# ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА и Неразрушающий контроль

№ 2, 2007

Издается с января 1989 г.

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

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ Главный редактор Б.Е.ПАТОН

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

#### Адрес редакции

03680, Украина, г.Киев-150, ул.Боженко, 11 Институт электросварки им.Е.О.Патона НАН Украины Тел.: (044) 271-23-90, Факс: (044) 528-34-84, 529-26-23 E-mail: journal@paton.kiev.ua http://www.nas.gov.ua/pwj

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

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

Свидетельство о государственной регистрации КВ 4787 от 09.01.2001

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна

За содержание рекламных материалов редакция журнала ответственности не несет

Цена договорная

## СОДЕРЖАНИЕ ТЕХНИЧЕСКАЯ ЛИАГНОСТИКА

НЕДОСЕКА С. А. Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии	3
ГАРФ Э. Ф., ЮХИМЕЦ П. С., ПАЛИЕНКО В. П., СПИЦА Р. А., ВОРОШКО П. П.,	
КОБЕЛЬСКИЙ С. В., КРАВЧЕНКО В. И., РУБАН И. Г. Использование	
геоинформационной системы для оценки технического состояния и прог-	
нозирования остаточного ресурса трубопроводов	10
ВЕКСЛЕР Е. Я., ЗАПЛОТИНСКИЙ И. А., ЗАМЕКУЛА И. В., ТОЛСТОВ В. Ю.	
Техническое диагностирование трубной системы подогревателей	
высокого давления блоков мощностью 100300 МВт в процессе	
длительной эксплуатации	17
ВИТРУК Ю. В., ЕРЕМЕНКО В. С., ОВСЯНКИН А. М. Методика определения	
информативных признаков при многопараметровом неразрушаю-	
шем контроле	21

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

<i>ТРОИЦКИЙ В. А., РАДЬКО В. П., ЯРОВОЙ А. А., КОСТЕНКО Г. Е.,</i> <i>КРАВЧУК Л. Г., БОРОВСКОЙ Г. В.</i> УЗК сварных соединений толстостенных	
труб малого диаметра из аустенитных сталей с использованием	
раздельно-совмещенных преобразователей хордового типа	27
БЕЛЫЙ Н. Г., ДЕНБНОВЕЦКИЙ С. В., ЛЕЩИШИН А. В., МИХАЙЛОВ С. Р.,	
СЛОБОДЯН Н. В., ТРОИЦКИЙ В. А. Относительная чувствительность	
рентгенотелевизионных систем на основе высокочувствительных	
ПЗС-камер и рентгеновских монокристаллических экранов	34
ДАВЫДОВ Е. А. Экспериментальное измерение размеров трещиноподобных	
несплошностей с помощью волн дифракции	41
ГАМАЛИЙ В. Ф., СЕРЕБРЕННИКОВ С. В., ТРУШАКОВ Д. В. Математическое	
моделирование взаимодействия вихретокового преобразователя и ферро-	
магнитного образца с трещиной	44
СТОРОЖЕНКО В. А., МАЛИК С. Б. Экспресс-метод оценки теплопотерь	
в зданиях путем термографического обследования	49

## ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

## ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

Дванадцята Міжнародна науково-технічна конференція «Леотест-2007» в Славську	57
I Студентська науково-практична конференція «Неруйнівний контроль у	
промисловості і медицині»	59
Новости	62
Патенты в области технической диагностики и неразрушающего контроля	63
Поздравляем юбиляра!	65
По страницам журнала «Дефектоскопия» (РФ) за 2006 г.	67
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ представляет	68
НПФ «Специальные Научные Разработки» представляет	69

## ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

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

# TECHNICAL DIAGNOSTICS and NON-DESTRUCTIVE TESTING

# № 2, 2007

Founded in January, 1989

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

## EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief B. E. PATON

A. Ya. Nedoseka (vice-chief ed.), V. A. Troitsky (vice-chief ed.), Z. A. Maidan (exec. secr.), I. P. Belokur, Yu. K. Bondarenko, V. L. Vengrinovich, E. F. Garf, A. A. Gruzd, Yu. B. Drobot, V. I. Ivanov, O. M. Karpash, V. V. Klyuev, L. M. Lobanov, A. A. Lebedev, V. K. Lebedev, G. G. Lutsenko, N. V. Novikov, E. S. Pereverzev, P. P. Prokhorenko, V. P. Radko, I. Ya. Shevchenko, A. I. Stepanenko, V. A. Strizhalo, A. Ya. Teterko, V. N. Uchanin, A. F. 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.: (044) 271-23-90, Fax: (044) 528-34-84, 529-26-23 E-mail: journal@paton.kiev.ua ttp://www.nas.gov.ua/pwj

#### Scientific editors:

N. G. Bely, A. A. Gruzd

## Electron galley:

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

> State Registration Certificate KV 4787 of 09.01.2001

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

## CONTENTS

## **TECHNICAL DIAGNOSTICS**

NEDOSEKA S. A. Forecasting the fracture by the data of acoustic emission	. 3
GARF E. F., YUKHIMETS P. S., PALIENKO V. P., SPITSA R. A., VOROSHKO	
P. P., KOBELSKII S. V., KRAVCHENKO V. I., RUBAN I. G. Use of a geo-infor-	
mation system for evaluation of the technical condition and prediction of the	
residual life of pipelines	10
VEKSLER E. Ya., ZAPLOTINSKII I. A., ZAMEKULA I. V., TOLSTOV V. Yu. Tech-	
nical diagnostics of the piping of high-pressure heaters of 100300 mW	
blocks during long-term operation	17
VITRUK Yu. V., EREMENKO V. S., OVSYANKIN A. M. Procedure for determi-	
nation of information features in multiparametral NDT	21

## NONDESTRUCTIVE TESTING

TROITSKII V. A., RADKO V. P., YAROVOJ A. A., KOSTENKO G. E., KRAVC- HUK L. G., BOROVSKOJ G. V. UT of welded joints of thick-walled tubes of	
austenitic steels using chord-type TR transducers	27
BELY N. G., DENBNOVETSKII S. V., LESHCHISHIN A. V., MIKHAILOV S. R.,	
SLOBODYAN N. V., TROITSKII V. A. Relative sensitivity of X-ray TV systems	
based on high-sensitivity CCD-cameras and X-ray single-crystal shields	34
DAVYDOV E. A. Experimental measurement of dimensions of cracklike dis-	
continuities using diffracted waves	41
GAMALII V. F., SEREBRENNIKOV S. V., TRUSHAKOV D. V. Mathematical si-	
mulation of interaction of eddy current transducer and ferromagnetic sample	
with a crack	44
STOROZHENKO V. A., MALIK S. B. Express-method of evaluation of thermal	
losses in buildings by thermographic examination	49

## INDUSTRIAL

## NEWS AND INFORMATION

12th International Scientific-Technical Conference «Leotest-2007» in Slavsk	57
Ist Student Scientific-Practical Conference «Nondestructive Testing in Indust-	
ry and Medicine»	59
News	62
Patents on technical diagnostics and nondestructive testing	63
Jubilee greetings	65
On the pages of «Defectoscopia» journal	67
E. O. Paton Electric Welding Institute of NASU presents	68
RPC «Special Scientific Development» presents	69

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

## ПРОГНОЗ РАЗРУШЕНИЯ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

## С. А. НЕДОСЕКА

Рассмотрен подход к оценке состояния материала по данным АЭ-испытаний, основанный на представлении разрушения материала как результата накопления повреждений в процессе деформирования, а именно возникновения пор, их роста и слияния. Предлагается задачу прогноза разрушения начинать решать с установления связи между кинетикой повреждаемости материала и возникающей вследствие этого акустической эмиссией (АЭ). Сформулированы этапы решения задачи прогноза разрушения по данным АЭ. Построена и реализована на компьютере модель для получения типовых «портретов» АЭ в зависимости от формирования и развития разрушения для различных полей повреждений. Созданы эталоны разрушения, и с их использованием разработан и реализован в алгоритме для систем АЭ-диагностики ЕМА-3 метод прогноза разрушающей нагрузки.

An approach is considered to evaluation of the condition of material by the data of AE testing, based on presentation of material fracture as a result of damage accumulation during deformation, namely initiation of pores, their growth and coalescence. It is proposed to start solving the problem of fracture prediction from correlation of the kinetics of material damage and the resulting acoustic emission (AE). Stages of solving the problem of fracture prediction by AE data are defined.

Задача оценки фактического состояния металла действующих конструкций и прогноза разрушения по результатам неразрушающих испытаний является чрезвычайно актуальной. В данной работе для решения этой задачи выбран метод акустической эмиссии (АЭ), получивший широкое распространение при контроле состояния промышленных конструкций в связи с тем, что имеет ряд достоинств, таких как:

возможность получения данных от источника акустических сигналов (как правило, развивающегося дефекта) на большом удалении от датчика;

возможность локации местоположения источника несколькими датчиками;

возможность контроля крупногабаритных конструкций, в том числе покрытых изоляционным слоем;

возможность дистанционного управления контролем оборудования, работающего при высоких и криогенных температурах.

К особенностям метода относятся трудность расшифровки полученных данных и отсутствие единой метрологии для оборудования различных производителей. Поэтому интерпретация информации, полученной при испытаниях, как правило, тесно привязана к конкретному оборудованию и программному обеспечению, предназначенному для обработки полученных данных.

Следует отметить, что большинство работ, проводимых в области АЭ-контроля, относятся к выявлению дефектных мест. В случаях, когда обнаруженные источники АЭ представляются опасными (высокий уровень амплитуды, большое количество сигналов, нарастающий темп излучения), традиционной практикой является дополнительный контроль обнаруженных мест расположения дефектов при помощи УЗК или другими методами неразрушающего контроля, позволяющими оценить размеры найденного дефекта. Затем проводят расчет дефекта методами механики разрушения с расчетом коэффициента интенсивности напряжений (обычно К<sub>1</sub>). Сравнивая найденный коэффициент интенсивности с критическим  $(K_{1C})$ , получают критериальные данные для оценки состояния материала объекта контроля. Важным преимуществом такого способа оценки является подтверждение наличия дефекта различными методами. К недостаткам следует отнести следующие:

сложность согласования подходов к определению степени опасности обнаруженных дефектов, поскольку при оценке данных АЭ опасность связывают с развитием дефектов независимо от их формы, размера и ориентации, а для оценки методами механики разрушения важны именно указанные выше геометрические параметры;

сложность оценки погрешности расчетных методов механики разрушения, созданных для дефектов идеальной формы, в то время как реальные дефекты имеют обычно сложную форму и не всегда являются трещинами;

проблематичность оценки состояния объекта контроля в реальном времени, поскольку после обнаружения дефекта требуются дополнительные исследования и расчет.

