, 11,
Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАНУ.
Тел. (044) 227-26-66.



ОЦЕНКА СТЕПЕНИ КОРРОЗИОННОЙ АГРЕССИВНОСТИ ГРУНТОВ НА УЧАСТКАХ ПРОХОЖДЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ПО КОМПЛЕКСНОМУ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОМУ КРИТЕРИЮ

О. В. МЕДВЕДЫК, Б. В. СЛОБОДЯН, Л. В. СЫСА, Г. А. ЯВОРСКИЙ

Предложен новый способ (критерий) оценки коррозионной агрессивности грунтов по комплексу физико-механических параметров. Проведен анализ результатов экспериментального определения активной кислотности, естественного окислительно-восстановительного потенциала и удельного электрического сопротивления грунтов вдоль целого ряда участков действующих трубопроводов. Обоснованы оптимальные границы числовых значений предложенного прежде авторами комплексного физико-химического критерия коррозионной агрессивности грунтов, в соответствии с которым определена их степень агрессивности.

A new method (criterion) is proposed for assessment of corrosion aggressiveness of soils by a complex of physico-mechanical parameters. Analysis has been performed of the results of experimental determination of active acidity, natural oxidation-restoration potential and specific electric resistance of soils along sections of a number of operating pipelines. Optimal limits of numerical values of the earlier proposed by the authors integrated physico-chemical criterion of corrosion aggressiveness of soils are substantiated, by which the degree of soil aggressiveness is determined.

Совокупность физических, физико-химических и биологических свойств грунтов является одним из важнейших факторов в процессах, приводящих к коррозированию подземных стальных сооружений, в том числе трубопроводов. Если физические (удельное электрическое сопротивление ρ и др.) и биологические (например, содержание специфических бактерий) параметры грунта в плане коррозионной агрессивности регламентированы нормативной документацией [1, 2], то физико-химическим параметрам (активной кислотности pH и естественному окислительно-восстановительному потенциалу Eh) отведено значительно меньше внимания. В то же время на практике известно немало фактов, когда в полностью «благополучном» с точки зрения физических свойств грунте — с довольно высоким значением ρ — сталь трубы испытывает значительные коррозионные повреждения при наименьшем нарушении изоляции или наоборот — в грунте со сравнительно малым удельным сопротивлением сталь остается продолжительное время неповрежденной даже при значительных дефектах защитного покрытия. Очевидно, для корректной оценки коррозионной агрессивности грунтов учет лишь одного параметра грунта (ρ) недостаточен.

Относительно влияния кислотности на процесс коррозии металла трубы в методической и учебной литературе встречаются короткие замечания, однако они имеют преимущественно описательный характер и не подкреплены детальными расчетами. В этом плане полученные авторами данной статьи практические результаты не только подтверждают теоретические положения, но и существенно расширяют возможность их количественной, статистической интерпретации. Определение параметров pH и Eh околоповерхностных отложений широко используется в геохимии [3], агрономии и других областях. Поскольку эти два параметра взаимосвязаны, то для их представления часто используется так называемый редокс-водородный потенциал, рассчитанный через парциальное давление водорода в окислительно-восстановительных процессах [4, 5]:

© О. В. Медведык, Б. В. Слободян, Л. В. Сыса, Г. А. Яворский, 2002

$$rH_2 = Eh/30 + 2pH, \quad (1)$$

где Eh подается в милливольтках;

$$rH = \frac{Eh + 0,06pH}{k}, \quad (2)$$

где k — поправочный коэффициент, связанный с температурой; Eh измеряется в вольтах.

Эти формулы практически идентичны при сохранении соответствующей размерности Eh (В или мВ), поэтому если в любую из них ввести дополнительный параметр — удельное электрическое сопротивление грунта, то можно получить комплексный физико-химический критерий для оценки коррозионной агрессивности грунтов. Поскольку последняя обратно пропорциональна удельному электрическому сопротивлению, то, очевидно, его числовое значение должно находиться в знаменателе формулы-результата.

Цель данной работы — обобщение фактического материала по изучению физико-химических свойств грунтов вдоль трасс действующих трубопроводов, собранного сотрудниками ГП «Укроргтехдиагностика» как за предшествующие, так и в последние годы, и расчет реальных числовых значений комплексного физико-химического критерия оценки коррозионной агрессивности грунтов $K_{фх}$.

Этот критерий, предложенный авторами ранее [6], учитывает естественный окислительно-восстановительный потенциал грунта, его активную кислотность и удельное электрическое сопротивление. Он дает возможность детальнее описать естественные (грунтовые) условия, в которых эксплуатируется стальной трубопровод, и рассчитывается по формуле

$$K_{фх} = \frac{Eh + 0,06pH}{k\rho}. \quad (3)$$

Кроме этих основных физико-химических параметров грунтов, для оценки степени их коррозионной агрессивности в качестве дополнительных параметров можно использовать удельную электрическую проводимость водных вытяжек X и от-



ношение концентраций восстановленной и окисленной форм железа $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$. Однако для определения двух последних параметров необходимы лабораторные условия и соответствующая аппаратура, поэтому для экспресс-оценки коррозионной агрессивности грунта достаточно пользоваться тремя первыми показателями, которые можно определять в полевых условиях.

Приведенная в [6] формула для расчета $K_{\text{фх}}$ получена в основном из теоретических соображений [4–6], поскольку фактическая база данных по результатам упомянутых выше анализов на данный момент довольно разнородна и неупорядочена. Каждое практическое исследование в этом направлении наполняет массив реальных числовых значений критерия $K_{\text{фх}}$, что при сопоставлении с фактами наличия или отсутствия коррозионных процессов в конкретных местах отбора проб позволит установить четкие требования, на основании которых грунт можно считать мало-, средне- или сильноагрессивным по физико-химическим параметрам.

Методика выполнения работы. Конкретными объектами изучения являлись пробы грунтов, взятые на участках газопроводов «Прогресс», «Уренгой – Ужгород», «Елец – Кременчуг – Кривой Рог», «Торжок – Долина» (участок г. Долина – р. Днестр), а также отдельные пробы на других участках. Шурфование проводили в точках возможных повреждений изоляции, которые были определены по методике ГП «Укроргтехдиагностика». Отбирали также пробы грунтов из поверхностных горизонтов трассы, а также на воздушных и водных переходах. В целом обработаны результаты анализов более 60 проб грунта и грунтовых вод.

Образцы грунта отбирали согласно требованиям ГОСТ 26423–85 [7] непосредственно после шурфования или из естественных углублений (водная эрозия, сдвиг грунта и т. п.) из центральной части любого грунтового интервала (горизонта, типа грунта) на уровне трубы, над и под нею, до дна шурфа. Для проб, взятых непосредственно возле стенок трубы, отбирали дополнительные пробы из той же глубины и горизонта, но боковой стенки шурфа (материнские породы).

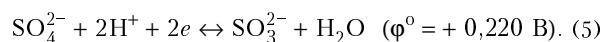
Водная вытяжка была подготовлена согласно требованиям ГОСТ 26423–85 [7]. Подготовку приборов (рН-метра, мультиметра) к проведению анализов осуществляли в соответствии с их техническим паспортом и инструкцией по эксплуатации.

Определение кислотности водных вытяжек из грунтов проводили с помощью портативного мультиметра модели рН-5123 с комбинированным электродом SA9P209W. Измерение окислительно-восстановительного потенциала вытяжки выполняли тем же мультиметром с индикаторным (платиновым) электродом модели ЭТПЛ-01М, при этом электродом сравнения служил насыщенный хлор-серебряный электрод ЭВЛ-1М. Удельное электрическое сопротивление грунта на данном участке определяли электрофизическими методами по соответствующим нормативным документам [1].

За результаты анализа принимали значение каждого единичного измерения кислотности и окислительно-восстановительного потенциала водной

вытяжки из грунта, а также удельного электрического сопротивления грунта на конкретном участке. После проведения контрольных измерений в лаборатории геохимии и экологии Львовского отделения Украинского государственного геолого-разведывательного института эти результаты сравнивали с полевыми для определения абсолютного и относительного отклонений — во всех случаях они соответствовали диапазонам, определенным нормативной документацией.

Результаты и их обсуждение. По значениям удельного электрического сопротивления грунты на исследованных участках имеют низкую (более 50 Ом·м) и среднюю (от 20 до 50 Ом·м) степень коррозионной агрессивности (согласно ГОСТ 9.602–89 [1]), а по значениям кислотности (согласно классификации А. Н. Павлова и В. Н. Шемякина [8]) они слабокислые ($4,1 < \text{pH} < 7$), слабощелочные ($7 < \text{pH} < 8,3$) и щелочные ($8,3 < \text{pH} < 10,3$). Значения Eh-потенциала в нормативной документации не лимитированы, однако за основу классификации можно взять стандартные потенциалы наиболее распространенных естественных процессов в грунтах — равновесного окисления-восстановления воды и сульфат-ионов:



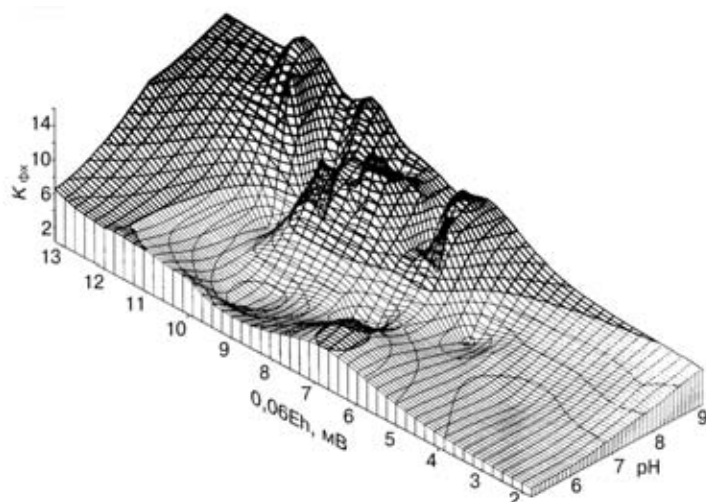
Грунты, окислительно-восстановительный потенциал которых выше 0,41 В, авторы предлагают считать сильноокислительными, от 0,41 до 0,22 В — среднеокислительными, ниже 0,22 В — слабоокислительными. В таком случае среду практически всех исследованных проб можно отнести к слабоокислительной.

Полученные значения рН, Eh и ρ можно непосредственно вводить в формулу (3) для расчета обобщенного физико-химического критерия $K_{\text{фх}}$, однако после несложных математических преобразований эта формула значительно упрощается.

В частности, в реальных температурных условиях исследований (полевой сезон весна — осень) для расчетов используется числовое значение $k = 0,03$ [5]. Поскольку физико-химический критерий является относительным (обобщенным) показателем коррозионной агрессивности, то значения Eh (в мВ) можно умножить на 0,06 для удобства сопоставления со значениями рН. Тогда числовые коэффициенты перед переменными величинами можно свести к одному, что значительно упрощает формулу (3):

$$K_{\text{фх}} = \frac{0,06\text{Eh} + 0,06\text{pH}}{0,03\rho} = 2 \frac{\text{Eh} + \text{pH}}{\rho}. \quad (6)$$

Расчеты значений $K_{\text{фх}}$ проводили по формулам (3) и (6). В первом случае значения получены в диапазоне 0,03... 1,14 условных единиц (значения Eh-потенциала заданы в В, сопротивления — в Ом·м); во втором — 0,35... 18,83 (значения Eh-потенциала — в мВ, сопротивления — в Ом·м).



Распределение числовых значений комплексного физико-химического критерия коррозионной агрессивности $K_{фх}$ грунтов в зависимости от их pH и Eh

В формуле (3) числитель почти всегда значительно меньше знаменателя (при сохранении соответствующей размерности единиц), поэтому формула такого вида для $K_{фх}$ практически дублирует зависимость этого критерия от удельного электрического сопротивления, нивелируя влияние кислотности и окислительно-восстановительного потенциала. Именно поэтому авторы предлагают использовать для расчетов формулу (6), которая более наглядно учитывает влияние pH и Eh грунта на значение этого критерия и разрешает получать более удобные для пользования числовые значения. Кроме того, довольно высокие значения $K_{фх}$ получены для проб грунтов с $\rho < 50$ Ом·м (средняя степень агрессивности по ГОСТ 9.602–89 [1]). Это служит подтверждением того, что удельное электрическое сопротивление грунта не следует считать достаточным показателем для определения его коррозионной агрессивности (ГОСТ 9.602–89).

По полученным результатам построена диаграмма зависимости значений $K_{фх}$ от кислотности pH и окислительно-восстановительного потенциала Eh (рисунок). Построение выполнено с помощью программы SURFER (версия 6.0), которая часто используется для расчета и построения разнообразных карт (геологических, геохимических, топографических и т. п.), а также поверхностей распределения определенных показателей в геологии и сопредельных областях.