Многие исследователи, включая автора данной статьи, проводили работы по изучению связи параметров АЭ с коэффициентом интенсивности напряжений. Было показано, что такая связь су-

© С. А. Недосека, 2007

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

ществует. В ряде работ предложены критерии разрушения, основанные на связи параметров акустических сигналов, в частности, амплитуды и других спектральных характеристик, с подрастанием трещин. Такой подход представляется весьма эффективным, поскольку теоретически позволяет оценивать состояние материала по данным АЭ в реальном времени. Тем не менее, ему также присущ ряд недостатков:

предлагаются методы оценки состояния металла с существующими трещинами, однако более важным с точки зрения эксплуатации реальных конструкций является недопущение трещин в материале и оценка состояния на более ранних стадиях развития разрушения;

использование амплитудных и других спектральных характеристик в качестве критериальных может дать серьезные погрешности, так как спектр сигнала АЭ, анализируемого на выходе акустико-эмиссионного оборудования, существенно зависит от сложной системы (объект-датчик-электронная часть-вычислительный тракт). Исследования показывают, в частности, существенное изменение параметров спектра и формы исходного сигнала АЭ в зависимости от толщины материала и свойств датчика;

сложность обоснования способов перехода от образца к конструкции. Взяв за эталон некие результаты АЭ-испытаний, полученные на образцах, очень сложно выделить из них ту информацию, которая относится собственно к материалу, а не ко всей системе нагружения. Еще более сложная задача — перейти от такого эталона к оценке конструкции, в которой отличаются условия нагружения, история нагружения, шумовой фон и присутствует влияние большого количества дополнительных эксплуатационных факторов.

Таким образом, методы оценки состояния материала по данным АЭ-испытаний существуют и широко используются на практике. Тем не менее, им присущ ряд недостатков, и актуальной является разработка новых подходов в данной области.

В работе рассмотрен один из таких подходов, основанный на представлении разрушения материала как результата накопления повреждений в процессе деформирования, а именно возникновения пор, их роста и слияния. Предлагается задачу прогноза разрушения по данным АЭ начинать решать с установления связи между кинетикой повреждаемости материала и возникающей вследствие этого АЭ.

Кинетический подход к моделированию развития разрушения. Как известно, импульсы АЭ возникают вследствие динамического, взрывного увеличения объема пустот в материале уже на самых ранних стадиях деформирования. Квантовая теория АЭ свидетельствует о том, что, несмотря на равномерный процесс деформирования, процесс образования пор происходит дискретно. С учетом принципа Сен-Венана логично предположить, что для изотропных материалов форма вновь образовавшихся пор должна быть близка к сферической, что подтверждается экспериментально [1]. В процессе деформирования материала происходит возникновение пор, их рост, слияние и, в конечном счете, формирование трещины. Высвобождение энергии при каждом таком событии происходит динамически, порождая АЭ. При этом амплитуда возникшей волны будет зависеть от вновь возникшего объема пустоты в материале.

Такой подход хорошо сочетается с известными кинетическими концепциями повреждаемости материала, изложенными в работах Ю. Н. Работнова, С. Д. Волкова, А. Гэрсона, Ф. Мак-Клинтока, Дж. Райса, Р. Трейси, Й. Мураками, В. Твергарда, О. Ричманда. Особо следует отметить исследования, выполненные академиком НАН Украины А. А. Лебедевым и д-ром техн. наук Н. Г. Чаусовым, в которых для экспериментального получения данных по кинетике накопления повреждений использован метод полных диаграмм деформирования. Изучен, в частности, и подтвержден металлографическими исследованиями механизм накопления повреждений на всех стадиях деформирования, включая развитие трещины. Показано, что кривая повреждаемости не является линейной, а носит S-образный характер. Результаты экспериментов убедительно показывают, что повреждение в металлах развивается путем роста и слияния пор с последующим образованием трещины [1-6].

Логично утверждать, что АЭ, возникая именно вследствие динамического слияния пор, качественно и количественно отражает процесс накопления повреждений и формирования разрушения. Следовательно, сопоставив эти два процесса, можно разработать метод определения текущего состояния материала и прогноза его разрушения.

На основе изложенного выше, сформулируем этапы решения задачи прогноза разрушения по данным АЭ:

получение экспериментальных данных о связи повреждаемости материала с его акустическими параметрами;

построение кинетической модели накопления повреждений в материале путем роста и динамического слияния пор;

уточнение кинетической модели накопления повреждений на основе экспериментальных данных;

построение модели возникновения АЭ в материале вследствие роста и слияния пор;

уточнение модели возникновения АЭ на основе аналитического расчета параметров волн;

## - ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

численное моделирование АЭ, возникающей в материале при различных условиях формирования повреждений;

создание базы эталонов АЭ для различных условий формирования повреждений и при различных уровнях деформации;

построение итерационного алгоритма распознавания образа для сравнения реальных данных АЭ с эталонами;

определение вероятного значения локальной деформации в области зарегистрированного источника АЭ на основе наиболее соответствующего эталона;

определение вероятного значения локальной деформации, при которой произойдет разрушение в области зарегистрированного источника АЭ.

Таким образом, необходимо построить модель, которая дает возможность получать типовые «портреты» АЭ в зависимости от формирования и развития разрушения для различных полей повреждений. Модель должна опираться на экспериментальные данные, но при этом иметь возможность задавать разные условия по первоначальной пористости, характеру формирования разрушения, учитывать влияние концентрации напряжений и другие факторы, определяющие характер развития повреждений в материале. Для получения такого объема данных модель должна быть реализована на компьютере.

Феноменологическая модель накопления повреждений и развития разрушения. Некоторые экспериментальные данные о связи повреждаемости материала с его акустическими параметрами, полученные с участием автора, приведены в работах [3-8]. При их получении пользовались АЭ-оборудованием ЕМА-2 и ЕМА-3. Один из датчиков АЭ использовали в качестве излучателя, один или несколько в качестве приемников сигнала. Для достаточно широкого класса металлических материалов на большом количестве образцов (более 300) было показано, что параметры акустических сигналов после прохождения через материал с повреждениями претерпевают существенные изменения. В частности, по мере роста повреждаемости амплитуда принятых сигналов падает, время нарастания сигнала до максимума увеличивается. Кривые зависимости указанных акустических параметров от деформации повторяют S-образную кривую накопления повреждений, полученную при механических испытаниях образцов. Результаты получены как при стандартных испытаниях на статическую прочность, так и на усталость, а также с учетом влияния ударных нагрузок. Данные акустических исследований подтверждены прямым методом взвешивания проб металла в жидкости [4], испытаниями на ударную вязкость. Установлена количественная корреляция поврежденности, определенной методом акустического прозвучивания проб металла, с определенной при механических испытаниях указанных выше проб методом микротвердости [8].

В качестве параметра, позволяющего оценить степень поврежденности материала в процессе наработки, предложена характеристика, имеющая смысл скорости нарастания акустического сигнала до максимума  $V_i = A_i/R_i$ , где A — амплитуда выходного сигнала; R — время нарастания выходного сигнала до максимума; i = 1...3 — направления прозвучивания [3, 4, 9, 10]. Сформулирован критерий оценки опасности накопленных в металле повреждений в виде:

$$\Delta W_{\rm cp} = 1 - \frac{V_{\rm nobp}}{V_{\rm ucx}},\tag{1}$$

где  $V_{\text{исх}}$  — значение параметра V для исходного материала,  $V_{\text{повр}}$  — для поврежденного.

Для моделирования процесса накопления повреждений предложена феноменологическая зависимость:

$$V = V_0 + n\varepsilon^{1/n} + m(1 - (1 + \varepsilon)^{1/n}),$$
(2)

где V — объем накопленных в материале повреждений;  $V_0$  — начальный объем повреждений;  $\varepsilon$  — деформация; n и m — экспериментальные константы.

Проведенные численные эксперименты показали, что, используя указанную зависимость, можно с достаточно высокой точностью рассчитывать реальный объем пор в материале, приняв  $n = NV_{\rm cp}$ , где N — количество пор в материале;  $V_{\rm cp}$ — объем среднестатистической поры.

Феноменологическая модель основана на предположении, что при деформировании в материале вначале происходит накопление повреждений, затем наступает стадия их роста, а на заключительных стадиях деформирования происходит интенсивное слияние пор, что соответствует трем участкам *S*-образной кривой [6].

Реализация и проверка модели накопления повреждений. Справедливость феноменологической модели подтверждена численным моделированием роста пор на компьютере следующим образом: задав количество, расположение и первоначальный объем пор, имеющих сферическую форму, в произвольном образце материала с известными механическими свойствами, а затем их пошаговый рост в зависимости от деформации, получим фактическое значение повреждаемости на различных стадиях деформирования.

Такая модель реализована на компьютере с использованием объектного подхода [11]. Программа позволяет задавать разнообразные условия расположения пор и накопления поврежденности в ГЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА —



Рис. 1. Средняя поврежденность материала в процессе роста 20 пор и изменения параметров акустических сигналов в трех направлениях прозвучивания (модель)

динамике. Дополнительным подтверждением достоверности модели накопления повреждений служит также решение на компьютере обратной задачи. С использованием способа моделирования роста поврежденности покажем, что параметры акустических сигналов, проходящих через материал, меняются таким же образом, как в физическом эксперименте.

Построим физическую модель прохождения звука через среду с повреждениями. Будем считать, что уменьшение амплитуды первоначального сигнала и увеличение времени его нарастания до максимума пропорциональны отношению площади проекций пор на сечение материала в направлении прозвучивания к площади сечения материала, перпендикулярной направлению прозвучивания:

$$\Delta A_i = f_{\rm A}(F_{\rm nobp}/F_{\rm M}), \quad \Delta R_i = f_{\rm R}(F_{\rm M}/F_{\rm nobp}), \qquad (3)$$

где  $F_{\text{повр}}$  — площадь проекций пор на плоскость, перпендикулярную направлению прозвучивания;  $F_{\text{м}}$  — площадь сечения мтериала в направлении прозвучивания.

Для восстановления кривой повреждаемости по изменению акустических сигналов воспользуемся уравнением (1).

По результатам работы моделирующей программы построим графики, показывающие кинетику накопления повреждений и связанные с ней изменения параметров акустических сигналов. Зададим для простоты функции  $f_A$  и  $f_R$  линейными.

Рис. 1 и 2 показывают, что предложенная модель хорошо описывает процесс накопления повреждений в материале в виде *S*-образной кривой. Еще одним важным моментом является то, что данная модель подтверждает возможность оценивать объемную поврежденность материала прозвучиванием в трех направлениях. Для проверки работоспособности модели были проведены многочисленные опыты по прозвучиванию (на нескольких сотнях образцов).

Приведем в качестве примера сопоставление расчета, проведенного с использованием модели,



Рис. 2. Средняя поврежденность материала в процессе роста пор и сопоставление ее с расчетным и действительным объемом пор (модель)

и результатов прозвучивания линейного образца из сплава АМГ6. Образец нагружали с помощью стандартной разрывной машины. Подняв нагрузку до определенной величины, испытание останавливали и проводили прозвучивание образца. Затем нагружали далее, повторяя процедуру прозвучивания для различных стадий нагружения, до момента старта трещины включительно. Задав в численном эксперименте геометрические размеры рабочей части образца и параметры нагружения, получили аналогичную картину повреждаемости, соответствующую по численным показателям изменению параметров акустических сигналов и расчетной поврежденности (рис. 3). Аппроксимировав *S*-образные кривые линейными функциями, получили разброс коэффициентов, не превышающий 3 %, что свидетельствует о достаточно хорошей корреляции экспериментальных и модельных данных.

Убедившись в том, что предложенная модель накопления повреждений имеет хорошее экспериментальное подтверждение, ее использовали в качестве базовой для реализации следующего этапа решения задачи прогноза разрушения — создания модели АЭ.

Модель АЭ. Физическую модель АЭ строили в предположении, что амплитуда возникающих сигналов пропорциональна объему вновь возникших в материале пустот. Программный интерфейс, созданный для реализации модели, позволяет имитировать возникновение АЭ от любого из трех факторов — возникновения пор, роста и слияния или произвольной их комбинации. Сопоставление модельных данных с экспериментальными позволило определить, что наибольшее соответствие моделируемой АЭ эксперименту достигается тогда, когда присутствуют только два из названных факторов — возникновение пор и их слияние. Это позволяет говорить о том, что, вероятно, рост пор происходит достаточно плавно и не является источником АЭ в диапазоне чувствительности АЭ-аппаратуры. Уточнение амплитудных характеристик, закладываемых в модель, проводят на основе решения аналитических



*Рис. 3.* Экспериментальные (*a*) и модельные (б) кривые изменения акустических параметров в процессе нагружения образца из сплава АМГ6 и аппроксимация прямыми поврежденности, определенной экспериментально (*в*) и при помощи модели (*г*)

задач о волновых процессах. Соответствующий математический аппарат и его программная реализация представлены в работах [12–14]. В результате в уравнения для вычисления амплитуд сигналов АЭ, возникающих вследствие образования новых пустот в материале, закладывают адекватные коэффициенты.

Модель позволяет задавать конкретные координаты и размеры для каждой поры, или же программно размещать их равномерно, случайным образом или в соответствии с нормальным законом распределения.

Был проделан большой объем численных экспериментов для получения эталонных характеристик разрушения при различном размещении пор для широкого спектра условий накопления



Рис. 4. Окно программы для моделирования роста пор и АЭ

повреждений. Разработанная модель позволила получить эталоны АЭ, которые являются достаточно абстрактными, не привязанными к конкретному материалу или виду нагружения. Прежде чем приступить к решению задачи прогноза, следовало провести калибровку эталонов, полученных при моделировании. Работа в данном направлении показала, что эталоны достаточно пригодны для различных классов металлических материалов и лишь в отдельных случаях требуют незначительной коррекции при помощи экспериментально определяемых коэффициентов. Калибровка эталонов применительно к конкретному типу АЭ-системы проведена путем учета характеристик датчиков при расчете волновых процессов.

**Прогноз разрушающей нагрузки**. Первоочередной целью построения алгоритма прогноза являлся выбор параметра, который следует прогнозировать. Исходя из практического опыта АЭ-испытаний конструкций в промышленных условиях, в качестве такого параметра выбрали разрушающую нагрузку. Учитывая известную связь между нагрузкой и деформацией в виде диаграммы деформирования, можно достаточно эффективно прогнозировать разрушающую нагрузку, если известна разрушающая деформация.

Методика прогноза построена на распознавании образа с применением так называемых учителя и самообучения. Распознавание происходит в реальном времени. Важно отметить следующее: прогноз разрушающей нагрузки невозможен без

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

знания текущего значения нагрузки, поскольку эталоны повреждаемости, используемые для распознавания, имеют привязку к деформации (и соответственно к нагрузке), при которой эта повреждаемость сформировалась. В частности, для сосудов, труб и резервуаров имеет смысл прогнозировать разрушающее значение давления, поскольку в условиях производства часто рабочее давление является единственным известным параметром, а другие, как правило, не измеряют.

Распознаванию подлежит массив данных, представляющих собой вектор с координатами

$$\{T_{\rm np}, A_{\rm np}, E_{\rm np}\},\tag{4}$$

где  $T_{\rm np}$  — время протекания процесса;  $A_{\rm np}$  — обобщенная характеристика сигналов АЭ;  $E_{\rm np}$  — приращение деформации. Приведенные значения параметров представляют собой относительные безразмерные величины в пределах 0...1.

Распознавание начинается с момента получения в процессе испытаний минимального достаточного количества обобщенных характеристик реальных сигналов АЭ. Полученные данные приводят к виду (4). Затем происходит их сравнение с эталонами. Получив с заданной степенью вероятности совпадение с некоторым эталоном по выбранным признакам, предполагают, что в данный момент его локальная деформация в области возникновения АЭ (определяющая состояние материала) соответствует тому проценту от разрушающей деформации  $C_{\%}$ , при котором сформирован эталон.

Таким образом, для получения прогнозной нагрузки следует выполнить простую операцию:

$$P_{\text{прогн}} = P(\varepsilon_{\text{тек}})/C_{\%} = f(P_{\text{тек}})/C_{\%}, \qquad (5)$$

где  $P_{\text{прогн}}$  — прогнозируемая разрушающая нагрузка;  $P(\varepsilon_{\text{тек}})$  — текущая локальная нагрузка, связанная с текущей локальной деформацией через диаграмму деформирования;  $f(P_{\text{тек}})$  — текущая локальная нагрузка, определенная по измеренной нагрузке, пересчитанной в локальную деформацию через диаграмму деформирования.

Следует отметить, что при работе металла в упругой области выражение (5) упрощается и становится обычной линейной зависимостью  $P_{\text{прогн}} = P_{\text{тек}}/C_{\%}$ .

Работа алгоритма распознавания усложняется, если следующий наиболее подходящий эталон не относится к тому же типу разрушения, что и предыдущий. В этом случае подключается система самообучения, и на базе существующих эталонов строятся новые. Распознавание представляет собой достаточно трудоемкий процесс с большим количеством итераций. Однако неоспоримым преимуществом метода перед расчетными является то, что он не базируется на прочностных теориях, не оперирует геометрическими параметрами дефекта и механическими характеристиками материала. Таким образом, исключаются ошибки, которые могут повлиять существенным образом на точность расчета.

Остановимся подробнее на самой методике распознавания. Она базируется на вполне стандартных подходах, изложенных, в частности, в монографии проф. А. Я. Недосеки [12]. Основными задачами являются выбор классификационных признаков и методов сравнения одних классов с другими. В настоящей работе в качестве классификационного признака использовали центр тяжести фигуры, полученной путем определенных преобразований вектора  $\{T_{np}, A_{np}, E_{np}\}$ . В частности, амплитудно-временное распределение подвергали смещению амплитуд по временной шкале для приведения его к равномерному по времени, и соответственно изменению величины амплитуды в зависимости от направления смещения. Затем данные приводили к безразмерному виду, достигая таким образом необходимого уровня абстракции эталона и независимости его от условий конкретного эксперимента.

Данные, полученные в процессе АЭ-испытаний, преобразовывали аналогичным образом, а затем проводили сравнение с эталоном и определяли прогнозную разрушающую нагрузку. Приведенная методика была апробирована в системе АЭ-контроля ЕМА-3 в качестве так называемого J-алгоритма. В результате обработки более 200 результатов экспериментальных данных (на образцах и натурных объектах) были получены удовлетворительные результаты прогноза. Точность прогноза достаточно высокая, ошибка не превышает 15 % с вероятностью 0,95, что подтверждено ЦСМ Госпотребстандарта Украины. В настоящий момент системы ЕМА-3 в такой комплектации используются на ряде промышленных предприятий Украины, в частности, при контроле четырех хранилищ аммиака на Одесском припортовом заводе.

Следует также отметить, что на сегодня метод прогноза разрушающей нагрузки прошел необходимое тестирование только в составе системы АЭдиагностики ЕМА-3. Для его адаптации к другим существующим АЭ-системам требуется проведение дополнительных исследований, и, возможно, определенная коррекция.

## Выводы

Сформулированы этапы решения задачи прогноза разрушения по данным АЭ.

На основе экспериментальных данных, устанавливающих связь кинетики накопления повреждений с прохождением акустических сигналов через материал, создана и реализована на компьютере математическая модель накопления поврежде-

#### ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

ний, реализующая акустический критерий и метод количественной оценки объемной поврежденности металлов.

Разработана, экспериментально подтверждена и реализована на компьютере математическая модель связи АЭ с процессом накопления повреждений в материале. Показано, что АЭ в пластичных материалах при деформировании вызвана возникновением и слиянием пор.

На основе математических моделей созданы эталоны разрушения, и с их использованием разработан метод прогноза разрушающей нагрузки.

Метод прогноза разрушающей нагрузки реализован в алгоритме для систем АЭ-диагностики EMA-3.

- 1. Чаусов Н. Г. Кинетика разрушения металлов на заключительных стадиях деформирования: Автореф. дис. ...дра техн. наук. — Киев: Ин-т проблем прочности, 1992. — 23 с.
- Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. Экспресс-метод оценки трещиностойкости конструкционных материалов: Препр. 3-88 / ИПП АН УССР. — Киев, 1988. — 53 с.
- 3. *Модель* накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов, С. А. Недосека, И. О. Богинич // Пробл. прочности. 1995. № 7. С. 31–40.
- Комплексная оценка поврежденности материала при пластическом деформировании / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов, И. О. Богинич, С. А. Недосека // Там же. — 1996. — № 5. — С. 23–30.
- 5. *Недосека С. А.* Исследование кинетики разрушения металлов на заключительных стадиях деформирования ме-

МГП «Индпром», Киев тодом акустической эмиссии: Автореф. дис. ... канд. техн. — Киев: Ин-т проблем прочности, 1994. — 16 с.