Как видно из рисунка, общая тенденция роста значений $K_{фх}$, т. е. коррозионной агрессивности грунта, совпадает с направлением увеличения параметров pH и Eh, что соответствует теоретическим выкладкам работ [4, 6]. Минимальные значения критерия получены при нейтральной реакции грунта и низких значениях окислительно-восстановительного потенциала. При $-7 > \text{pH} > 7$ значения $K_{фх}$ возрастают, причем это возрастание сильнее проявляется для щелочной среды. Вероятно, это объясняется химической стойкостью гидроксокомплексов железа ($[\text{Fe}(\text{OH})_6]^{3-}$ и других) именно в таких условиях.

Особенно заметно возрастание значений $K_{фх}$ при больших значениях Eh — даже при нейтраль-

ной относительно pH среде критерий агрессивности имеет большое числовое значение. Это можно объяснить тем, что процесс равновесного окисления-восстановления воды (уравнение (3)) характеризуется довольно большим значением окислительно-восстановительного потенциала, увеличивающимся в ходе реакции комплексообразования с участием ионов железа и гидроксила. Последняя сдвигает химическое равновесие этого процесса вправо за счет изъятия гидроксид-ионов из сферы реакции



Учитывая наличие продуктов коррозии на поверхности металла в местах отбора каждой конкретной пробы, можно заметить, что они имеют значительный размер в тех случаях, если $K_{фх}$ превышает 12 единиц, а при значениях, меньших 5 единиц, их практически нет. Кроме того, при сопоставлении этих фактов с числовыми значениями удельного электрического сопротивления грунтов в местах отбора проб получаем определенное совпадение с границами допустимых значений ρ , лимитированными в нормативной документации [1]. Конечно, такие числовые значения $K_{фх}$ еще не являются окончательными для определения границ низкой, средней и высокой агрессивности грунта, поскольку они выведены при относительно небольшом количестве измерений. При накоплении значительной базы аналогичных исследований эти границы можно установить более точно. Относительно целесообразности того, что в формулу (6) перед числовым значением Eh (в мВ) введен множитель 0,06, можно привести еще несколько соображений. Между числовыми значениями $K_{фх}$, полученными по формулам (3) и (6), наблюдается, как и ожида-

Результаты расчетов значений комплексного физико-химического критерия коррозионной агрессивности грунтов $K_{фх}$ на Долинском участке МГ «Торжок – Долина»

Глубина, м	Тип грунта	pH	Eh, мВ	ρ , Ом·м	Значения $K_{фх}$, рассчитанные по формуле	
					(3)	(6)
0,50	Торф	7,42	+84	70	0,25	2,6
0,60	Глина	5,12	+182	75	0,22	5,0
1,20	»	5,10	+167	75	0,21	4,6
1,80	»	5,20	+196	75	0,23	5,4
2,40	»	5,30	+213	75	0,24	5,8
1,20	»	5,82	+108	44	0,35	5,2
2,00	»	5,88	+116	40	0,39	6,1
2,00	Суглинок	6,86	+66	142	0,11	1,0
2,00	Глина	6,15	+37	65	0,21	1,3
0,50	»	5,23	+198	83	0,21	4,9
1,00	»	6,00	+52	68	0,20	1,7
1,50	»	5,82	+87	66	0,22	2,8
0,00	Вода поверхностная	7,00	+116	83	0,22	3,0
3,00	Суглинок	6,80	+133	102	0,18	2,7



лось, довольно четкая корреляция (при $pH = 72$, $Eh = 12$ мВ, $\rho = 72$ Ом·м коэффициент корреляции равен 94 %), хотя в отдельных пробах, особенно при малых значениях удельного сопротивления, они сильно отличаются. Формула (6), в отличие от (3), дает возможность более активно привлекать к оценке степени коррозионной агрессивности грунта значение его естественного окислительно-восстановительного потенциала, однако pH при этом, как и в формуле (3), мало влияет на величину $K_{фх}$. Как видно из таблицы, критерий $K_{фх}$, рассчитанный по формуле (3), лучше коррелирует с параметрами кислотности и удельного сопротивления, но почти не зависит от окислительно-восстановительного потенциала, в то время как в формуле (6) более равномерно учитываются все три параметра.

Данные, использованные в таблице, получены по результатам одной из недавних работ ГП «Укроргтехдиагностика» по обследованию состояния антикоррозионного покрытия газопровода «Торжок — Долина» (участок г. Долина — р. Днестр), во время которой проводилось определение уровня pH и Eh грунтов в местах возможного повреждения изоляции и на фоновых участках. В процессе обследования упомянутой части трасы отобраны 13 проб грунта и 1 пробу поверхностной воды (лужа вокруг запорной арматуры крана-распределителя).

Числовые значения физико-химического критерия, рассчитанного по формуле (6), находятся в диапазоне 1,0...6,1, причем его максимальное значение получено для пробы грунта с удельным сопротивлением 40 Ом·м (средняя степень агрессивности по ГОСТ 9.602–89). Исходя из значений $K_{фх}$, рассчитанных по формуле (6), большинство грунтов имеют низкую степень коррозионной агрессивности.

ВЫВОДЫ

1. Предложенный авторами комплексный физико-химический критерий коррозионной агрессивности грунта $K_{фх}$ позволяет более полно охарактеризовать естественные (грунтовые) условия, в которых эксплуатируются стальные трубопроводы.

2. Порогом средней коррозионной агрессивности грунта по критерию $K_{фх}$ можно считать его значение, равное 5, а высокой — 12 единицам.

3. По значениям комплексного физико-химического критерия $K_{фх}$ основная часть грунтов на исследованных участках газопроводов может быть отнесена к низко- (менее 5) и среднеагрессивным (от 5 до 12 единиц), а около 10 % из них — к высокоагрессивным (более 12 единиц).

1. ГОСТ 9.602–89. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии.
2. ДСТУ 3291–95. Методы оценки биокоррозионной активности грунтов и выявления наличия микробной коррозии на поверхности подземных металлических сооружений.
3. Бужук Л. О., Полицев А. В. Относительно информативности параметра окислительно-восстановительного потенциала грунтов при поисках нефти и газа // Нефть и газ Украины. — 2001. — № 1. — С. 17–21.
4. Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов. — М: Наука, 1976. — 472 с.
5. Геологический словарь / Под ред. К. Н. Парфенгольца, Л. И. Боровикова и др. — М: Недра, 1978.
6. Медведык О. В., Сиса Л. В., Слободян Б. В. Физико-химический критерий оценки коррозионной агрессивности грунтов на примере отдельных участков магистральных газопроводов // Мет. та прилади контролю якості. — 2001. — № 7. — С. 24–29.
7. ГОСТ 26423–85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки.
8. Лукашев В. К. Геохимия четвертичного литогенеза. — Минск: Выш. шк., 1970.

СП «Укроргтехдиагностика»,
Львов

Поступила в редакцию
09.01.2002

Научно-производственная фирма Специальные Научные Разработки

СНР

Направления деятельности — разработка, изготовление приборов и установок НК механических свойств, структуры, напряженно-деформированного (усталостного) состояния, ресурса металлопродукции и оборудования по магнитным характеристикам металла: коэрцитиметры, аустенометры, многопараметрические анализаторы петли магнитного гистерезиса. Магнитометры универсальные и специализированные (для МПД), включая дефектоскопические. Приборы и установки УЗ-толщинометрии и дефектоскопии, работающие ЭМА-методом бесконтактно, по горячему металлу, без зачистки и без контактной жидкости (через слой защитного покрытия или воздушный зазор).

Методики применения всех этих средств НК.

Область применения — производство прокатной металлопродукции и оборудования машиностроения, текущее состояние оборудования, сосудов давления и др. металлоконструкций в эксплуатации, их диагностика, включая экспертизу технадзора.

Многоканальные системы технологической сигнализации, сбора, обработки и хранения информации для таких объектов, как энергетические котлы, турбины, генераторы, грузоподъемные машины общего и специального назначения.

г. Харьков, тел./факс (0572) 64-36-13, тел. 64-99-85, 26-32-06
E-mail: bezlyudko@yahoo.com



ТЕЛЕВИЗИОННАЯ ПИРОМЕТРИЯ

В. А. ПОРЕВ

Рассмотрены некоторые аспекты нового направления пирометрии излучения — телевизионной пирометрии. Проанализированы особенности определения эффективной длины волны, связанные с неоднородностью чувствительности ПЗС-матрицы и нелинейностью светосигнальной характеристики. Обоснована возможность повышения разрешающей способности телевизионного пирометра без изменения его оптической схемы. На примере задачи контроля температурного поля зоны плавки показаны пути уменьшения методических погрешностей, обусловленных влиянием излучения сторонних источников и изменением коэффициента пропускания.

The paper deals with some aspects of the new direction of radiation pyrometry, namely TV pyrometry. Features of determination of an effective wave length are analysed, which are related to non-uniformity of the sensitivity of CCD-matrix and non-linearity of the light signal characteristics. A possibility of improving the resolution of TV pyrometer without changing its optical schematic is substantiated. The problem of control of the temperature field of the melting zone is used to demonstrate the ways to reduce procedural errors, due to the influence of radiation of external sources and change of transmissivity.

Расширение номенклатуры и рост удельного веса высоких технологий с одновременным повышением требований к методологии их контроля стимулировали качественное развитие пирометрии излучения и привели к возникновению и становлению телевизионной пирометрии, возможности которой трудно переоценить.

В настоящее время накоплен достаточный опыт создания и эксплуатации телевизионных пирометров (ТП), на основании которого можно сделать вывод о том, что они образовали особый класс технических средств НК. Состав конкретного прибора обуславливается спецификой задачи и типом светоэлектрического преобразователя (СЭП), но с учетом накопленного на сегодня материала можно считать, что основными модулями ТП являются оптическая система, передающая телевизионная камера, в которую входят СЭП и формирователь сигнала, а также компьютер [1]. В некоторых ТП в перечне обязательных модулей имеется устройство ввода видеосигнала в компьютер, однако видеоадаптеры современных компьютеров позволяют в большинстве случаев отказаться от отдельных устройств ввода.

Физически работа ТП базируется на последовательности преобразований потока излучения, попадающего во входную апертуру. Основной количественной характеристикой оптического поля, образующего поток излучения в спектральном диапазоне $\lambda \dots \lambda + d\lambda$ с элементарного участка поверхности в телесный угол, опирающийся на входную апертуру прибора, является спектральная яркость $L_\lambda(x, y)$. Анализ этой функции в ТП проводится путем выборки (формированием отсчетов в заданных точках) при помощи электронной развертки и заключается в преобразовании пространственной функции в совокупность электрических сигналов. Конечным звеном всей последовательности преобразований является цифровой сигнал, пропорциональный значению входного сигнала.

Таким образом, ТП можно рассматривать как прибор, предназначенный для измерения температуры объекта путем формирования и электронной развертки его изображения с последующим уста-

новлением соответствия между яркостью элемента разложения в предметной плоскости и амплитудой сигнала, образованного сопряженным элементом разложения в плоскости изображения.

Размеры элемента разложения (пиксела) определяются типом СЭП и могут находиться в диапазоне от единиц до десятков микрометров. Фактически СЭП представляет собой упорядоченную матрицу, состоящую из большого количества микропреобразователей. Это обстоятельство вместе с малым (десятки миллисекунд) временем формирования сигнала всей матрицы является принципиальной особенностью ТП, открывающей широкие перспективы использования его в НК и научных исследованиях [2].

Телевизионная пирометрия имеет общую с традиционной пирометрией излучения теоретическую базу и в то же время, благодаря особенностям формирования сигнала, позволяет решать научные и технологические задачи на качественно новом уровне.

По сравнению с другими пирометрами ТП имеют наибольший показатель потенциальных возможностей, который можно определить следующим образом:

$$\epsilon = N / (\Delta \tau), \quad (1)$$

где N — формат выборки; Δ — линейный размер пиксела; τ — время формирования выборки.

Кроме того, на мишени одного и того же СЭП может быть сформировано несколько изображений объекта на разных участках спектральной характеристики, т. е. реализован мультиспектральный пирометр на едином преобразователе. Аналогично могут быть сформированы изображения объекта и эталонного источника, что очень важно в метрологическом аспекте.

При этом ТП предоставляют возможность не только оперативно контролировать температурное поле на поверхности объекта, но и определять геометрические параметры температурных фрагментов, осуществлять их селекцию.

Указанные особенности настолько принципиальны, что требуют пересмотра устоявшихся представлений о потенциальных возможностях пиро-



метрии излучения, начиная от расширения круга задач и заканчивая новыми требованиями к обеспечению адекватности технических средств, что фактически означает создание методологии нового направления пирометрии излучения — телевизионной пирометрии.

Концепция использования телевизионных систем для контроля оптических полей базируется на предположении о том, что СЭП представляет собой упорядоченную совокупность идентичных и независимых преобразователей, что в общем случае выполняется очень редко. Практически адекватность реальных характеристик и указанного выше предположения может быть обеспечена коррекцией светосигнальной характеристики и работой ТП в диапазоне линейности.

В телевизионной пирометрии коррекция светосигнальной характеристики осуществляется программно путем формирования матрицы весовых коэффициентов C_{ij} при одинаковой освещенности всех пиксел. При измерениях формируется выборка $C_{ij}A_{ij}$, где A_{ij} — текущее значение амплитуды сигнала пиксела с координатами (i, j) .

Линейный участок светосигнальной характеристики СЭП определяется совокупностью точек, для которых модуль разности среднего значения амплитуды сигнала и значения, взятого с аппроксимирующей прямой при одной и той же освещенности в заданное число раз меньше среднего квадратического отклонения результата измерения. Установлением диапазона линейности ТП уточняются также границы применимости теории линейных систем и критериев, базирующихся на использовании функции передачи модуляции (ФПМ).

Развитие и внедрение пространственно-частотных представлений в практику анализа телевизионных систем позволили определять их разрешающую способность через ФПМ и некоторый пороговый уровень контраста, что является более строгой оценкой по сравнению с той, когда разрешение в плоскости изображения определяется размером пиксела.

Для количественных оценок порогового уровня контраста K_{Π} возможно использование разных методик. Наиболее адекватной, по-видимому, следует считать изложенную в [3], где пороговый контраст определяется для заданного значения вероятности p регистрации сигнала с учетом входного контраста $K_{\text{вх}}$ и показателя степени светосигнальной характеристики $\gamma(E)$:

$$K_{\text{вх}}\gamma(E)K_{\Pi}q(E) = q_{\Pi}(p), \quad (2)$$

где $q(E)$, $q_{\Pi}(p)$ — отношение амплитуд сигнала и шума при освещенности E и пороговое отношение при заданной вероятности регистрации.

Разрешающая способность ТП определяется по ширине суммарной кривой ФПМ как величина, обратная пространственной частоте, на которой нормированный коэффициент передачи контраста отождествляется с пороговым контрастом. При условии, что $\gamma(E) = 1$, т. е. СЭП работает в диапазоне линейности,

$$K_{\Pi} = \frac{q_{\Pi}(p)}{K_{\text{вх}}q(E)}. \quad (3)$$

Используя зависимость амплитуды сигнала пиксела от соотношения площадей освещенного и неосвещенного участков, можно в некоторых задачах увеличить разрешающую способность ТП. Пусть в момент времени t амплитуда сигнала пиксела $A(t)$, а реализация шума $A_{\text{ш}}(t)$. Определив порог регистрации A_{Π} , установим, что сигнал $A(t)$ может быть зарегистрирован при условии $A_{\text{ш}}(t) < A(t) - A_{\Pi}$. С учетом среднего шумового сигнала пиксела $A_{\text{ш}}$ введем значения

$$a_1 = \frac{A(t)}{A_{\text{ш}}}, \quad a_2 = \frac{A_{\Pi}}{A_{\text{ш}}}, \quad a_3 = \frac{A_{\text{ш}}(t)}{A_{\text{ш}}}.$$

Тогда условие регистрации $a_3 < a_1 - a_2$.

Полагая, что шум СЭП подчиняется нормальному закону распределения, вероятность регистрации сигнала определим следующим образом:

$$p(a_3 < a_1 - a_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{a_1 - a_2} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz, \quad (4)$$

где z — переменная интегрирования.

Воспользовавшись табличными значениями нормированной функции Лапласа, получим, например, для $a_2 = 1$, что вероятность $P(a_3 < a_1 - a_2) = 0,99$ будет обеспечена при $A(t) = 3,2A_{\text{ш}}$. Если такой сигнал при освещенности E_0 образован частью пиксела, то количество участков, которые могут быть разрешены в пределах пиксела, определится соотношением

$$N = \frac{A_0}{3,2A_{\text{ш}}}, \quad (5)$$

где A_0 — амплитуда сигнала, образованного полностью освещенным пикселем при освещенности E_0 .

Используя указанную зависимость, можно без изменения структуры и оптической системы ТП увеличить его разрешающую способность, что имеет первостепенное значение в задачах контроля малых перемещений, где требуется высокая точность определения координат. Наиболее достоверные экспериментальные результаты в этом плане получены в работе [4], где утверждается, что метод интерполяции сигнала ПЗС-матрицы повышает точность определения координат до уровня, ограниченного дисперсией шума СЭП, а разрешение современных ПЗС может быть доведено до значений порядка 1...2 мкм.

Принципиальной особенностью пирометрии излучения является доминирование методической погрешности измерения над инструментальной. Основными источниками первой являются погрешности определения эффективной длины волны λ_z и коэффициента излучательной способности объекта, влияние излучения посторонних источников и изменение коэффициента пропускания среды. Первые два имеют общий для всех пирометрических



задач характер, и для уменьшения их влияния можно использовать универсальные методы [5].

Однако определение эффективной длины волны в телевизионной пирометрии имеет некоторые особенности, связанные с тем, что ее значение $\lambda_э$ может оказаться различным для разных участков СЭП или даже для отдельных пиксел. А это в свою очередь может привести к дополнительным погрешностям измерения температуры, особенно если изображение объекта занимает значительную часть мишени СЭП. Очевидно, что при определенных условиях вклад погрешности определения значения $\lambda_э$ в суммарную погрешность измерения температуры может оказаться весьма значительным.

Используя методику, приведенную в [5], несложно получить формулу, позволяющую вычислить $\lambda_э$ по измерению сигналов $A_{ij}(T_1)$ и $A_{pk}(T_2)$, образованных при разных температурах T_1 и T_2 разными пикселями с учетом различий их коэффициентов преобразования b_{ij} и b_{pk} :

$$d\lambda_э = \frac{C_2[T_2^{-1} - T_1^{-1}]}{\ln \frac{A_{ij}(T_1)}{A_{pk}(T_2)} - \ln \frac{b_{pk}}{b_{ij}}}. \quad (6)$$

При $b_{ij} = b_{pk}$ получим известное выражение

$$\lambda_э = \frac{C_2[T_2^{-1} - T_1^{-1}]}{\ln \frac{A_{ij}(T_1)}{A_{pk}(T_2)}}. \quad (7)$$

Что же касается вопросов уменьшения или компенсации погрешностей, обусловленных излучением стороннего источника или изменением коэффициента пропускания среды, то их корректное решение возможно только при учете всех особенностей конкретной задачи.

Влияние излучения сторонних источников на результаты исследования температурных полей и соответствующие аналитические методы его учета рассмотрены, например, в работе [6]. Сложность использования этих методов состоит в том, что они разработаны для простых конфигураций системы объект-сторонний источник и в предположении диффузного отражения. Поэтому ими пользуются в основном для приближенных оценок, а на практике предпочтение отдают аппаратным методам. В тех случаях, когда исключение или существенное уменьшение компонента стороннего излучения невозможно, более перспективными будут методы, основанные на введении этого компонента в структуру алгоритма вычисления результата. Укажем в качестве примера, иллюстрирующего преимущества телевизионной пирометрии, на метод компенсации влияния излучения электрода в задаче контроля параметров электронно-лучевой плавки, схема которой представлена в [7].

В этой схеме оптическая система формирует на мишени СЭП изображение части электрода и фрагмента зоны плавки. Яркость электрода $L_d(\lambda_э, T_d)$, а амплитуда сигнала, образованного соответствующим пикселем, — $A_d(T_d)$. Фрагмент зоны плавки характеризуется эффективной яркостью $L_э =$

$(\lambda_э, T_э)$, при этом образуется сигнал $A_э(T_э)$. Изменения яркости локального участка этой зоны могут быть обусловлены изменением как температуры этого участка, так и яркости электрода. Вводя в алгоритм формирования сигнала дополнительный компонент, изменяющийся в соответствии со случайными изменениями $L_d(\lambda_э, T_d)$, и образуя алгебраическую сумму амплитуды сигналов $A_э(T_э)$ и $A_d(T_d)$ с соответствующим весовым коэффициентом, компенсируем влияние излучения электрода на результат анализа температурного поля зоны плавки. Значение весового коэффициента определяется при градуировке ТП.

Проблема влияния коэффициента пропускания среды на результат измерения температуры в общем случае не может быть решена введением поправок [8]. Например, в рассмотренной выше задаче контроля параметров зоны плавки, которая проводится в вакуумной камере, степень загрязнения иллюминатора, т. е. коэффициент пропускания, зависит от типа кристалла, типа и концентрации примесей, их распределения по кристаллу, плотности электронного пучка, давления и конфигурации магнитного поля в камере и скорости перемещения зоны плавки. Для коррекции изменения коэффициента пропускания в этом случае можно также использовать излучение электрода. А чтобы исключить влияние локальных изменений яркости поверхности электрода, коррекцию необходимо проводить, используя среднее значение сигналов, образованных несколькими пикселями.

В тех случаях, когда технологический процесс проводится при температурах, меньших 400 °С, весьма перспективной для НК может оказаться пировидиконная телевизионная система, имеющая практически равномерную спектральную характеристику в диапазоне 0,4...12,0 мкм и не требующая охлаждения. Однако потенциальные возможности пировидиконных систем в значительной мере ограничиваются их низкой разрешающей способностью. Анализ этого вопроса и некоторые аспекты повышения разрешающей способности освещены в работах [9, 10], где указывается, что повысить разрешающую способность этих систем можно технологическими мерами — используя пироэлектрический материал с уменьшенным коэффициентом термодиффузии, изготавливая мишень в виде мозаики из отдельных элементов с одновременным заполнением межэлементного пространства теплоизолирующим материалом. Однако в результате этих и аналогичных технологических приемов в лучшем случае будут созданы только предпосылки для достижения более высоких значений разрешающей способности. А будут ли они реализованы — это определится условиями формирования сигнала, главным образом, скоростью перемещения изображения по мишени и временем формирования кадра. Дело в том, что чувствительность пировидикона различна в режимах панорамирования и обтюрации. В частности, наиболее перспективный на сегодня пировидикон РЕМЕТ имеет чувствительность в режиме панорамирования 100, в режиме обтюрации — 10 мкА/Вт [11]. Следовательно,



в ряде задач НК предпочтительным окажется режим панорамирования, при котором ФПМ определяется следующим выражением [10]:

$$H(f_x) = \frac{\sin \pi f_x v \tau_k}{\pi f_x v \tau_k} \left[1 + \left(\frac{2\pi f_x D_T}{v} \right)^2 \right]^{-1/2} \times \exp(-2\pi^2 f_x^2 (r_o^2 + r_p^2)), \quad (8)$$

где τ_k — время формирования кадра; f_x — пространственная частота; v — скорость перемещения изображения по мишени пировидикона; D_T — коэффициент температуропроводности материала мишени; r_o , r_p — радиусы пятен рассеяния объекта и электронного пучка на уровне интенсивности 0,606 от максимального значения.

Анализ формулы (8) позволяет сделать вывод о наличии такого значения скорости v_0 перемещения изображения по мишени, при котором выходной контраст для всех пространственных частот и разрешающая способность, определяемая указанным выше способом, будут иметь максимальные значения. В этом заключается принципиальное отличие пировидикона от других СЭП.

Физически зависимость коэффициента передачи контраста от v объясняется совместным действием механизма термодиффузии и инерционности пироэффекта. При $v > v_0$ сигнал уменьшается вследствие инерционности, а при $v < v_0$ главную роль играет термодиффузия.

Исследуя функцию $H(f_x)$, можно прийти к следующему выводу. Во-первых, она возрастает при уменьшении τ_k , но при этом уменьшается и образуемый пикселем заряд. Следовательно, этот метод увеличения $H(f_x)$ можно использовать только при больших амплитудах входных сигналов.

Во-вторых, $H(f_x)$ возрастает при уменьшении r_o и r_p . Однако эта возможность ограничена как достигнутым уже технологическим пределом уменьшения радиуса электронного считывающего пучка, так и нецелесообразностью уменьшения r_o ниже $0,25r_p$, поскольку при этом коэффициент передачи контраста пировидиконной системы в целом практически не изменяется.

Следовательно, одно из возможных направлений повышения разрешающей способности пировидиконных приборов состоит в создании условий, при которых изображение объекта будет перемещаться по мишени со скоростью $v \approx v_0$.

Другое направление состоит в том, что работа пировидиконного прибора организуется циклами длительностью τ_k , а развертка осуществляется за время $t_p = \tau_k/n$, где n — целое число. Сигналы с мишени, каждый из которых образован за время t_p , суммируются в цикле. Суммируемый сигнал определяется длительностью цикла τ_k , т. е. остается таким же, как и при обычной развертке, а «растекание» зарядового рельефа уменьшается в $\sqrt{n}$ раз [10]. Положительный эффект можно усилить, применив алгоритм, состоящий в том, что при первом считывании фиксируются координаты пикселов с ненулевым сигналом, а суммирование для них проводится без ограничений. Суммирование сигналов всех других пикселов начинается после K_p разверток. Значение K_p выбирается экспериментально и применительно к задаче.