- 6. *Недосека С. А., Богинич И. О.* Применение аппаратуры «ЕМА» для оценки поврежденности стали 20 акустическим методом // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1995. — № 1. — С. 66–69.
- 7. Чаусов Н. Г., Недосека С. А., Пилипенко А. П. Комплексная оценка поврежденности пластичных материалов при различных режимах нагружения // Там же. — 2004. — № 3. — С. 16–21.
- Контроль текущего состояния металла труб действующих газопроводов. Метод исследования и результаты / А. А. Лебедев, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек, С. А. Недосека // Пробл. прочности. — 2003. — № 2. — С. 29–36.
- Оценка поврежденности металла действующих газопроводов методом АЭ-сканирования / А. А. Лебедев, А. Я. Недосека, Н. Г. Чаусов, С. А. Недосека // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 1. — С. 8–12.
- Оценка состояния металла труб после длительной эксплуатации в системе магистральных газопроводов / А. А. Лебедев, С. А. Недосека, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек // Там же. — 2003. — № 2. — С. 3–8.
- Недосека С. А. Объектный подход к решению задач механики несплошной среды и прогнозированию состояния материалов // Там же. — 1998. — № 1. — С. 13–21.
- Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Индпром, 2001. — 815 с.
- Недосека А. Я., Недосека С. А., Олейник Р. А. Распространение волн акустической эмиссии в пластинах от действия локального источника излучения // Техн. диагностика и неразруш. контроль. 2001. № 3. С. 3–10.
- Недосека А. Я., Недосека С. А., Волошкевич И. Г. Волны деформаций, возникающие при локальной перестройке структуры материалов // Там же. — 2004. — № 3. — С. 8–15.

Поступила в редакцию 20.03.2007

## СИ «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Сигнальная информация (СИ) «Сварка и родственные технологии» содержит оперативную информацию на языке оригинала и в русском переводе оглавлений научно-технических журналов, монографий, сборников, трудов конференций, названий переводов статей, перечней документов Международного института сварки и других отечественных и зарубежных информационных материалов из более чем 100 периодических изданий 52 стран мира.

Сигнальная информация (СИ) «Сварка и родственные технологии» издается научно-технической библиотекой Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины с 1995 года. Периодичность 6 номеров в год. С 2005 года СИ выпускается и рассылается в электронном варианте.

Сигнальная информация «Сварка и родственные технологии» предназначена для научных работников и инженеров, профессорско-преподавательского состава, аспирантов и специалистов сварочного производства.

Местом хранения оригиналов всех изданий, представленных в выпусках СИ, является научнотехническая библиотека Института электросварки. С материалами можно ознакомиться в читальном зале библиотеки или заказать ксерокопии отдельных статей, переводов, документов и т. п.

Для заказа определенного документа достаточно указать только регистрационный номер материала, который находится в конце каждого описания. Например: СИ. 06.01.10.

> По вопросам подписки и условиям выполнения заказов обращаться по адресу: 03680, ГСП, Киев-150, ул. Боженко, 11. Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины Научно-техническая библиотека. Факс: (044) 5280486; справки по телефону: 287-07-77. E-mail: library@paton.kiev.ua

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДОВ

## Э. Ф. ГАРФ, П. С. ЮХИМЕЦ, В. П. ПАЛИЕНКО, Р. А. СПИЦА П. П. ВОРОШКО, С. В. КОБЕЛЬСКИЙ, В. И. КРАВЧЕНКО, И. Г. РУБАН

Принципиальная схема геоинформационной системы (ГИС) включает базу данных о состоянии участков трубопроводов и аналитический блок для принятия соответствующих решений. Отличительными особенностями ГИС является возможность оценки опасностей и риска аварий трубопровода с учетом прогнозирования остаточного ресурса на основе статистической обработки результатов обследования в шурфах, оценки динамики приповерхностной части литосферы в районах пролегания трубопроводов, определения напряженно-деформированного состояния (НДС) типовых элементов трубопроводов методом конечных элементов, в том числе при наличии поверхностных нетрещиноподобных дефектов.

Block-diagram of geoinformation system (GIS) includes a data base on the condition of pipeline sections and an analytical block for taking appropriate decisions. GIS features include the ability of evaluation of the hazards and risk of pipeline failure, allowing for residual life prediction based on statistical processing of the prospect-hole examination results, evaluation of the dynamics of subsurface part of the lithosphere in regions of pipeline location, determination of SSS of typical pipeline elements by FEM method, also in the presence of surface not cracklike defects.

Главной и первостепенной задачей трубопроводной компании является обеспечение безопасности и надежной работы трубопроводов при минимальных затратах на поддержание их жизненного цикла, что может быть достигнуто при использовании современных подходов к их эксплуатации.

Управление трубопроводными системами связано со сбором, обработкой, распределением и хранением разнообразной технической, оперативно-распорядительной, финансовой и т. д. информации, служащей базисом для решения различных задач — контроля качества работ, эксплуатации систем и мониторинга их технического состояния, формирования технических паспортов объектов трубопроводных систем, выпуска документации, управления имущественным хозяйством и др. [1]. Значительная часть данных, использующихся в процессе проектирования, строительства и эксплуатации трубопроводных систем, имеет пространственную компоненту, характеризирующую объекты и явления окружающей среды с точки зрения их географического размещения, вследствие чего организация эффективной взаимосвязи между данными различных типов и оперирование ими осуществляется на основе использования геоинформационных технологий.

Геоинформационные технологии являются важным звеном современных исследований на этапах проектирования, строительства и эксплуатации народнохозяйственных объектов различного назначения. Реализованные в современных ГИС возможности факторного и комплексного моделирования пространственных объектов и явлений, исследования их статических и динамических характеристик позволяет рассматривать их как универсальные средства анализа и синтеза пространственных данных.

В современном понимании ГИС — это информационная система, обеспечивающая сбор, хранение, обработку, доступ, отображение и распространение пространственно-координированных данных. Она содержит данные о пространственных объектах в форме их цифровых представлений (векторных, растровых, квадротомических и иных), включает соответствующий задачам набор функциональных возможностей, в которых реализуются операции геоинформационных технологий, поддерживаемых программным, аппаратным, информационным, нормативно-правовым, кадровым и организационным обеспечением.

Актуальным направлением развития современных ГИС является создание эффективных систем не только сбора, но и анализа данных. Именно на решение задачи создания экспертной ГИС оценки технического состояния трубопроводов и прогнозирования их остаточного ресурса ориентирована данная работа.

Одной из основных причин сложившейся в последние годы тенденции роста отказов и крупных аварий трубопроводов является фактический срок их эксплуатации. По данным работы [2] доля газопроводов РФ, эксплуатируемых 10...20 лет,

<sup>©</sup> Э. Ф. Гарф, П. С. Юхимец, В. П. Палиенко, Р. А. Спица, П. П. Ворошко, С. В. Кобельский, В. И. Кравченко, И. Г. Рубан, 2007

составляет 38, более 25 лет — 25, свыше 30 лет — 6 %. Можно с уверенностью утверждать, что количество трубопроводов Украины, исчерпавших нормативный ресурс или приближающихся к этому, также значительно. С увеличением срока эксплуатации трубопровода при определенных условиях под действием термических и механических нагрузок, влияния окружающей среды происходят коррозионные и эрозионно-коррозионные процессы, а также насыщение металла новыми химическими элементами, что ведет к развитию дефектов, которые вначале эксплуатации не имели критических размеров. Возрастает вероятность повреждения отдельных участков трубопроводов, связанных с их выпучиванием и образованием гофров, увеличением напряжений из-за сдвигов грунта, механических повреждений. Поэтому принятие решений о возможности продления сроков эксплуатации должно осуществляться дифференцированно с учетом особенностей эксплуатации каждого отдельного участка и его технического состояния. Это обстоятельство, а также переход от традиционного регламентного ремонтно-технического обслуживания трубопроводов к эксплуатации по техническому состоянию предопределило принципиальную схему ГИС, которая включает базу данных о состоянии участков трубопроводов и аналитический блок для принятия соответствующих решений.

Для создания ГИС оценки технического состояния трубопроводов в качестве базового использован программный продукт корпорации MapInfo версии 6.0, относящийся к настольным ГИС-пакетам. К его преимуществам относится относительно небольшая стоимость, нетребовательность к аппаратным ресурсам, простота в использовании.

Формирование базы данных ГИС трубопроводной компании, предназначенной для хранения всех доступных на текущий момент данных о ее трубопроводах, включая сведения о пересечениях, раскладке труб, типах грунтов, потенциалов электрохимзащиты, состоянии изоляционного покрытия, обнаруженных дефектах, использованной трубопроводной арматуре, рабочих параметрах, топографические карты коридоров трубопроводов и др. осуществляется на основе сведений, полученных из технической документации и при обследованиях трубопроводов. Объем информации, собираемый на трубопроводе, определяется согласно работе [3] с учетом нормативных требований [4], что создает предпосылки для ее интеграции с существующими ГИС.

В соответствии с Инструкцией диагностирование и оценка технического состояния трубопроводов осуществляется в следующей последовательности:

анализ технической документации;

уточнение прохождения трассы трубопровода, изучение особенностей местности по трассе трубопровода и определение состояния изоляционного покрытия приборным надтрассовым методом;

составление индивидуальной программы технического диагностирования трубопровода с учетом наличия зон возможного коррозионного износа и трещинообразования, а также результатов проверки состояния изоляционного покрытия; наружный осмотр трубопровода в шурфах и измерения; расчет трубопровода на статическую прочность и прогнозирование остаточного ресурса.

Объем информации базы данных структурирован:

общетехническая и эксплуатационная информация о трубопроводе;

надповерхностные информационные и измерительные объекты трубопровода;

технологические элементы трубопровода;

пересечения трубопровода;

результаты обследований в шурфах.

Для сбора данных используются таблицы (например, табл. 1).

Интерфейс базы данных предоставляет пользователю возможности просматривать данные различного типа, выполнять запросы, редактировать существующие данные.

Учитывая географические аспекты особенностей трубопроводов, в систему включено геодезическое позиционирование объектов. В итоге комплексное использование результатов обследований и технической документации осуществляется на основе арбитражных координат спутниковой навигационной системы глобального позиционирования (GPS), обеспечивающих конвергенцию методов обследования, использующих различные физические методы и способы координатной привязки.

Ядром аналитического блока является модель оценки относительного риска, в соответствие с которой [5]:

данных по ооъекту «Свеча»	
Группа точки	
Индекс точки	
КМ по участку трубопровода	
Тип	
Высота (см)	
Технологический номер	
Диаметр 🗙 толщина стенки	
Дата установки	
Дата последних регламентных работ	
Состояние	
Чертеж	
Фотография	

Таблица 1. Информационные данные, вносимые в базу данных по объекту «Свеча»



1	Габлица	2.	. Категории	последствий ав	арий

Категория ава- рийного участка трубопровода	Степень потерь, ущерба
III	Значительная
II	Весьма значительная
Ι	Тяжелая
В	Очень тяжелая

Риск аварии = Последствия × Вероятность. (1)

Степень потерь вследствие аварии на участке трубопровода поставлена в прямую зависимость от его категории согласно работе [6] (табл. 2). При этом оценка угрозы аварии вследствие воздействия какого-либо фактора риска проводится согласно табл. 3 [7].

Ранжирование рисков осуществляется с помощью матрицы 4×4 (табл. 4).

Определение технического состояния участка трубопровода проводится по следующим основным критериям, данные о которых накапливаются в результате проведения периодических обследований:

А<sub>1</sub> — герметичность трубопровода;

*A*<sub>2</sub> — состояние изоляционного покрытия;

 $A_3$  — коррозионное состояние наружной металлической поверхности трубопровода (остаточный ресурс);

*А*<sub>4</sub> — качество сварных швов;

*A*<sub>5</sub> — опасность коррозии трубопровода блуждающими токами;

*A*<sub>6</sub> — наличие или отсутствие эрозионнохимической защиты (ЭХЗ);

 $A_7$  — наличие зон потенциального эрозионнокоррозионного износа (ЭКИ);

*A*<sub>8</sub> — коррозионная агрессивность грунта;

*А*<sub>9</sub> — геодинамическая устойчивость;

*A*<sub>10</sub> — глубина заложения трубопровода.

Оценка риска выполняется по каждому из десяти критериев раздельно. Затем определяется суммарный риск аварии на участке S<sub>т</sub> посредством суммирования оценок риска данного участка по всем десяти критериям — для этого каждой степени риска присваивается соответствующий балл:

$$S_{\rm T} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 + A_8 + A_9 + A_{10}$$
(2)

где  $A_1, A_2, ..., A_{10}$  — балльная оценка степени риска аварии элемента трубопровода по соответствующему критерию.

При анализе рисков учитываются обе оценки (рис. 1). Снижение высокой степени риска по отдельным критериям проводится в первую очередь, что одновременно снижает суммарные оценки на данных участках. При этом в случае равенства степени риска по данному критерию в первую очередь

#### Таблица З. Матрица вероятностей аварий

Вероятность	Описание
Низкая	По существу невозможная
Средняя	Потенциально возможная
Высокая	Возможна в период эксплуатации
Очень высокая	Событие могло бы произойти, если бы обо-
	рудование эксплуатировалось несколькими
	годами больше

Т	aб	ли	пa	4.	Мат	рица	ранжи	рования	риское
	av		ца		111611	рица	pannin	popannin	phenot

	Последствия						
Вероятность	Значитель- ные	Весьма значитель- ные	Тяжелые	Очень тяжелые			
Низкая	1	1	2	3			
Средняя	1	2	3	3			
Высокая	2	3	3	4			
Очень высокая	3	3	4	4			

снижение опасности аварии проводят на участках с большей суммарной оценкой. Кроме того, особое внимание должно быть обращено на участки с высокой суммарной оценкой S<sub>т</sub>.

Как результат работы блока появляется возможность разрабатывать рекомендации для составления плана ремонта трубопровода, создавать коррозионные карты его участков, определять допускаемое давление с учетом имеющихся ограничений со стороны обнаруженных дефектов.

Одним из ключевых критериев оценки риска является остаточный ресурс. Расчет остаточного ресурса основывается на статистической обработке данных периодических обследований трубопровода в шурфах [3, 8].

Целью статистической обработки является определение параметров функции распределения толщины стенки и оценка с требуемой достоверностью максимальной глубины коррозии стенок при минимальном объеме измерений в шурфах.

Прогнозирование остаточного ресурса линейной части трубопровода проводится на основании динамики изменения толщины стенки трубопровода до минимально допустимого размера с использованием результатов статистической обработки данных толщинометрии.

Прогнозируемый ресурс линейной части трубопровода т<sub>пр</sub> оценивается по формуле [9]:

$$\tau_{\rm np} = \frac{S_{\rm cp\ min}^{\nu} - S_{\rm pac4}}{V}, \ {\rm net},$$

где  $S_{cp\,min}^{\nu}$  и V — вероятное минимальное среднее значение толщины стенки трубопровода (мм) и скорость коррозии (мм/год) соответственно;  $S_{pacy}$  — расчетная толщина стенки трубопровода.





Рис. 1. Оценка риска аварии на участке трубопровода



Рис. 2. Предельные размеры дефектов, не снижающие несущую способность трубы: 1 — теоретические значения предельных размеров дефекта; 2 — зависимость, предлагаемая для расчета

На основании вычисленного остаточного ресурса осуществляется оценка вероятности возникновения аварии трубопровода (табл. 5).

Такой подход к оценке остаточного ресурса трубопровода можно рассматривать как альтернативный или дополняющий обследования с внутритрубных помощью снарядов, так как подробная информация геометрии 0 (толщинометрия, гофры, овальность и т. д.), получаемая при внутритрубных обследованиях, должна быть дополнена сведениями о реальном состоянии металла, локальных напряжениях, наличии поверхностных трещин.

В случае обнаружения на поверхности элемента трубопровода (участка линейной части, гиба или тройника) дефекта коррозионного происхождения проводится расчетное определение степени его опасности с позиций статической и циклической прочности.

В основе статического расчета лежит гипотеза, сог-

ласно которой влияние поверхностного коррозионного дефекта на прочность трубопровода аналогично влиянию одиночного сквозного отверстия. Приведение дефекта к одиночному сквозному отверстию осуществляется через его площадь, определяемую по сечению вдоль оси трубопровода, поскольку несущая способность трубопровода определяется кольцевыми напряжениями (рис. 2).

Расчет при циклическом нагружении основывается (наряду с эксплуатационной нагруженностью и циклическими свойствами материала) на данных о его НДС, в первую очередь, в зонах концентрации напряжений.

Таблица 5. Оценка вероятности аварий трубопровода в зависимости от остаточного ресурса

Остаточный ресурс, лет	Вероятность аварии
> 30	По существу невозможна
2030	Потенциально возможна
1020	Возможна в период эксплуатации
< 10	Могла бы произойти, если бы оборудование экс- плуатировалось несколькими годами больше

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА -

			БИБ	тоип	EKA (	DEPER	TOB	ļ.				
OBBEKT	TPV	БA	шту	LEP.	ДЕФ	EKT	•	0	Удл	Vron	N_бол	тов
		поверхность										
	BHT	нар	BHT	нар	BHT	нар						
тройник	cyl	cyl	cyl	cyl	-	-	х	-	•	90	•	- 2
тройник	cyl	con	cyl	con	-	-	×		-	90		- 1
тройник	con	con	con	con	-	-	x		-	90		- 1
тройник	cyl	cyl	cyl	cyl	-	-	×	-	+	90	-	
тройник	Cy/	con	cyl	con	-	-	×	-		90		
тройник	con	con	con	con			x			90	-	
тройник	cyl	cyl	cyl	cyl	•			×	-	90		
тройник	cyl	con	cyl	con	-	-	-	х	-	90		
тройник	con	con	con	con		-	-	×	-	90		
тройник	cyl	cyl	Cy1	cyl	-	-		×	٠	90		
тройник	cyl	con	cyl	con		-	+	x		90		
тройник	con	con	con	con		-	-	×		90		
труба	cvi	CVI	-	-	sph	-		×				
труба	cyl	CVI	-	-	-	sph		×				
труба	cyl.	CV1	-	-	CV1	-	+	x	-		-	
ОТВОД	tor	tor	-	-	-	-	×			any		
переходник	cv/	cyl	-	-	-	-	-	×		-	-	
труба	cv/	CVI	-	-	-	-	-			-	-	
фланец* 4		-								90	4	
фланец* 4	-	-	-	-	-		-	-	-	180	4	
фланец*8	-	-		-	-		-			90	8	
фланец* 8		1.5			-	2.5	7.1		-	360	8	
фланец*12										90	12	
фланец*12				-						180	12	- 1
4			_		-							-i

Рис. 3. Библиотека параметризованных моделей элементов трубопровода

Определение НДС в зоне повреждения в упругой области нагружения осуществляется методом конечных элементов (МКЭ). Метод реализуется в среде проблемно-ориентированного программного обеспечения SPACE-3D [10] определения НДС узлов трубопровода. Составляющей программного обеспечения являются средства, позволяющие на современном научном уровне выполнять многовариантные численные расчеты напряженного состояния элементов трубопроводов. При этом значительное внимание было уделено разработке инструментария построения геометрических моделей рассматриваемых объектов библиотеки параметризованных моделей типовых элементов трубопроводов (рис. 3). Это позволяет на основе базовой строить новую модель, задавая новые значения параметров, в качестве которых принимаются ее характерные параметры. Использование параметризованных моделей избавляет пользователя от рутинной работы по подготовке входных данных, описывающих геометрию объекта (рис. 4).

В качестве геометрической модели рассматриваемых поверхностных дефектов используется половина эллипсоида, осями симметрии которого являются наибольшие размеры дефекта в осевом, окружном и радиальном направлениях трубопровода (рис. 5).

Расчет местных максимальных упругопластических деформаций  $e_{aj}^{-k}$  выполняется на основе данных упругого расчета МКЭ и интерполяционного соотношения для коэффициентов концентрации:

$$e_{aj}^{-k} = K_{ej} \frac{e_{aj}}{e_{T}}$$

где  $e_{aj}$  — амплитуда номинальных деформаций в *j*-м цикле нагружения;  $e_{\rm T}$  — интенсивность деформации, соответствующая пределу текучести;  $K_{ej}$  — коэффициент концентрации деформаций в упругопластической области деформирования материала в зоне дефекта в *j*-м цикле нагружения.