1. Порев В. А. Телевизионный пирометр // Приб. и техника эксперимента. — 2002. — № 1. — С. 150.
2. Порев В. А. Аналіз параметрів зонної очистки за допомогою приладів з електронним розгортанням зображення // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2000. — № 1. — С. 89.
3. Брацлавец П. Ф., Росселевич И. А., Хромов Л. И. Космическое телевидение. — М.: Связь, 1973.
4. Маслюков Ю. С. Определение предельных погрешностей измерительной системы на ПЗС // Оптико-мех. пром-сть. — 1990. — № 4. — С. 70.
5. Свет Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур. — М.: Наука, 1982. — 296 с.
6. Раницевич В. Б. Пирометрия при посторонних источниках излучения. — Минск: Наука и техника, 1989.
7. Порев В. А. Компенсация излучения электрода при исследовании температурного поля зоны плавки // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 4. — С. 55.
8. Кириков И. И. Метрологические основы оптической пирометрии. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 140 с.
9. Кейзан Б. Достижения в технике передачи и воспроизведения изображений / Пер. с англ. — М.: Мир, 1980. — 311 с.
10. Порев В. А. Застосування півовідіконних приладів для аналізу оптичних полів // Вимір. та обчисл. техніка в технол. процесах. — 1998. — № 4. — С. 64.
11. Березкин Н. А., Дуи А. З., Меркин С. Ю. // Оптич. журн. — 1997. — 64, № 6. — С. 93.



РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОВОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЛЯ АКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

В. А. СТОРОЖЕНКО, С. Н. МЕШКОВ, А. А. ГАПТРАКИПОВ

Предложен метод нахождения оптимальных конструкционных параметров, обеспечивающих минимальную неравномерность плотности потока энергии от площадочных нагревателей для проведения активного теплового неразрушающего контроля (АТНК). Разработан реальный площадочный нагреватель на основе стандартных галогенных ламп.

A method is proposed to find optimal structural parameters, providing minimal non-uniformity of the density of energy flow from area heaters to conduct active thermal non-destructive testing (ATNDT). An actual area heater based on halide lamps is developed.

Современные тепловизионные комплексы являются высокоскоростными регистрирующими системами, способными получать и обрабатывать информацию с крупногабаритных объектов контроля (ОК), что значительно повышает его производительность. Для эффективного использования в АТНК тепловизионных комплексов необходимо наличие площадочного нагревателя с достаточно высокой плотностью потока энергии и равномерным его распределением по поверхности ОК. При этом плотность потока энергии должна составлять $10^4 \dots 10^5$ Вт/м², а неравномерность нагрева поверхности не должна превышать 3...5 % по площади не менее 10×10 см². Высокие требования к неравномерности нагрева связаны с тем, что участки с температурой, отличающейся от средней, при проведении АТНК могут восприниматься оператором как дефекты, что значительно снижает достоверность контроля [1].

В настоящее время существуют высокоинтенсивные источники (кварцевые спиральные нагреватели, галогенные лампы, спиральные нагреватели с открытым телом накала), однако построение на их базе площадочных нагревателей с довольно высокой равномерностью нагрева при сравнительно малых расстояниях до поверхности ОК является малоизученной проблемой. Авторам удалось найти считанные публикации [2–4], в которых эта проблема рассматривается, причем далеко не в полном объеме.

Постановка задачи. Для целей АТНК основными параметрами нагревателя являются: плотность потока энергии ψ [Вт/м²], создаваемая источником на заданной площадке, и неравномерность нагрева на заданной площади η [%]. Рассмотрим нагреватель излучательного типа (рис. 1), состоящий из трубчатых излучателей (например, галогенных ламп) и плоского отражателя с закругленными краями. Обозначим мощность излучения Q , длину тела накала L . Задачей проектирования является определение минимального числа нагревателей и их расположения (параметры h, a, d), обеспечивающих требуемые значения величин ψ и η на заданной площади S .

Расчет пространственно-энергетических характеристик поля освещенности, создаваемого полосовыми и площадочными источниками теп-

лового возбуждения (ИТВ). Освещенность, создаваемая одним цилиндрическим излучателем, параллельным плоскости XOY и оси OX , выражается формулой

$$E = \frac{Qh}{8\pi L(h^2 + y^2)} \left[\arctg \frac{L/2 + x}{\sqrt{h^2 + y^2}} + \frac{1}{2} \sin \left(2 \arctg \frac{L/2 + x}{\sqrt{h^2 + y^2}} \right) + \arctg \frac{L/2 - x}{\sqrt{h^2 + y^2}} + \frac{1}{2} \sin \left(2 \arctg \frac{L/2 - x}{\sqrt{h^2 + y^2}} \right) \right], \quad (1)$$

где h — расстояние от источника излучения до поверхности ОК; x, y — координаты, в которых вычисляется плотность потока энергии; L — длина излучателя; Q — его мощность [5].

Для системы из N излучателей с отражателем поле освещенности объекта может быть рассчитано как суперпозиция полей освещенности, создаваемых каждым излучателем (реальным или мнимым) в отдельности [5]:

$$E = \sum_{i=1}^N E(x, a((N+1)/2 - i, h)) + k \sum_{i=1}^N E(x, a((N+1)/2 - i), h + d) + kE(x, -a(N-1)/2, h) + kE(x, a(N-1)/2, h), \quad (2)$$

где k — коэффициент отражения поверхности отражателя.

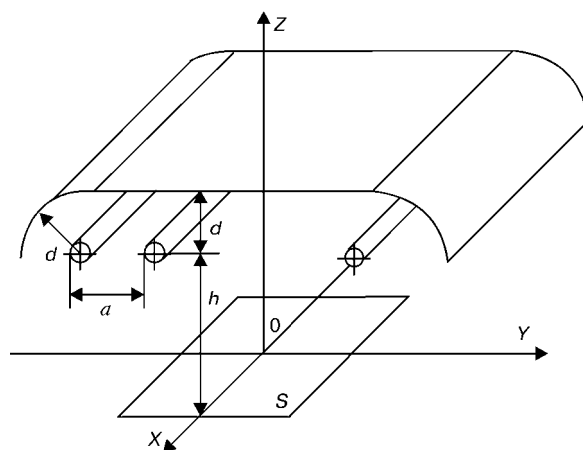


Рис. 1. Структурная схема нагревателя

Таблица 1. Минимальная неравномерность нагрева поверхности объекта источниками излучения в зависимости от их количества

Параметр	N, шт.				
	2	3	4	5	6
η , %	34,8	16,9	8,9	7,6	3,9
a , мм	60	41	33	29	29

Таблица 2. Оптимальные характеристики нагревателей с зеркальным отражателем

Тип лампы (излучателя)	h , мм	a , мм	d , мм	E , кВт/м ²	η , %
КГ-220-360	150	46	15	10	6,9
КГ-220-425	20	23,5	15	45,6	2,5

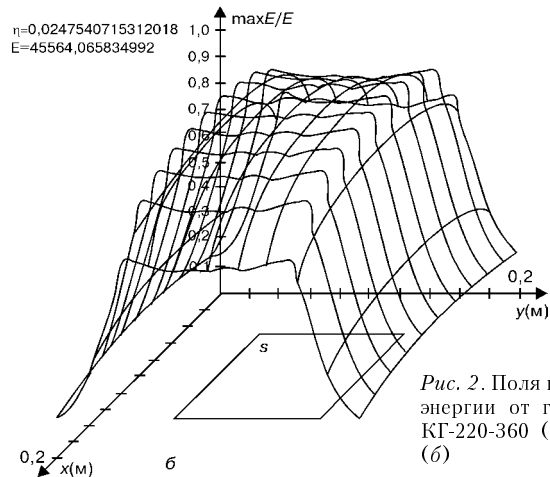
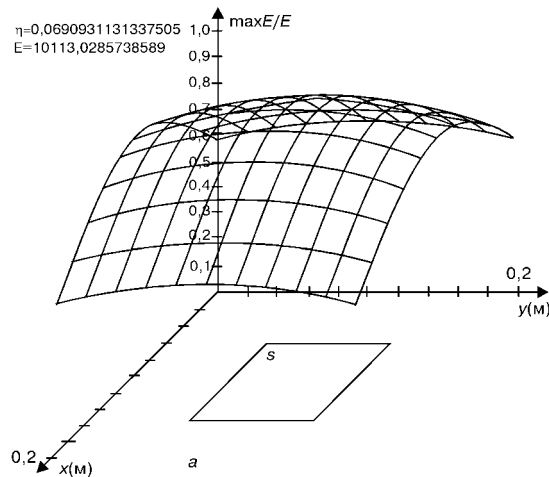


Рис. 2. Поля плотности потока энергии от галогенных ламп КГ-220-360 (а) и КГ-220-425 (б)

Решение задачи. Для решения задачи в качестве излучателей выбраны стандартные галогенные лампы КГ-220-360 и КГ-220-425 со следующими характеристиками: $L_1 = 128$ мм; $Q = 360$ Вт; $L_2 = 226$ мм; $Q_1 = 425$ Вт; диаметр колбы лампы $D = 8$ мм.

Проведен расчет неравномерности нагрева для точечных источников, удаленных от поверхности объекта на расстояние $h = 20$ мм, для расстояний между источниками a , обеспечивающих минимальную неравномерность нагрева на отрезке длиной $l = 100$ мм (табл. 1). Согласно полученным данным при увеличении количества источников можно добиться более низкой неравномерности освещенности поверхности объекта. В результате было выбрано минимально возможное количество источников излучения $N = 6$.

Используя формулу (2) для решения задачи с выбранными типами излучателей, получили оптимальные характеристики нагревателей с зеркальным отражателем (табл. 2). Соответствующие поля плотности потока энергии показаны на рис. 2. В соответствии с данными табл. 2 для излучателей первого типа невозможно получить решение, удовлетворяющее требуемой неравномерности потока энергии. Это связано со значительным влиянием на неравномерность освещения поверхности объекта длины источника излучения, если она сравнима с длиной освещаемой поверхности.

Путем вычислительного эксперимента установлено, что при варьировании расстояния между отражателем и источниками излучения можно добиться уменьшения неравномерности нагрева поверхности на 0,5 % при уменьшении освещенности на 20 %.

По результатам исследования авторами создан реальный комплекс контроля теплоизолирующих материалов из стеклопластиков размерами 10×10 см с

разработанным нагревателем из шести элементов галогенных ламп КГ-220-425 (расстояние между лампами $a = 23,5$ мм между источниками и поверхностью ОК $h = 20$ мм, между источниками и отражателем $d = 15$ мм). В качестве сканирующего устройства может быть применена ИК камера IRTIS-200, обеспечивающая следующие параметры: чувствительность 0,05 °С; время сканирования кадра 1,5 с; поле зрения камеры 25°×20°; разрешение кадра 256×256.

Итак, решена задача оптимизации неравномерности освещенности для конструктивных параметров рассматриваемого ИТВ со стандартными элементами излучения (количество источников излучения, их высота над освещаемой поверхностью, расстояние между ними) и рассмотрено влияние изменения расположения отражателя в ИТВ на неравномерность освещенности поверхности.

1. Стороженко В. А., Вавилов В. П., Волчек А. Д. Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом. — Киев: Техника, 1988. — 127 с.
2. Левитин И. Б. Применение инфракрасной техники в народном хозяйстве. — Л.: Энергоиздат, 1981. — 264 с.
3. Рычков В. И., Пальцев М. Б. Расчет облученности и коэффициентов облученности от цилиндрических источников излучения с произвольным пространственным распределением потока // Тр. МЭИ. Сер. Светотехника. — 1971. — Вып. 92. — С. 57–65.
4. Епанешников М. М., Сидорова Т. Н. Расчет распределения светового потока от линейного излучателя // Светотехника. — 1969. — № 4. — С. 48–55.
5. Мешков С. Н., Гаттракитов А. А. Площадочный нагреватель для активного теплового неразрушающего контроля (АТНК) // Неруйнівний контроль конструкційних та функціональних матеріалів: 36. наук. праць Фіз.-мех. ін-ту ім. Г. В. Карпенка НАНУ. Сер. Фізичні методи та засоби контролю середовища, матеріалів та виробів. — Львів, 2002. — Вып. 7. — С. 172–174.



ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА «НЕЛИНЕЙНОГО» ПОРОГА СРАБАТЫВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МЕТАЛЛА АРОЧНЫМИ МЕТАЛЛОДЕТЕКТОРАМИ

Ю. Г. ЗАДОРЖНЫЙ, А. Л. ДЕРКАЧ, М. Н. СКОРИНА

Даны особенности преобразования изменения электромагнитного поля в электрический сигнал при детектировании металла в арочных металлодетекторах. Показаны особенности алгоритма расчета порогового значения, связанного с местом детектирования металла в объеме контролируемого пространства.

Features of conversion of the change of electromagnetic field into the electric signal in arc metal detectors at metal detection are described. Shown are the features of the algorithm of calculation of the threshold value, related to the point of metal detection in the volume of space being controlled.

Недостатком многих типов арочных металлодетекторов является нелинейная зависимость изменения электромагнитного поля при внесении металлического предмета внутрь арки. Это приводит к тому, что реакция электрической схемы металлодетектора на предметы, расположенные вблизи измерительных панелей, более сильная, чем на те же предметы, расположенные в центре арки. При этом различие в уровнях сигналов может достигать 20 раз. Таким образом, вероятность срабатывания на сравнительно небольшой предмет (например, дверной ключ), расположенный вблизи измерительной панели, такая же, как и на предмет, в 20 раз больший (например, пистолет), проносимый в центре проходных ворот. При детектировании наличия металла по порогу это значительно ухудшает детектирующие свойства металлодетектора. При определении порога срабатывания, зависящего от места расположения предмета в

арке проходных ворот, вероятность ложного срабатывания металлодетектора уменьшается.

Целью работы является разработка алгоритма обработки сигналов от двух работающих встречно каналов, учитывающего нелинейность преобразования электромагнитного поля в выходной сигнал приемного канала и обеспечивающего получение значений порога срабатывания, зависящего от места расположения предмета в арке металлодетектора, для уменьшения возможности ложных срабатываний этого устройства.

Конструкция металлодетектора АМД-70 (рис. 1) представляет собой арку проходных ворот, включающую балку с электронным блоком 1 и измерительные плиты 2 с излучающей 3 и приемными 4 катушками. Внутри балки, скрепляющей две измерительные плиты, находится электронный блок (рис. 2). Он состоит из генератора, усилителей и микроконтроллера. Измерительная плита включает одну излучающую катушку и четыре пары приемных. Генератор поочередно подключается к излучающим катушкам, расположенным в правой и левой плитах. Синусоидальный сигнал частотой 3...6 кГц излучается катушкой, подключенной к генератору, и формирует электромагнитное поле внутри арки. Измененное электромагнитное поле принимается двумя приемными катушками, расположенными на противоположной стороне от генераторной. Дифференциальный усилитель, подключенный к двум приемным катушкам и контроллеру, является измерительным каналом. Он усиливает разность сигналов, полученных от двух приемных катушек, которая затем анализируется микроконтроллером.

В состав металлодетектора входит один микроконтроллер и восемь измерительных каналов. При этом конструктивно по два измерительных канала подключены к своей паре приемных катушек, рас-

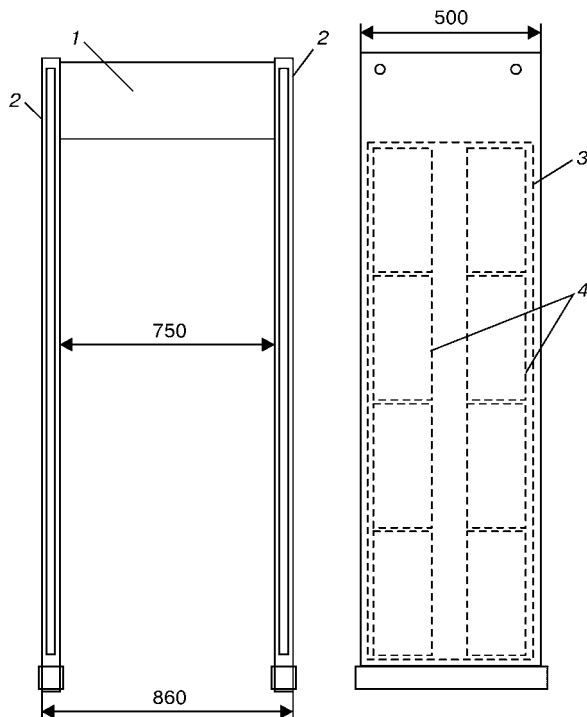


Рис. 1. Конструкция металлодетектора арочного типа (обозначения см. в тексте)

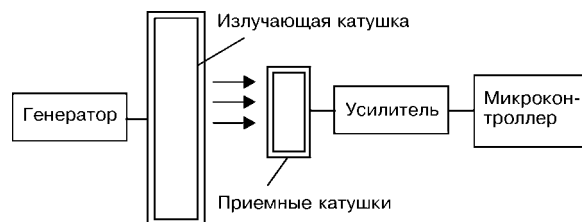


Рис. 2. Электрическая блок-схема металлодетектора

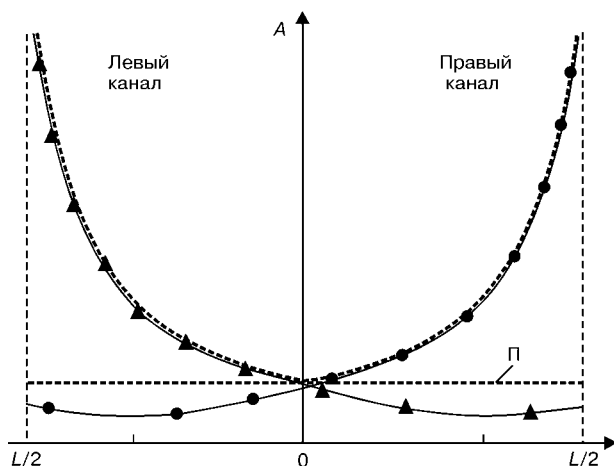


Рис. 3. Зависимость амплитуды A сигнала измерительного канала от места расположения детектируемого предмета; Π — порог срабатывания; 0 — центр арки металлодетектора; L — ширина прохода

положенных в противоположных плитах таким образом, что они работают встречно и составляют измерительную полосу. Микроконтроллер проводит обработку сигналов от восьми измерительных каналов и выдает команду о срабатывании (детектировании металла) на устройство индикации, управляющее устройством, а также звуковой сигнал.

Таким образом, в арке проходных ворот формируется электромагнитное поле, которое меняется при внесении в него металлического предмета. Это изменение фиксируется в каждой измерительной полосе одновременно двумя усилителями, подключенными к своей паре приемных катушек.

При движении металлического предмета в области со сформированным электромагнитным полем в последнем происходят изменения, связанные с потерями электрической энергии в электропроводящем материале. Изменения сигнала от каждого измерительного канала фиксируются микроконтроллером. Абсолютная величина отклонения от установившегося значения — амплитуда сигнала — вычисляется как разность между постоянным значением и значениями в измерительном канале в текущий момент времени. Величина отклонения зависит от размера металлического предмета и его места расположения в объеме контролируемого пространства внутри проходных ворот. Вблизи измерительной плиты амплитуда сигнала от измерительного канала от одного металлического предмета имеет большие значения по сравнению со значениями, полученными в центре арки.

В процессе настройки металлодетектора амплитуды выходных сигналов правого и левого каналов, работающих встречно, уравниваются числовыми методами при настройке по эталонному предмету. Уравнивание заключается в том, что при расположении эталонного предмета в центре измерительной полосы арки оба сигнала от измерительных каналов одинаковы по амплитуде и равны порогу срабатывания (рис. 3):

$$A_{\text{л}} K_{\text{ур. л}} = A_{\text{п}} K_{\text{ур. п}} = \Pi,$$

где Π — значения порога срабатывания; $A_{\text{л}}$, $A_{\text{п}}$ — амплитуды сигналов соответственно от левого и правого каналов; $K_{\text{ур. п}}$, $K_{\text{ур. л}}$ — коэффициенты уравнивания амплитуд соответственно правого и левого каналов.

В процессе работы металлодетектора определяется сторона детектирования — сторона размещения металлического предмета — правая или левая. Для этого сравниваются два значения амплитуды сигнала и определяется большее, принадлежащее правой или левой стороне измерительной полосы. Так, если $A_{\text{л}} K_{\text{ур. л}} > A_{\text{п}} K_{\text{ур. п}}$, то определяется порог левой стороны полосы детектирования. После этого вычисляется отношение амплитуд сигналов:

$$K_{\text{отн}} = A_{\text{л}} K_{\text{ур. л}} / A_{\text{п}} K_{\text{ур. п}}.$$

Отношение амплитуд сигналов зависит от места размещения металлического предмета в объеме детектируемого пространства. При этом можно экспериментально построить зависимость коэффициента коррекции порога срабатывания для каждой точки детектирования.

Значения коэффициента коррекции порога срабатывания $K_{\text{к. пор}}$ определяются по значениям отношения $K_{\text{отн}}$, полученных экспериментально:

$K_{\text{отн}}$	1	0,75	0,46	0,15	0,01
$K_{\text{к. пор}}$	1	1,84	2,5	3,25	4,10
L , м	0	10	20	30	40

Затем проводится вычисление скорректированного порога срабатывания для расстояния от центра прохода до измерительной плиты металлодетектора:

$$\Pi_{\text{к}} = \Pi K_{\text{к. пор}}.$$

При этом получаем значение порога для места расположения предмета по горизонтали.

Значение скорректированного порога сравнивается с максимальным значением амплитуды сигнала в полосе: если $\Pi_{\text{к}} > A_{\text{л}} K_{\text{ур. л}}$, то детектирования нет; если $\Pi_{\text{к}} < A_{\text{л}} K_{\text{ур. л}}$, то детектирование есть (превышен порог срабатывания).

Превышение амплитуды сигнала рассчитанного значения порога срабатывания означает детектирование металла с большими размерами и массой по сравнению с эталонным предметом.

ВЫВОДЫ

Использование алгоритма «нелинейного» или расчетного порога в программном обеспечении металлодетектора позволяет уменьшить вероятность ложных срабатываний за счет более точного определения порога срабатывания, зависящего от месторасположения детектируемого металлического предмета в объеме контролируемого пространства.



ПРИНЦИПЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ СВАРОЧНЫМИ ПРОЦЕССАМИ

И. А. ТАРАРЫЧКИН

Рассмотрены принципы построения систем регулирования технологических процессов, определены области их рационального применения. Даны сравнительные оценки различных систем регулирования.

The paper considers the principles of construction of systems for process parameters adjustment and outlines the areas of their rational application. Comparative estimates are given of different systems of adjustment.

Обеспечение качества продукции при функционировании современных сварочных комплексов связано с использованием, как правило, нескольких систем автоматического регулирования (САР), позволяющих поддерживать на заданном уровне значения важнейших технологических характеристик (параметров) процесса. Дополнительные возможности по обеспечению гарантий качества продукции могут быть реализованы при использовании систем статистического регулирования (ССР) [1, 2]. Наиболее эффективным образом обеспечить сочетание указанных систем можно на основе учета особенностей их применения в задачах управления процессами.

Так, применение САР считается наиболее целесообразным при управлении быстротекущими процессами без непосредственного участия человека. В случае долговременных процессов, характеризующихся постепенным накоплением изменений в состоянии контролируемой системы, быстродействие САР оказывается не востребуемым, а их использование — неэффективным. В реальных условиях сварочного производства долговременные технологические процессы могут быть связаны, например, с электрошлаковой, дуговой сваркой в узкий зазор, термообработкой крупногабаритных конструкций.

В общем случае совместное функционирование САР и ССР следует организовать таким образом, чтобы выполнить условия для взаимного дополнения возможностей каждой из систем, обеспечивая

тем самым требуемый уровень гарантий качества продукции. В табл. 1 приведены сравнительные данные, определяющие область рационального применения различных систем регулирования, что необходимо учитывать при решении конкретных задач, связанных с управлением процессами.

Традиционная схема управления процессом производства с использованием методов статистического регулирования основана на формировании обратной связи в виде некоторой последовательности непрерывно или периодически осуществляемых корректирующих действий. Наличие построенной подобным образом обратной связи позволяет рассматривать процесс производства, организованный по указанной схеме как управляемый по отклонению (рис. 1).

Представленная схема функционирования обратной связи обусловлена необходимостью периодического отбора выборок и статистической обработкой результатов выполнения контрольных операций. Это означает, что традиционный метод статистического регулирования, основанный на использовании контрольных карт (карт Шухарта), в наибольшей степени соответствует условиям крупносерийного и массового производства [1].

В условиях единичного (мелкосерийного) производства необходимо контролировать текущее состояние процесса с применением карт контроля, методика построения которых изложена в [3]. Такая схема управления процессом с формированием обратной связи по возмущению показана на рис. 2.