Результаты расчетов в статической и циклической постановке сопоставляются с данными расчета при равномерной коррозии и могут повлиять на выполненную ранее прогнозную оценку ресурса элемента, не учитывающую наличие де-



*Рис. 4.* Определение НДС трубы с дефектом: *а* — диалоговое окно для ввода данных; *б* — результаты расчета напряжений в зоне дефекта



Рис. 5. Поверхностный дефект, моделируемый половиной эллипсоида: *с* — длина; *b* — ширина; *d* — глубина дефекта; *h* — толщина стенки трубы

фекта. Общая схема расчета остаточного ресурса представлена на рис. 6.

Используемые при расчете методики прошли экспериментальную проверку при испытаниях натурных образцов (рис. 7).

Многочисленными исследованиями, проведенными в последние десятилетия, доказано негативное влияние на целостность и функционирование трубопроводов просадок грунтов, оползней, карстовых и эрозионных процессов, подтопления, экстремальных ветровых нагрузок (для наземных участков) и т. д. [11, 12].

Большинство аварий трубопроводов в пределах Восточно-Европейской платформы происходит на контактах различных геоморфологических уровней (террас, поверхностей выравнивания), где значительно увеличивается коррозионная активность среды. Негативное влияние на техническое состояние линейных сооружений могут оказывать и так называемые энергоопасные зоны, формирующиеся на границе тектонических структур, характеризующихся различной неотектонической и современной тектонической активностью [13], а также морфоструктурные узлы, образующиеся в местах пересечения разнонаправленных тектонически активных разломов. В их пределах фиксируются повышение сейсмичности, а также скоростей и амплитуд медленных вертикальных движений земной коры, что в конечном итоге может вызывать изменение напряженного состояния трубопровода [14, 15].

Исходя из вышеизложенного, информация об основных параметрах литосферы включается в состав ГИС оценки технического состояния трубопровода в виде отдельного модуля, позволяющего оценить морфоструктурно-неотектонические условия в зоне прохождения трубопровода как в целом, так и по отдельным составным компонентам.

В наиболее общем виде структуру морфоструктурно-неотектонического модуля ГИС оценки технического состояния трубопровода можно представить в виде нескольких разделов:

топографическая основа района исследований;



*Рис. 6.* Оценка риска аварии в зависимости от остаточного ресурса

рельеф; геологические условия; неотектонические условия.

Усредненные значения активности площадных морфоструктур заносятся в базу данных. Учитывая разноразмерность показателей, интегральная оценка проводится путем ранжирования каждого критерия по четырехбалльной шкале. В зависимости от суммы набранных баллов проводится морфоструктурное районирование исследуемой территории с выделением активных, умеренно активных, слабоактивных и неактивных структур.

Показатель геодинамической устойчивости территории является одним из критериев для ин-



Рис. 7. Натурный образец D325 после испытания до разрушения внутренним давлением



*Рис.* 8. Оценка риска аварии по критерию качества изоляционного покрытия (цифры — балльная оценка риска на участке трубопровода)

тегральной оценки технического состояния трубопровода.

Таким образом, отличительными особенностями разработанной ГИС является возможность оценки опасностей и риска аварий трубопровода с учетом:

прогнозирования остаточного ресурса на основе статистических методов обработки результатов обследования в шурфах;

оценки динамики приповерхностной части литосферы в районах пролегания трубопроводов;

определения НДС типовых элементов трубопроводов МКЭ, в том числе при наличии поверхностных нетрещиноподобных дефектов.

Разработанная ГИС предложена для практической реализации метода риск-менеджмента, основанного на оценке технического состояния трубопроводов и прогнозировании их остаточного ресурса. Система апробирована на данных обследования нефтепровода Ахтырского НГДУ (рис. 8).

Тестовый вариант ГИС позволяет определять возможность дальнейшей эксплуатации как отдельных участков, так и трубопровода в целом, назначать предупредительные и корректирующие действия, что является основой для повышения уровня безопасного функционирования реальных трубопроводов.

- 1. Кошкарев А.Г. Картография и геоинформатика: пути взаимодействия // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1990. № 1. С. 32–38.
- Майорова О. В. Отказы и аварии на магистральных газопроводах: причины, следствия // Актуальные проблемы современной науки. — 2005. — № 2. — С. 118.
- Инструкция по обследованию методом шурфования, испытаниям и оценке ресурса линейной части подземных

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев Ин-т географии НАН Украины, Киев Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, НГДУ «Ахтырканефтегаз» магистральных трубопроводов (И1-98 ИЭС им. Е. О. Патона). — 72 с.

- СТП 3209.30019801.084–2003. Магістральні трубопроводи. Вимоги до обсягу збору даних для наповнення системи паспортизації магістральних газопроводів. — Київ: ДК «Укртрансгаз», 2003. — 36 с.
- GROWTH Project G1RD-CT-2001-03008 «RIMAP», Document number: 1-11-F-2004-01-1.
- СНиП 2.05.06–85. Магистральные трубопроводы. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988 — 52 с.
- Sutton, Ian S. Process Hazards Analysis. Sutton Books, Houston, Texas. 2002. — C.310.
- ДСТУ 4046–2001. Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. — Київ: Держстандарт Украни, 2001. — 24 с.
- Методика оцінки технічного стану металу діючого газопроводу з тривалим строком експлуатації та залишкового ресурсу його безпечної роботи Укрндігаз, 1997.
- Програмне забезпечення «Тривимірне скінченноелементне моделювання теплового і термонапруженого стану елементів машинобудівних конструкцій (SPACE) / Система сертифікації УкрСЕПРО. Сертифікат відповідності № UA1.017.0054634-04. — 2004.
- Говдяк Р. М. Удосконалення технологічного проектування нафтогазопроводів з урахуванням їх взаємодії з довкіллям:— Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Івано-Франківськ, 2002. — 21 с.
- Захаров Ю. Ф. Инженерно-геологический мониторинг природно-техногенных систем (на примере Западно-Сибирского нефтегазового комплекса): Автореф. дис. ... дра геол.-мин. наук. — М., 1988. — 43 с.
- Худяков Г. И. Энергоопасные зоны и трансрегиональные трубопроводы / Проблемы экологической геоморфологии: Материалы Межгосударственного совещания XXV Пленума геоморфологической комиссии РАН. — Белгород: БелГУ, 2000. — С. 79–80.
- 14. Сучасні рухи земної кори на території України: проблеми тектонічної інтерпретації та картографування / А. В. Кендзера, В. Д. Омельченко, А. Л. Бондарь та ін. // Геоінформатика, 2003. — № 4. — С. 66–73.
- Палієнко В. П. Новейшая геодинамика и ее отражение в рельефе Украины. — Київ: Наук. думка, 1992. — 116 с.

Поступила в редакцию 18.01.2007

# ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТРУБНОЙ СИСТЕМЫ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ БЛОКОВ МОЩНОСТЬЮ 100...300 МВт В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

#### Е. Я. ВЕКСЛЕР, И. А. ЗАПЛОТИНСКИЙ, И. В. ЗАМЕКУЛА, В. Ю. ТОЛСТОВ

Рассмотрены причины возникновения и процесс развития водородной коррозии труб змеевиков подогревателей питательной воды в турбоустановках тепловых электростанций. Описан характер повреждений и установлены идентификационные признаки процесса водородной коррозии. Предложены способы контроля и рассмотрено установление сроков межконтрольного периода. В действующей отраслевой нормативной документации этот процесс не рассмотрен.

Considered are the causes for initiation and process of development of hydrogen corrosion in coil pipes of drinking water heaters in TPS turbo-installations. Nature of the damage is described and identification features of hydrogen corrosion process are established. Control methods are proposed and establishment of inter-inspection intervals is considered. This process is not covered by the codes currently in force.

В последнее время на тепловых станциях высокого давления киевской энергосистемы из-за повреждения змеевиков подогревателей высокого давления (ПВД) происходили вынужденные остановы блоков мощностью 300 МВт (прямоточный котел ТГМП-344А, турбина Т-250/300-240) [1]. Змеевики выполнены из труб Ø 32×5 мм, материал сталь 20. Время эксплуатации труб до момента повреждения составляло более 100 тыс. ч.

Параметры рабочей среды корпусов ПВД трех ТЭС, обследованных в работе, приведены в табл. 1.

Повреждения однотипны, хрупкого, бездеформационного характера с разрушением труб по механизму макровыкрашиваний со стороны наружной поверхности змеевиков и располагаются преимущественно на их растянутой части.

Внешний вид поврежденных змеевиков ПВД-6 после 121 тыс. ч эксплуатации приведен на рис. 1.

Поврежденные зоны протяженностью 50 мм и более — это выкрашивания, одиночные свищи и их скопления размером от 0,5 до 15 мм.

Поверхность труб вокруг свищей получила значительный эрозионный износ в виде кратеров. Причиной повреждения труб змеевиков ПВД явилось развитие водородной коррозии металла.

При микроструктурном исследовании в зоне повреждения были выявлены межкристаллитные микротрещины и трещины водородной коррозии, развивающиеся от внешней поверхности трубы со стороны паровой среды.

У кратеров коррозионно-эрозионного износа располагаются скопления микротрещин в виде сетки, соединяющей локальные выкрашивания, поры, надрывы и развитые макротрещины, заполненные оксидами (рис. 2).

На участках, удаленных от мест повреждений, выявлено значительное количество микротрещин



Таблица 1. Параметры пара на входе корпусов ПВД Станция Блок Тип ПВД *P*, ата *T*, °С

,			,	, -
Α	A1	ПВД-6	18	475
	A2	ПВД-7	43	335
		ПВД-8	66	390
Б	Б1	ПВД-6	22	338
		ПВД-7	34	387
	Б2	ПВД-6	17	460
		ПВД-7	41	335
		ПВД-8	65	390
В	B1	ПВД-8	65	390
	<i>B2</i>	ПВД-8	65	390

Рис. 1. Внешний вид поврежденных змеевиков ПВД-6

© Е. Я. Векслер, И. А. Заплотинский, И. В. Замекула, В. Ю. Толстов, 2007

## ГЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА -



Рис. 2. Микроструктура металла поврежденной трубы ПВД: *а*, б — в зоне; *в*, г — вдали от повреждения (*a*−*в* — ×1000; г — ×250)

и трещин-надрывов, вызванных водородной коррозией (рис. 2, в). Со стороны наружной поверхности трубы наблюдается обезуглероживание металла (рис. 2, г). Микроструктура металла ферритно-перлитная, слабо дифференцированная.