Таблица 1. Особенности построения и функционирования различных систем регулирования

Наименование	САР	ССР
Объект, функционирование которого связано с необходимостью регулирования	Основное и вспомогательное технологическое оборудование	Производственные процессы и отдельные технологические операции
Характеристики, используемые при решении задач регулирования	Непосредственно определяемые (измеряемые) физические параметры и характеристики используемого оборудования и процессов	Статистики, вычисляемые по результатам анализа контрольных выборок
Характерные особенности контролируемых процессов	Быстротекущие, малоинерционные с возможными скачками контролируемых параметров	Продолжительные во времени, вялотекущие с постепенным изменением значений контролируемых характеристик
Характер контроля, осуществляемого за состоянием системы	Преимущественно непрерывный	Преимущественно дискретный, выполняемый в заранее установленные промежутки времени
Возможность участия человека (оператора)	Без непосредственного участия	Допускается участие в процедуре сбора и анализа данных. Предполагается участие в принятии решений

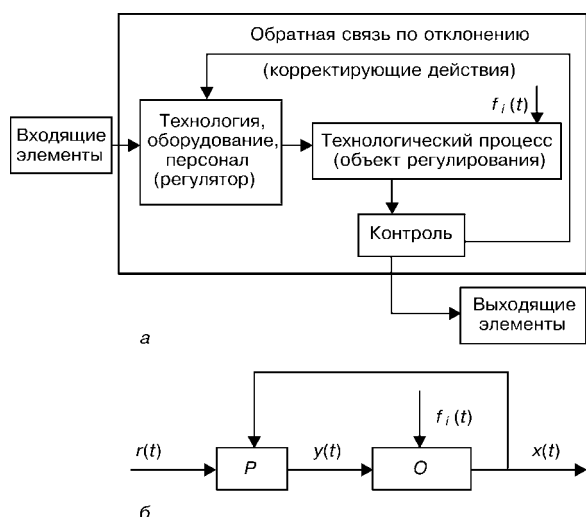


Рис. 1. Схема статистического регулирования производственного процесса (а) и эквивалентная схема управления по отклонению (б): $f_i(t)$ — возмущающее воздействие; P — регулятор; O — объект регулирования

Рассматривая возможности схемы управления производственным процессом по возмущению (рис. 2), следует отметить ее отличия от традиционной схемы, с управлением по отклонению (рис. 1). Главной отличительной особенностью последней является более высокий уровень сложности и предположительно более высокий уровень эксплуатационных затрат. Преимущества предлагаемой схемы заключаются в том, что при ее реализации обратная связь осуществляется в виде предупреждающих действий, что обеспечивает приоритетность предупреждающих действий по отношению к корректирующим. Сравнительные данные в отношении областей рационального применения различ-

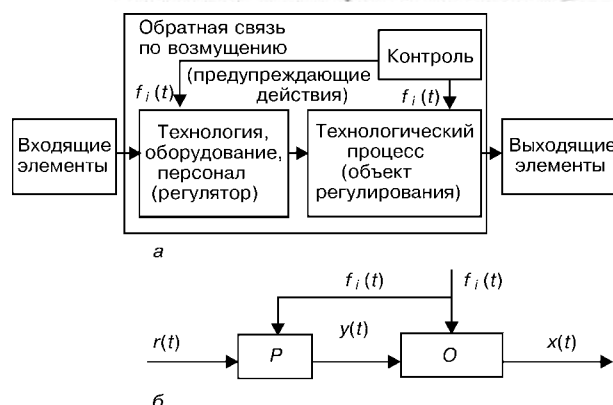


Рис. 2. Схема статистического регулирования производственного процесса (а) и эквивалентная схема управления по возмущению (б) (обозначения те же, что и на рис. 1)

ных схем статистического регулирования технологических процессов представлены в табл. 2.

Предложенный подход позволяет также сформулировать схему управления процессом комбинированного типа, характеризующуюся наличием системы обратных связей, устанавливаемых как по отклонению, так и по возмущению (рис. 3). Функционирование такой схемы связано с необходимостью сочетания в процессе производства как корректирующих, так и предупреждающих действий.

Для анализа возможности использования комбинированной ССР рассмотрим в качестве примера случай дуговой сварки в узкий зазор по схеме один слой за проход продольного шва толстостенной цилиндрической обечайки. В этом случае задача обеспечения качества формирования многопроходного шва может быть решена на базе следующего подхода. Контроль и документирование параметров режима многомерного процесса сварки целесо-

Таблица 2. Методологические подходы к решению задач статистического регулирования

Наименование	Подходы, основанные на использовании метода контрольных карт	Подходы, основанные на контроле состояния процесса с использованием карт контроля
Рациональная область применения методов статистического регулирования	Крупносерийное и массовое производство штучной и нештучной продукции. Время производства единицы продукции невелико. Затраты на производство единицы продукции невелики. Контроль качества отдельных единиц продукции технических сложностей не вызывает. Исправление обнаруженных дефектов сложностей не вызывает	Единичное и мелкосерийное производство. Время производства единицы продукции значительно. Затраты на производство единицы продукции значительны. Контроль качества готовой продукции технически сложен и трудоемок. Исправление дефектов является сложной технической задачей и связано с дополнительными финансовыми затратами
Методологические особенности реализуемого подхода	Состояние процесса оценивается по результатам контроля характеристик продукции. Считается, что выборка из совокупности единиц продукции, прошедших анализируемый процесс, содержит информацию о его состоянии. Эта информация может быть выявлена, проанализирована и использована при решении задач регулирования	Состояние процесса оценивается непосредственно, в реальном масштабе времени. Считается, что требуемый уровень качества продукции может быть обеспечен только соответствующей технологией. Наблюдаемые отклонения характеристик качества продукции обусловлены случайными и систематическими отклонениями параметров процесса, а возникающие несоответствия обусловлены нарушениями нормальных условий его протекания
Мероприятия, осуществляемые на этапе подготовки производства	Предварительная оценка точности и стабильности процесса	Предварительная оценка точности и стабильности процесса Прогнозная оценка состояния процесса Оценка взаимного соответствия квалификации процесса и используемого оборудования
Мероприятия, осуществляемые в процессе производства	Действия преимущественно <i>корректирующего</i> характера	Действия преимущественно <i>предупреждающего</i> характера

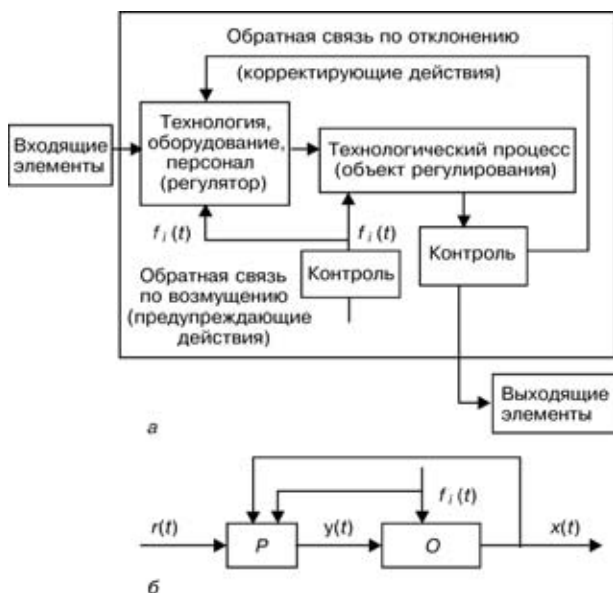


Рис. 3. Схема статистического регулирования производственного процесса (а) и эквивалентная схема комбинированного управления по отклонению и возмущению (б) (обозначения те же, что и на рис. 1)

образно осуществлять с использованием карт контроля состояния [3]. Контроль качества и документирование процесса формирования шва следует выполнять с использованием метода контрольных карт по результатам анализа макрошлифов зоны проплавления, изготавливаемых после сварки каждого слоя, в соответствии с методикой [4].

Анализируя структуру комбинированной схемы управления процессом, следует отметить ее более высокий уровень сложности, что, по-видимому, будет связано и с ростом эксплуатационных затрат.

Однако в последнем случае уровень контроля над состоянием процесса особенно высок, а достижение гарантий обеспечения качества продукции здесь может быть наивысшим.

Более высокий уровень эксплуатационных затрат при статистическом регулировании процессов в соответствии со схемой третьего типа (рис. 3) может быть экономически оправдан для соответствующей области рационального применения, когда продукция дорогостоящая, а выполнение мероприятий, связанных с исправлением дефектов, представляет собой сложную техническую задачу.

При решении задач обеспечения качества продукции с использованием ССР обозначенные подходы позволяют организовать процесс производства в виде функционирующей системы гибких обратных связей, устанавливаемых в зависимости от типа производства, особенностей технологии и конструкции изделия, а также исходя из сформулированных требований к качеству и с учетом факторов экономического характера. Особенности реализации различных вариантов статистического регулирования сварочных процессов при решении задач обеспечения качества продукции приведены в табл. 3.

Представленные рекомендации в отношении применимости тех или иных методов могут быть использованы при разработке рациональных схем и построении систем статистического регулирования в условиях реального производства. Следует также иметь в виду, что в различных ситуациях характер требований, предъявляемых к контролю состояния, управлению и документированию хода процесса, может существенно варьироваться в зависимости от назначения конструкции, масштабов

Таблица 3. Сравнительные характеристики различных вариантов статистического регулирования технологического процесса

Наименование	Схема управления процессом		
	С регулированием по отклонению	С регулированием по возмущению	Комбинированная, с регулированием по отклонению и возмущению
Задача, решаемая в процессе статистического регулирования	Поддержание налаженного состояния процесса, при котором наблюдаемые отклонения контролируемых характеристик качества продукции $X_1^*, X_2^*, \dots, X_k^*$ носят случайный характер, а действие систематических причин, приводящих к их изменению, не наблюдается	Поддержание такого состояния, при котором контролируемые характеристики процесса $X_1, X_2, \dots, X_r$ находятся на уровне, обеспечивающем выполнение сформулированных требований к точности	Поддержание процесса в налаженном состоянии при соблюдении всех требований к точности
Контролируемые параметры	Характеристики качества продукции	Характеристики точности процесса	Характеристики качества продукции и точности процесса
Статистики, вычисляемые по результатам анализа выборки	Среднее арифметическое значение $\bar{x}_i$, среднеквадратическое отклонение S_i , размах R_i ($i = 1, 2, \dots, k$)	Комплексный критерий точности g_{Sj} ; критерий относительной точности g_{Ej} ($j = 1, 2, \dots, r$)	Критерии $\bar{x}_i, S_i, R_i, g_{Sj}, g_{Ej}$ ($i = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, r$)
Способ документирования	С использованием контрольных карт	С использованием карт контроля	С использованием контрольных карт и карт контроля
Решение, принимаемое по результатам контроля	Процесс налаженный или разлаженный	Точность процесса обеспечивается или не обеспечивается	Процесс налаженный или разлаженный, точность обеспечивается или нет
Характер действий, осуществляемых в процессе регулирования	Корректирующие по содержанию, в форме корректировки параметров режима или подналадки оборудования, направленные на возврат процесса в налаженное состояние	Предупреждающие по содержанию, в форме корректировки характеристик, влияющих на точность, или подналадки оборудования, направленные на восстановление нарушенной точности	Корректирующие и предупреждающие в любой форме, направленные как на восстановление точности, так и на возврат процесса в налаженное состояние



Таблица 4. Характеристика различных уровней контроля за состоянием процесса

Параметр, контролируемый в ходе управления процессом	Уровень контроля				
	1	2	3	4	5
Отклонение электрода от оси зазора	АД1	А	А	А	А
Вылет электрода	А	А	А	А	А
Скорость сварки	АД1	А	А	А	А
Сварочный ток	А	А	А	А	А
Напряжение на дуге	АД1	АД1	АД1	А	А
Текущая ширина зазора	СД2	СД2	СД2	СД2	С
Проплавление боковой стенки зазора	СД2	СД2	—	—	—
Температура подогрева:					
предварительного	СД2	С	—	—	—
сопутствующего	СД2	СД2	С	—	—
Температура отдыха	СД2	С	С	—	—

Примечание. Контролируемый параметр поддерживается на заданном уровне: А — с использованием соответствующего оборудования, оснащенного САР; АД1 — с использованием САР (документирование выполняется с применением регистрирующих приборов или карт контроля состояния); С — контролируемый параметр поддерживается на заданном уровне с применением ССР; СД2 — с использованием ССР (документирование выполняется с применением контрольных карт или карт контроля состояния).

производства, специфики выполняемых работ, установленных требований к качеству и т. п. Так, уровень требований в отношении контроля и управления состоянием процесса производства ответственных крупногабаритных сварных конструкций, предназначенных для работы в сложных условиях, может быть предельно высоким. В то же время при исправлении технологических дефектов требования к контролю за состоянием процесса могут быть ослаблены, поскольку ремонтные работы и используемые при этом технологии оказываются менее сложными. Уровень контроля за состоянием процесса может быть заметно ослаблен и в случае исправления эксплуатационных повреждений, когда целью ремонта является продление сроков эксплуатации конструкции, частично отработавшей свой ресурс [5].

В табл. 4 представлены рекомендации в отношении пяти уровней контроля за состоянием процесса сварки продольного шва толстостенной цилиндрической обечайки, отличающихся степенью сложности, количеством контролируемых параметров и достигаемым уровнем гарантий качества.

Результаты проведенного анализа позволяют сделать вывод о том, что адаптационные возможности существующих методов управления процес-

сами весьма широки, а имеющийся инструментарий при условии его рационального применения позволяет эффективно решать задачи обеспечения качества продукции. В целом выбор уровня контроля за состоянием процесса и соответствующего сочетания систем регулирования следует осуществлять в каждом конкретном случае отдельно с учетом всего комплекса требований по обеспечению качества, имеющегося технологического оборудования, масштабов производства, экономического и других факторов.

Отметим, что представленные классификационные схемы (рис. 1–3) и рассмотренные принципы организации соответствующего функционирования технологических систем можно рассматривать как инструмент технической диагностики. При этом диагностирование и распознавание состояния систем выполняется с применением статистических методов и соответствующих алгоритмов обработки данных.