В ряде случаев водород проходит сечение трубы и тогда коррозионное растрескивание наблюдается и на внутренней поверхности трубы. Так, при исследовании повреждений труб ПВД-8 блоков *B1* и *B2* станции *B* (см. табл. 1) после 119 тыс. ч эксплуатации со стороны внутренней поверхности труб было обнаружено массовое растрескивание металла, развивающееся на фоне частичного обезуглероживания за счет наводораживания. Коррозионные межкристаллитные трещины с ответвлениями распространялись от внутренней поверхности на глубину до 1,5 мм (30 % сечения), далее в объеме сечения располагается разорванная сетка межкристаллитных микротрещин. Разрушения в этом случае произошли на гибах труб и имели вид хрупких продольных трещин длиной до



Рис. 3. Внешний вид поврежденного змеевика ПВД-8

250 мм, расположенных по нейтральным линиям гиба (рис. 3).

Наружная поверхность труб ПВД была поражена углекислотной язвенной коррозией, покрыта рыхлыми многослойными отложениями темнокоричневого цвета толщиной до 3 мм. Под легко откалывающимся верхним слоем отложений обнажался солевой налет и серая оксидная пленка. На поверхности труб обнаружены язвины диаметром до 4,5 мм. Утонение стенки труб за счет коррозионного износа в местах язвин достигало 40 %.

Анализ причин происходящих отказов показал, что повреждения змеевиков ПВД связаны с особенностями эксплуатационных режимов блоков и происходят под воздействием водорода, присутствующего в паровой среде и диффундирующего в металл.

С точки зрения современных представлений [2, 3], источником поставки водорода в металл являются органические соединения в паровом тракте за счет возвратных производственных конденсатов, присосов охлаждающей воды в конденсаторах турбин и пр.

В рассмотренном случае (повреждения труб ПВД-6 на станции *A*, работающей в режиме замкнутого водного цикла пароохлаждения) наиболее вероятным источником попадания водорода в паровой тракт является добавочная вода для подпитки котла, поступающая из постоянного запаса охлаждающей воды с присутствием органики, при условии плохой работы фильтров водоподготови-



тельной установки (ВПУ) и блочно-обессоливающей установки (БОУ).

Повреждения труб ПВД-8 станции *В* вследствие совместного воздействия внутренней водородной и наружной углекислотной коррозии произошли при переводе блока на нейтральный кислородно-водный химический режим и передозировке вводимого кислорода. Для нормализации работы сосуда потребовалась полная замена труб змеевиков и реконструкция ПВД.

Наиболее активным катализатором коррозионных процессов в стали считаются два состояния водорода — ионизированное в виде подвижных отрицательных ионов и молекулярное в виде  $H_2$ и CH<sub>4</sub>, ответственное за образование остаточного водорода в решетке. Водород ослабляет межатомные связи в металле и дислоцируется на границах зерен, дефектах типа микропор, несплошностях, оказывая давление на поверхности полости дефекта, что приводит к образованию микронадрывов и микротрещин стальной матрицы.

Газовый анализ одной из поврежденных труб на остаточный водород (установка RH2 LECO) показал, что в зоне повреждения содержание водорода составляет 0,0051...0,0075 мас. %, а на участках, удаленных от мест повреждения — 0,00036...0,00049 мас. %. Таким образом, в зоне повреждения содержание водорода по крайней мере на порядок выше, чем в неповрежденном объеме металла труб.

В нашем случае развитию водородной коррозии труб змеевиков ПВД-6 блока *A2* станции *A* способствовала закономерная деградация субструктуры в процессе длительной эксплуатации в условиях высокотемпературной (для углеродистой стали) паровой среды. При этом в металле поверхностных наружных слоев труб в процессе эксплуатации происходит накопление микроповрежденности в виде субмикропор и других дефектов, которые становятся очагами начальных коррозионных микроразрушений.

Следует отметить, что до момента аварийных остановов эксплуатация труб ПВД указанных блоков проходила без замечаний. В процессе эксплуатации в полном объеме проводился контроль металла труб змеевиков (визуальный контроль, ультразвуковая толщинометрия) в соответствии с действующими нормативами, однако признаки коррозии не были выявлены. Очевидно, что принятые методы контроля труб ПВД в данной ситуации по своим инструментальным возможностям недостаточны и не позволяют выявить изменения, происходящие в металле на микроуровне.

С целью определения реального состояния металла змеевиков ПВД блоков после длительной эксплуатации и оценки кинетики развития водородной коррозии была осуществлена программа исследований [4] на вырезках из труб ПВД блоков

Таблица 2. Износ труб ПВД блока *А2* станции 2 за счет водородной коррозии

Время эксплуа-	Суммарный коррозионный износ сечения труб,					
тации, тыс. ч	ПВД-6	ПВД-7	ПВД-8			
121	В зоне повреждений до 100	До 3	До 3			
123	610	До 3	До 3			
131	39	До 4,5	До 4,5			

мощностью 300 МВт станции *A* с замкнутым и станции *Б* с открытым водяным циклом системы пароохлаждения. При этом были обследованы не только ПВД-6, где зафиксированы повреждения, но также и ПВД-7, ПВД-8, где повреждения отсутствовали.

Для сопоставления были также исследованы трубы ПВД блока мощностью 100 МВт станции *Б* (барабанный котел ТГМ-96А, турбина Т-100-130).

В первую очередь представляет интерес рассмотрение труб ПВД-7 и ПВД-8 блока A2 станции A с поврежденными и неповрежденными трубами ПВД-6.

Для оценки состояния указанных труб после 123 и 131 тыс. ч эксплуатации были произведены вырезки из различных зон подогревателей: пароохлаждения, средней части и конденсации. Исследование структуры металла проводили на шлифах поперечного сечения труб. Критерием оценки была выбрана величина суммарного коррозионного износа сечения трубы (%) за счет водородной коррозии.

Микроисследование металла вырезок во всех случаях выявило признаки наружной водородной коррозии. Обобщенные данные исследований ПВД блока *A2* станции *A* приведены в табл. 2.

Как видно из приведенных данных, активность коррозии металла труб по зонам подогревателя различна и в худшем состоянии оказались трубы змеевиков ПВД-6, работающие в паровой среде более высокой температуры (зона пароохлаждения). Трубы зоны пароохлаждения ПВД-6 блока *A2* были полностью заменены. Интересные данные были получены при сопоставлении труб ПВД двух однотипных блоков *A1* и *A2* станции *A*.

Блок *A1* станции имел к моменту исследования большую наработку — 150 тыс. ч, но за время эксплуатации повреждений труб ПВД не происходило.

При микроструктурном исследовании во всех случаях были выявлены признаки начальной стадии развития водородной коррозии металла труб: микротрещины и их скопления в виде разорванной сетки, микронадрывы, поры, микровыкрашивания и развитые транскристаллитные трещины, заполненные оксидами. Развитие кор-

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

розии также происходило со стороны паровой среды (с наружной поверхности трубы).

Наибольший коррозионный износ претерпели трубы ПВД-6 блока *A1* в зоне пароохлаждения и в средней зоне, однако глубина коррозии труб ниже, чем на трубах аварийного блока *A2* и составляет 6...8 %. Отмеченные особенности свидетельствуют о меньшей скорости коррозии труб ПВД-6 на блок № 1, что обеспечено удовлетворительной работой фильтров ВПУ и БОУ блока. Трубы ПВД блока № 1 были оставлены в эксплуатации при условии повторного контроля через два года работы.

Исследование состояния труб ПВД блока *Б4* станции *Б* показало похожие результаты. Были произведены вырезки из труб змеевиков ПВД-6, ПВД-7, ПВД-8 в зоне пароохлаждения, где коррозионные повреждения наиболее вероятны.

Подтвержден факт развития водородной коррозии металла труб змеевиков ПВД-6, ПВД-7, ПВД-8 со стороны паровой поверхности, но скорость коррозии замедлена и глубина коррозии после 183 тыс. ч эксплуатации не превышает 1,6 %: суммарный коррозионный износ сечения труб ПВД-6 составляет 1,6; ПВД-7 — 1,3; ПВД-8 — 1,0 %.

Трубы ПВД блока *Б4* станции были оставлены в эксплуатации при условии систематического контроля каждые 4 года. Для оценки состояния труб ПВД блока мощностью 100 МВт *Б1* станции *Б* были произведены вырезки из труб змеевиков ПВД-6 и ПВД-7 в средней зоне и зоне пароохлаждения после 180 и 42 тыс. ч эксплуатации. Параметры рабочей среды корпусов ПВД приведены в табл. 1.

При исследовании гибов труб в средней зоне змеевиков ПВД-6 выявлены начальные признаки водородной коррозии в виде редких одиночных микротрещин. Развитие водородной коррозии начинается со стороны внешней поверхности труб в подповерхностном слое, глубиной 3,3 % сечения.

При исследовании труб змеевиков ПВД-7 коррозионные дефекты не выявлены даже в зоне пароохлаждения. Трубы ПВД-6 блока *А1* станции оставлены в эксплуатации при условии систематического контроля через каждые 4 года.

В рамках программы было также обследовано состояние металла корпуса и коллектора ПВД-6 блока *А2* станции *А*, где наблюдали повреждения змеевиков вследствие водородной коррозии после 123 тыс. ч эксплуатации.

Исследования проводили неразрушающими методами в зоне пароохлаждения ПВД. При исследовании металла корпуса (сталь 20К) со стороны внутренней поверхности выявлена деградация структуры, связанная с дифференциацией перлитной фазы и выделением цементитных сфероидов по границам и в поле феррита, что закономерно для длительной эксплуатации углеродистой стали при рабочих температурах пара в корпусе (475 °C). Признаков водородной коррозии металла корпуса не выявлено. При исследовании металла коллектора (сталь 20) изменений структуры и признаков водородной коррозии также не выявлено.

Таким образом, при исследовании труб змеевиков ПВД блоков мощностью 250...300 МВт после 119...183 тыс. ч эксплуатации во всех случаях были выявлены признаки водородной коррозии металла: межкристаллитные трещины, поры, надрывы, выкрашивания и развитые транскристаллитные трещины.