Используемые для решения диагностических задач статистики x_i , S_i , R_i , g_{S_j} , g_{E_j} (табл. 3) являются весьма информативными, поскольку характеризуются меньшей изменчивостью по сравнению с теми выборочными характеристиками, которые используются для их определения. Вследствие статистической устойчивости эти критерии могут быть успешно использованы не только при решении задач распознавания текущего состояния, но и при прогнозировании надежности технологических систем.

1. *Статистические методы контроля качества продукции* / Л. Ноулер, Дж. Хауэлл, Б. Голд и др. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 104 с.
2. *Контроль качества сварки* / Под ред. В. Н. Волченко. — М.: Машиностроение, 1975. — 328 с.
3. *Тарарычкин И. А.* Статистическое регулирование сварочных технологических процессов с использованием метода построения карт контроля состояния // Автомат. сварка. — 2001. — № 10. — С. 33–36.
4. *Пат. 45863 України, МПК В23 К 9/00, 28/00.* Спосіб контролю якості формування багатопрохідного шва і пристрій для його здійснення / І. О. Тараричкін, Д. А. Оселедько. — Опубл. 15.04.02, Бюл. № 4.
5. *Тарарычкин И. А., Ткаченко А. Н.* Исправление дефектов в металле большой толщины с использованием технологии дуговой сварки в узкий зазор // Автомат. сварка. — 2002. — № 4. — С. 52–53.

Восточно-укр. нац. ун-т,
Луганск

Поступила в редакцию
11.04.2002



ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ ИЗДЕЛИЙ В УСЛОВИЯХ РЕМОНТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Л. А. КИЯШКО, Л. М. МУРЗИН

Выполнен анализ проблем применения сплошного контроля качества сварных изделий в условиях ремонтных предприятий на примере судоремонтных предприятий г. Севастополя. Рассмотрены методологические аспекты разработки технологической оснастки для экспресс-контроля приборами неразрушающего контроля качества сварки корпусов вспомогательного оборудования судов.

The problems of application of 100% control of welded items quality in repair enterprises are analyzed in the case of ship repair enterprises of the city of Sevastopol. Procedural aspects of development of a process fixture for fast control with NDT instruments of the quality of welding the cases of ship auxiliary equipment are considered. The possibility of development of a unified process fixture to control a broad range of cases is demonstrated, based on typological schematics and classifiers.

Вопросам контроля качества изделий судоремонтных предприятий уделяется большое внимание ввиду их важности для обеспечения надежности механизмов и машин — оборудования судов, работающих в условиях автономного плавания. На ремонтных предприятиях, характерных для г. Севастополя, номенклатура изделий неустойчива и разнообразна. В связи с этим организация контроля качества изделий отличается от принятых в массовом и крупносерийном производствах. На ремонтных предприятиях используется визуальный или выборочный контроль характеристик качества изделий. Эти способы контроля не могут обеспечить гарантированные показатели надежности каждого изделия, выпускаемого судоремонтным предприятием, в то время как требования гарантированных показателей надежности являются обязательным условием безаварийной эксплуатации машин и механизмов судов. Особенно это относится к палубным механизмам, работающим в жестких условиях морской практики. В связи с изложенным организация сплошного контроля, т. е. контроля качества каждого изделия ответственного назначения в условиях ремонтного предприятия актуальна и необходима.

В условиях современных ремонтных предприятий со слабым заготовительным производством получила развитие практика изготовления сварных изделий, в частности, корпусов механизмов, взамен вышедших из строя литых или штампованных. Это отвечает требованиям повышения технологичности конструкции сложных изделий. Очевидно, что себестоимость изготовления сварных изделий, особенно пустотелых корпусов сложной формы, значительно ниже, чем литых или штампованных, что особенно ощутимо в характерном для судоремонта единичном производстве. Вместе с тем сварные швы в таких корпусах отличаются неоднородностью структуры, поэтому очевидна необходимость сплошного контроля качества сварки.

В настоящее время для контроля качества сварных соединений широко применяется неразрушающий ультразвуковой контроль (УЗК) [3, 4]. Следует отметить, что применение УЗ дефектоскопов для контроля сварных швов сложной конфигурации, особенно для экспресс-контроля, требует высокой квалификации обслуживающего персонала. Необходимо строго соблюдать технологию контроля, нормировать частотные и геометрические параметры, применять специализированную оснастку. Отсутствие метрологического обеспечения пьезоэ-

лектрических преобразователей (ПЭП) для УЗК сварных соединений малой толщины усложняет применение УЗ дефектоскопов [3].

В условиях ремонтных предприятий разработка специализированной технологической оснастки для широкой номенклатуры изделий экономически невыгодна, так как она приводит к значительному повышению себестоимости и снижению конкурентоспособности продукции. Решение этой проблемы возможно путем создания специализированной технологической оснастки универсального типа — универсальных сборных приспособлений (УСП), охватывающих все потребности предприятия по контролю качества продукции и одновременно учитывающих все конструктивные особенности контролируемых изделий.

Для решения поставленной задачи рассмотрим методологию анализа и разработки УСП.

1. Создание банка данных по объектам контроля и областям контроля сварных швов.
2. Выявление типологических признаков объектов и областей контроля.
3. Разработка типологических схем объектов и областей контроля.
4. Определение количественных показателей контроля.
5. Определения типов и видов средств контроля.
6. Составление технических заданий на разработку УСП.

При этом под объектом контроля понимается изделие, отличающееся геометрическими параметрами и техническими требованиями согласно условиям эксплуатации, а под областью контроля — сварной шов, отличающийся геометрическими параметрами, пространственным расположением, структурой и механическими характеристиками.

Рассмотрим результаты исследований.

Этап 1. Создание банка данных по объектам и областям контроля. Многообразие корпусов машин и механизмов оборудования судов, подвергающихся ремонту на судоремонтных предприятиях, приводит к использованию метода группирования. На основании анализа номенклатуры изделий можно классифицировать корпуса по таким типам:

коробчатой формы (червячных, цилиндрических редукторов, входящих в приводы оборудования судов); габаритные размеры находятся в диапазоне 120... 500 мм; изготавливаются методами ручной электродуговой сварки из проката; сварные швы угловые и тавровые, по конфигурации замкнутые и незамкнутые, круговые и приз-

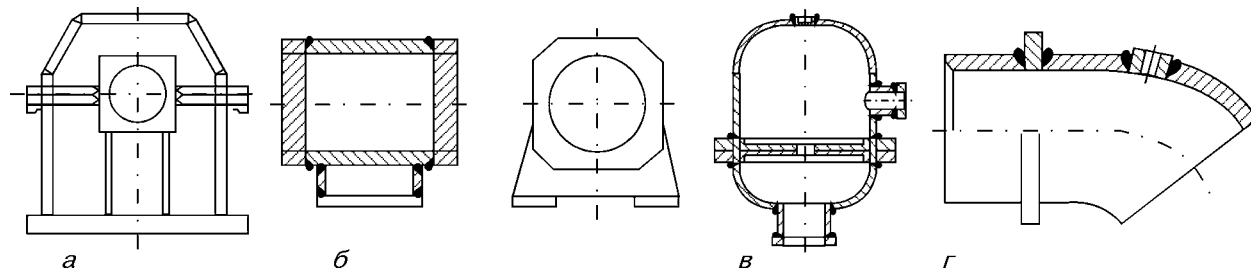


Рис. 1. Типы сварных корпусов: а — коробчатый; б — цилиндрической формы; в — с торовыми поверхностями; г — сочетание цилиндра с фланцем

матические; толщина свариваемых элементов равна 3... 10 мм (рис. 1, а);

цилиндрической формы (планетарных редукторов, радиально-поршневых насосов и гидромоторов); размеры корпусов находятся в диапазоне 100... 400 мм; элементами корпусов являются листовые и цилиндрические заготовки толщиной 3... 12 мм; сварные швы стыковые, угловые и тавровые, по конфигурации прямолинейные и круговые (рис. 1, б);

с торовыми поверхностями (такой тип встречается у фильтров различных конструкций); диапазон размеров 280... 600 мм; заготовки этих корпусов выполняются из листового проката, труб и штампованных торовых элементов; швы стыковые цилиндра с тором, угловые цилиндра с плоскостью; толщина свариваемых элементов 6... 18 мм (рис. 1, в);

корпуса, представляющие собой сочетание цилиндра с фланцем (аксиально-поршневых гидромашин, к которым относится, например, насос-гидромотор нерегулируемый); швы угловые и тавровые; габаритные размеры 100... 250 мм; толщина сварных соединений 3... 12 мм (рис. 1, г).

Для всех типов сварных соединений корпусов характерны различные виды дефектов (коробление, подрезы, наплывы, кратеры, прожоги, непровары, различные включения), но наиболее опасны поры и горячие трещины. Последние приводят к нарушению сплошности и разгерметизации, что делает дальнейшую эксплуатацию оборудования невозможной. Для устранения коробления, являющегося проявлением действия неоднородного поля внутренних напряжений, в технологический процесс вводится целый ряд дополнительных операций. К возникновению трещин могут приводить остаточные сварочные напряжения. Таким образом, дефекты сварки наиболее опасны в областях, находящихся в напряженном состоянии. Такие дефекты в виде внутренних трещин и неоднородностей могут быть обнаружены при помощи УЗ дефектоскопов (например, типа УД-4Т) с наклонными ПЭП, а на поверхности и в подповерхностных слоях — с помощью вихревых (типа ВД-26Н). Для определения непроваров и пористостей можно использовать электромагнитные толщинометры («Константа-К5») с прямыми искателями [4].

Этап 2. Представленные данные позволяют выявить четыре типологических признака объектов и областей контроля.

1-й — размер изделия. Размеры всех изделий можно свести в единую группу для использования однотипных приспособлений.

2-й — конфигурация швов. Большинство швов имеют замкнутую форму, круговые и многоугольные контуры,

угловые и тавровые соединения. Из них большинство (60 %) угловых швов, встречаются также тавровые (30... 35 %) и стыковые (5... 10 %).

3-й — толщина сварных соединений. Толщины сварных соединений рассматриваемых объектов контроля можно разделить на два вида: малые (3... 12 мм) — 75 % — и средние (13... 100 мм) — 25 %.

4-й — характер и вид дефектов. Наиболее опасными являются трещины, пустоты и поры, неметаллические включения и разнотолщинность.

Этап 3. Анализ и выявление типологических признаков позволяет создать типологические схемы объектов и областей контроля. В настоящей работе проведен анализ массива данных по корпусам палубных механизмов среднетоннажных судов. К изученным механизмам относятся следующие: редукторы брашпилей, вьюшек; фильтры масла и топлива; насосы и гидромоторы; гидромашин АПМГ, РПМГ, ШГМ [4].

При сопоставлении с типологическими признаками большинство из них можно отнести к таким группам: все корпуса одного типоразмера; по конфигурации швы угловые и имеют замкнутую и круговую форму; по толщине сварных швов относятся к группе малых толщин; наиболее опасными являются скрытые трещины и пустоты.

ВЫВОДЫ

Результаты анализа показывают возможность сведения разнообразных объектов и областей контроля к ограниченному и малому количеству групп типологических признаков. Так, для сварных корпусов рассмотренной номенклатуры установлено четыре типа и четыре группы. Это позволяет применить для контроля всех указанных изделий унифицированные технологические средства контроля.

Разработка конструкции такой технологической оснастки требует решения специальных конструкторских и технологических задач, рассмотрение которых выходит за рамки данной работы.

1. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник: В 2 кн. / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1976.
2. Заплотинский И. А., Радько В. И. Исследование и выбор параметров пьезопреобразователей для ультразвукового контроля сварных соединений малых толщин // Неразрушающий контроль: Инф.-рекл. бюл. / ЗАО «Ассоциация «ОКО». — 1999. — Вып. 2. — С. 38.
3. Каталог 2001 группы предприятий «Ультракон». — Киев.
4. Шпаков Г. Т. Гидравлические приводы рыбопромысловых судов. — Калининград: Кн. изд-во, 1986. — 168 с.



ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ УГЛЯ

Б. И. НЕВЗЛИН

Предложен способ повышения точности контроля влажности угля переменной зольности по локальным параметрам его электрической модели, снижающий погрешность измерения высокочастотным емкостным методом в 1,5...2 раза.

A method is proposed to improve the accuracy of control of the humidity of coal with variable ash content by local parameters of its electric model, lowering the error of measurement by the high-frequency capacitance method by 1.5 - 2 times.

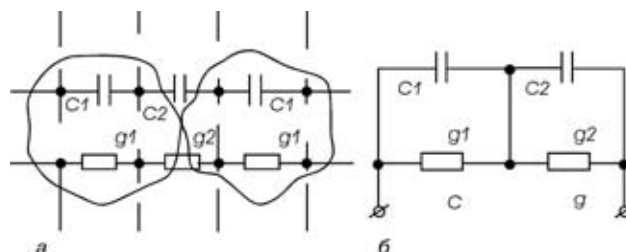
В настоящее время наибольшее распространение при контроле влажности угля получил высокочастотный электроемкостный метод [1]. Приборы, основанные на этом методе, обладают высокой надежностью и удовлетворительной точностью, однако практически пригодны для контроля угля с постоянной зольностью. Так, по утверждению [2], что согласуется с мнением автора, изменение зольности на 1 % эквивалентно по вариации электрических характеристик угля изменению влажности на 0,2 %.

Поскольку реальный диапазон вариации зольности рядовых углей, используемых для получения угольной шихты для коксования, составляет около 10 % [3], то погрешность контроля влажности может достигать 2 % при шкале измерения 10 % влажности. Такая погрешность не может удовлетворять требованиям производства, в связи с чем предложен способ повышения точности контроля влажности угля переменной зольности. По этому способу частицы угля представляются в виде четырехэлементной электрической схемы замещения (рисунок), в которой элементы $C1$, $g1$ отражают основные параметры тела частицы, а $C2$, $g2$ — параметры контактной зоны частиц и межчастичного пространства. Эти параметры названы локальными, тогда как общие для объема угля электрические (емкость C и проводимость g) имеют интегральный характер. Повышение точности возможно за счет меньшей зависимости некоторых локальных параметров от зольности в сравнении с интегральными. Так, емкость $C2$ в диапазоне влажности от 6...8 до 15...20 % зависит от зольности в 7...10 раз меньше, чем емкости $C1$ и C . Изменение зольности на 10 % приводит к вариации емкости $C2$, эквивалентному изменению влажности на 0,3 %, а для $C1$ и C это соответствует изменению влажности соответственно на 3 и 2 %. Большое влияние зольности на параметр C обусловлено сильной связью с ней локальных параметров $g1$, $g2$ в соответствии с формулой, отражающей избранную модель угля:

$$C = \frac{C1(g2)^2 + C2(g1)^2 + \omega^2 C1 C2 (C1 + C2)}{(g1 + g2)^2 + \omega^2 (C1 + C2)^2},$$

где ω — круговая частота измерения величины C .

Способ реализуют следующим образом. Поскольку непосредственное измерение локальных параметров не представляется возможным, то изме-



Модель (а) и электрическая схема замещения (б) частицы угля: $C1$, $g1$ — соответственно электрическая емкость и активная проводимость частицы; $C2$, $g2$ — то же для межчастичного пространства; C , g — соответственно интегральная емкость и проводимость угля

ряют интегральные параметры C и g на двух или трех частотах в высокочастотном диапазоне. Затем по определенному алгоритму [4] определяют локальные параметры $C1$, $C2$, $g1$, $g2$. Сравнивая их с учетом ориентировочно известной влажности, выбирают значение емкости $C2$ и по нему находят уточненное значение влажности угля.

Однако не следует ожидать снижения погрешности определения влажности угля во столько же раз, во сколько меньше зависимость емкости $C2$ от зольности, чем C или $C1$. Поскольку измерение параметров C и g проводится с определенной погрешностью (как правило, порядка 0,5 %), то и вычисление локальных параметров не может быть выполнено с меньшей погрешностью. Реально погрешность определения влажности угля различной зольности удастся снизить в сравнении с погрешностью при общепринятом методе в 1,5...2 раза.

1. Дубров Н. С., Кричевский Е. С., Невзлин Б. И. Многопараметрические влагомеры для сыпучих материалов. — М.: Машиностроение, 1980. — 144 с.
2. Датчики для автоматизации в угольной промышленности // В. А. Ульшин, Г. И. Бедняк, В. П. Довженко и др. / Под ред. В. А. Ульшина. — М.: Недра, 1984. — 245 с.
3. Исследование, разработка и внедрение системы контроля влажности угольной шихты в лабораторных и производственных условиях: (Отчет) / Н. С. Дубров, Б. И. Невзлин, А. А. Золотко и др. — № Э-146-79; Инв. № Б929909. — Ворошиловград, 1980. — 225 с.
4. Невзлин Б. И., Дьяченко Ю. Ю. Расчет локальных электрических свойств зернистых материалов по экспериментальным данным // Вестник Харьков. гос. политехн. ун-та. — 2000. — Вып. 128. — С. 143-147.

РАДИОГРАФИЧЕСКАЯ ПЛЕНКА ФИРМЫ KODAK ТИПА INDUSTREX CX

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) 247-67-18, 495-11-45

Метод радиографического контроля вносит существенный вклад в обеспечение качества и надежности изделий промышленного производства. Он уже долгое время применяется во многих отраслях промышленности как дающий наиболее полную информацию о дефектах. Регистрация результатов контроля на радиографическую пленку представляет собой не только способ получения необходимой информации, но и обеспечивает наличие документа для архива. Это делает промышленную радиографическую пленку уникальным средством контроля. Сегодня 100 %-ный радиографический контроль приме-

няется в основном для контроля объектов повышенной опасности, в частности, в атомной энергетике, самолетостроении, при строительстве нефте- и газопроводов. Однако желательно, чтобы достоверному 100 %-ному контролю качества подвергались бы и менее ответственные объекты.

Качество радиографического контроля зависит от многих факторов: энергии первичного излучения, рассеянного излучения, плотности и толщины просвечиваемого материала, формы и места расположения дефекта по толщине исследуемого материала, геометрических размеров источника ионизирующего излучения — фокусного пятна или активной части, размера поля облучения, фокусного расстояния между кассетой и объектом контроля, но в большей степени от качества радиографической пленки.

Выбор специалистом той или иной радиографической пленки определяется необходимостью получения рентгеновского снимка с определенной контрастностью и четкостью изображения. Контрастность пленки, ее чувствительность и гранулярность взаимосвязаны: высокочувствительные пленки имеют крупные зерна и низкий предел разрешения, а низкочувствительные — мелкие зерна и высокий предел разрешения. С экономической точки зрения желательно, чтобы время экспонирования было как можно короче, однако возможности использование высокочувствительной пленки ограничиваются ее зернистостью, которая в значительной мере определяет качество изображения мелких дефектов.

Фирма KODAK разработала высокочувствительную сенсibilизированную высокочувствительную, среднезернистую радиографическую пленку типа KODAK INDUSTREX CX. Эта пленка может использоваться как для экспонирования без экранов, так и с флуоресцентными или флуорометаллическими экранами.

На рис. 1 приведена характеристическая кривая пленки KODAK INDUSTREX CX, которая экспонировалась без экранов и прошла автоматическую химико-фотографическую обработку в реактивах KODAK INDUSTREX CX.

На рис. 2 приведены ориентированные номограммы для пленки KODAK INDUSTREX CX при экспонировании на рентгеновском аппарате непрерывного излучения без экранов и достижении плотности почернения 2Б для алюминия и стали. Фокусное расстояние составляло 1000 мм.

Безусловно, параметры экспозиции зависят от используемого оборудования и условий контроля.

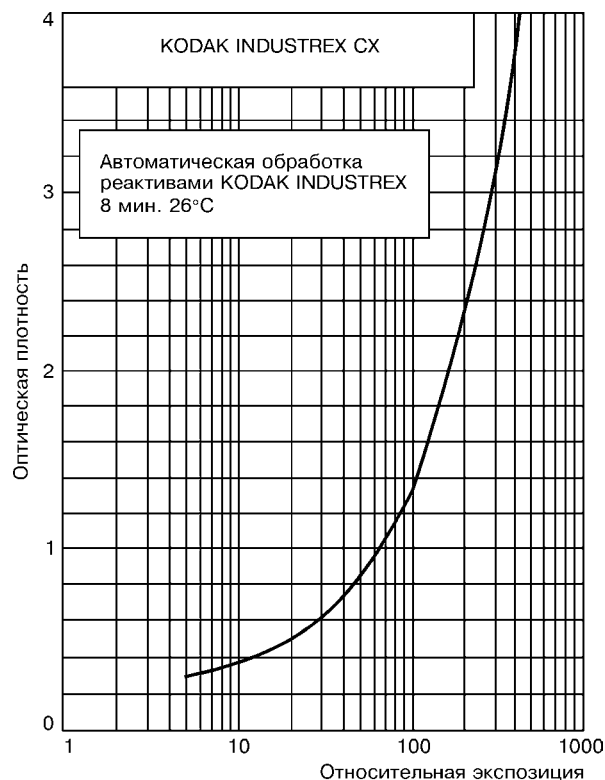


Рис. 1. Характеристическая кривая радиографической пленки типа CX

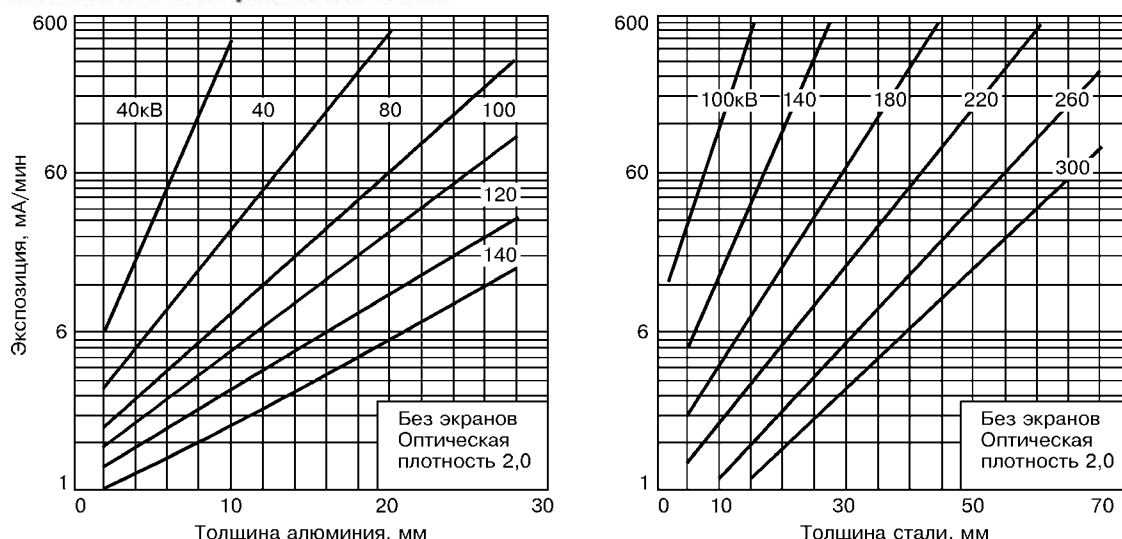


Рис. 2. Номограмма экспонирования для пленки KODAK INDUSTREX CX (рентгеновское излучение)

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины проведены исследования радиографической пленки типа CX и сравнение ее с другими типами пленок. Исследования показали, что радиографическая пленка типа CX для контроля изделий различных толщин из стали и алюминия с использованием рентгеновского аппарата непрерывного излучения РАП-150/300 и ручной химико-фотографической обработки в растворах KODAK INDUSTREX: проявителе Manual Developer и фиксаже Manual Fixer — и в отечественных растворах — проявителе «Рентген-2» и фиксаже БКФ-2 — показали, что по качеству пленка CX близка к радиографической пленке STRUCTURIX-D7 фирмы AGFA, но при этом время экспонирования при одних и тех же условиях контроля и обработки меньше примерно на 15...20 %, по сравнению с отечественной пленкой РТ-1 пленка CX значительно лучше по контрасту, разрешающей способности, радиографической чувствительности, а по времени экспозиции примерно на 30 % больше.

Экспозиции со свинцовыми экранами	Приблизительная экспозиция с флуорометаллическими экранами	
	рентгеновское излучение	^{192}Ir
30 с	2,5 с	7 с
60 с	5 с	15 с
5 мин	30 с	80 с
10 мин	80 с	180 с
20 мин	200 с	500 с
60 мин	—	40 мин

Радиографическая пленка INDUSTREX CX может использоваться с флуоресцентными или флуорометаллическими экранами. Такая комбинация пленка – экран эффективна при использовании в качестве источника ионизирующего излучения импульсных рентгеновских аппаратов. Особенно это важно в монтажных и полевых условиях, поскольку время экспонирования уменьшается примерно на порядок. В таблице приведены ориентировочные данные по экспонированию пленки CX со свинцовыми и флуорометаллическими экранами.

С радиографической пленкой CX (как и с любой другой пленкой) необходимо аккуратно обращаться, чтобы избежать физических дефектов, вызываемых давлением, короблением, продольным изгибом и трением. Пленку CX нельзя быстро вытягивать из картонной упаковки, кассеты или обращаться с пленкой способом, приводящим к воздействию на нее статического электричества. С упаковками, в которых пленки переложены бумагой, необходимо обращаться так же осторожно, как и с непереложенными бумагой. При обращении с рентгеновской пленкой важно соблюдать чистоту.

Радиографическая пленка KODAK INDUSTREX CX находит и будет находить еще более широкое применение в Украине для радиографического контроля при использовании рентгеновских аппаратов непрерывного и импульсного излучения, с металлическими экранами и с флуоресцентными или флуорометаллическими усиливающими экранами.