Развитие водородной коррозии начинается с наружной поверхности змеевиков под воздействием водорода из пара в корпусе сосуда. В некоторых случаях водород проходит сечение трубы, о чем свидетельствуют коррозионные повреждения на внутренней поверхности труб. При этом наружная поверхность труб повреждается за счет язвенной углекислотной коррозии.

Наибольший коррозионный износ получают трубы в высокотемпературной части конструкции ПВД, т. е. в зоне пароохлаждения ПВД-6, где существуют благоприятные условия для накопления в процессе длительной эксплуатации субмикрои микроповрежденности металла и развития коррозионных процессов.

Повреждения труб змеевиков ПВД во всех случаях связаны с попаданием в паровой тракт ПВД активных форм водорода.

Для технического диагностирования состояния труб змеевиков подогревателей высокого давления блоков можно рекомендовать систематические вырезки из наиболее часто повреждаемых труб ПВД-6 в зоне пароохлаждения и средней зоне, в сочетании со стандартными неразрушающими методами контроля (визуальный контроль, толщинометрия).

- Водородная коррозия металла трубной системы подогревателей высокого давления / Е. Я. Векслер, И. А. Заплотинский, И. В. Замекула, В. Ю. Толстов // Сб. тр. науч.техн. конф. «Металлы оборудования ТЭС. Проблемы и перспективы». — М., ВТИ: 2006. — С. 129–134.
- 2. Вайнман А. Б., Мелехов Р. К., Смиян О. Д. Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления. Киев: Наук. думка, 1990. 268 с.
- 3. Гиренко В. С., Рабкина М. Д., Гиренко С. В. Физико-химические изменения в сталях при эксплуатации в водородосодержащих средах // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 4. — С. 18–23.
- Векслер Е. Я., Чайковский В. М. Современные методы контроля структуры и свойств металла энергоустановок / Украинское республиканское научно-техническое общество энергетики и электротехнической промышленности. — Киев, 1982. — С. 62.

Энергоналадка Киевэнерго

Поступила в редакцию 18.01.2007

# МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ ПРИ МНОГОПАРАМЕТРОВОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

## Ю. В. ВИТРУК, В. С. ЕРЕМЕНКО, А. М. ОВСЯНКИН

Рассмотрена методика отбора диагностических признаков при многопараметровом контроле композиционных материалов на основе пошагового дискриминантного анализа. Приведены результаты экспериментального исследования данной методики на примере неразрушающего контроля усталостных повреждений углепластиков методом свободных колебаний. Показано, что применение процедуры дискриминантного анализа для отбора параметров позволило уменьшить размерность диагностического пространства со 100 до 7.

Overview method selection diagnostic signs in case polyvalent control composition materials base on step-by-step discriminant analysis. Results experimental research given method present example nondestructive testing fatigue damages free-vibration methods. In result, application procedure discriminant analysis for selection parameters allowed to decrease dimension diagnostic space from 100 to 7.

Методы диагностики композиционных материалов, таких как многослойные пластиковые панели, сотовые панели и т. д., имеют ряд существенных отличий от методов диагностики структурно-однородных материалов. Это обусловлено сложной структурой композитов, разными механизмами разрушения, а также большим количеством типов дефектов, которые невозможно выявлять одним физическим методом. Поэтому для диагностики композитов используются многопараметровые комплексные методы. В работе [1] доказано, что с увеличением количества диагностических параметров повышается точность и надежность контроля, возрастают время обработки данных и аппаратурные затраты, что ведет к увеличению стоимости диагностики. Поэтому актуальной является проблема выделения определенного количества оптимальных с точки зрения информативности диагностических параметров контроля композитов. В работах [2, 3] эта проблема решается посредством метода главных компонент, который основан на преобразовании Карунена-Лоева. Однако этот метод имеет ряд недостатков, в частности, трудности при определении оптимальных значений собственных чисел и собственных векторов корреляционной матрицы, которая характеризует связь между диагностическими параметрами.

В статье проведено исследование возможности использования пошагового дискриминантного анализа [4] для отбора диагностических параметров с наибольшей чувствительностью к дефектности изделия и минимизация их количества.

Дискриминантный анализ основывается на пошаговой процедуре исследования каждого информативного параметра по критерию минимума отношения внутригруппового расстояния к межгрупповому расстоянию. В данном случае группами счи-

© Ю. В. Витрук, В. С. Еременко, А. М. Овсянкин, 2007

таются множества значений информативных признаков, которые отвечают бездефектным зонам изделия и зонам с определенными дефектами.

Критерием информативности каждого отдельного параметра может служить Л-статистика Уилкса:

$$\Lambda(x) = \det W(x) / \det T(x),$$

где W(x), T(x) — соотвественно внутригрупповая и общая матрица взаимных произведений; detW(x), detT(x) — детерминанты соответствующих матриц.

Данная статистика принимает значение от 0 до 1. Большие ее значения свидетельствуют о слабом разделении между группами, малые — достаточном. Кроме  $\Lambda$ -статистики может также использоваться ее аппроксимация, которая базируется на *F*-распределении Фишера.

При пошаговой процедуре дискриминантного анализа выполняются следующие правила:

параметр не исключается, если значение его *F*-статистики исключения больше или равняется установленному порогу:

$$F_{\text{искл}} = \frac{n-q-p+1}{q-1} \cdot \frac{1-\Lambda(ux)}{\Lambda(ux)},$$

где n — общее количество наблюдений; q — количество групп; p — общее количество переменных;

параметр не включается, если значение его *F*-статистики включения ниже установленного уровня:

$$F_{\rm BKJ} = \frac{n-q-p}{q-1} \cdot \frac{1-\Lambda(ux)}{\Lambda(ux)};$$

параметр не включается, если значение его внутригрупповой толерантности ниже установленного порога.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, №2,2007

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

Толерантность для включения классификационной переменной равняется единице за вычетом квадрата ее внутригрупповой корреляции с текущими включенными переменными. При этом  $\Lambda(ux)$  — мультипликативный прирост, который получается при соответственном включении или исключении исследуемого параметра. Мультипликативный прирост вычисляется следующим об-

разом:  $\Lambda(x_i x) = \frac{\overline{t}_{ii}}{\widetilde{w}_{ii}}$  — для исключения параметра

 $x_i$  и  $\Lambda(x_i x) = \frac{\widetilde{w}_{ii}}{\widetilde{t}_{ii}}$  — соответственно для включения параметра  $x_i$ , где  $\widetilde{t}_{ii}$ ,  $\widetilde{w}_{ii}$  — текущие состояния мат-

риц T(x) и W(x), которые получены путем применения процедуры «выметания» [4] на соответствующих диагональных элементах.

Таким образом, после выполнения пошаговой процедуры диагностические параметры ранжируются по значению их информативности (в данном случае чувствительности к изменению физических свойств исследуемой зоны).

Дискриминантный анализ также дает возможность по отобранным информативным признакам построить дискриминантные функции, которые описывают каждый класс (группу) и позволяют классифицировать исследуемые зоны изделия на принадлежность к определенному эталонному классу (неповрежденные или с определенной степенью повреждения — определенными дефектами).

Дискриминантные функции строятся в виде следующего уравнения:

$$d_g = a_g + b_{gl} x_1 + \dots + b_{gp} x_p, \tag{1}$$

где  $a_g = -\frac{1}{2} \sum_j \overline{x}_{gi} b_{gi}$  и  $b_{gi} = -(n-q) \sum_j w_{ij} \overline{x}_{gi}$  —

коэффициенты дискриминантных функций, которые вычисляются по множествам информативных признаков, отвечающим эталонным зонам (обучающим множествам);  $\bar{x}_{gi}$  — среднее значение *i*-й переменной в эталонной группе g;  $x_1...x_p$  — значение соответствующих информативных признаков для исследуемой зоны.

Классификация изделий осуществляется по следующему правилу: дефект в изделии принадлежит к определенному эталонному классу, если значение соответствующей дискриминантной функции при подстановке в нее измеренных значений диагностических признаков больше, чем значение других дискриминантных функций при тех же значениях признаков. Таким образом, процедура пошагового дискриминантного анализа позволяет уменьшить размерность диагностического пространства и построить дискриминантные функции, по которым проводится классификация информационных сигналов.

Экспериментальные исследования проводили на образцах однонаправленного углепластика КМУ-11Э-0,08 толщиной 2,2 мм и размером 200×20 мм с полусферическим концентратором напряжения радиусом 1,5 мм. Дефектные зоны моделировались циклическим нагружением изгибом при нагрузке  $\sigma = 0.33\sigma_{\rm B}$  ( $\sigma_{\rm B}$  — предел прочности материала) каждого образца по 500 000, 750 000 и 1 000 000 циклов. Хотя усталостная прочность однонаправленных композиционных материалов в 2...3 раза превышает прочность конструкционных металлов, уже на ранней стадии циклического нагружения в композитах возникают разрушения на границе раздела волокно-матрица, появляются растрескивание матрицы и расслоения [5]. Данные типы разрушений приводят к постепенному снижению жесткости в процессе нагружений.

В работе [6] сделана попытка оценки усталостного разрушения углепластика импедансным методом и методом свободных колебаний по амплитуде информационного сигнала. Показано, что чувствительность контроля зависит от многих факторов — метода контроля и типа дефектоскопа, типа первичного преобразователя (раздельный или раздельно-совмещенный). Относительно небольшие изменения амплитуды сигналов для бездефектных и поврежденных образцов требуют повышенной стабильности условий при проведении контроля, а также высокой квалификации оператора. Поэтому в проведенных экспериментальных исследованиях с целью повышения информативности контроля усталостных повреждений в качестве диагностических параметров были использованы спектральные характеристики информационных сигналов свободных колебаний.

Возбуждение свободных колебаний в образцах осуществлялось посредством генератора дефектоскопа АД-60 и стандартного преобразователя ПДУ-3. Приемный микрофон преобразователя соединялся через порт ввода/вывода ЕТ1290 с персональным компьютером. Порт состоит из предварительного усилителя и 12-разрядного аналогоцифрового преобразователя с частотой дискретизации до 10 МГц (выбор необходимой частоты осуществляется программным путем). Сканирование образцов происходило в центральной зоне возле концентратора напряжения.

Пространством диагностических признаков с учетом подхода, описанного в [7], являются векторы действительных и мнимых частей спектра Фурье информативных сигналов. На рис. 1 показаны огибающие амплитудных и фазовых спектров полученных сигналов, осредненные по десяти значениям.

На данных рисунках кривые с отметкой 0 означают соответствующие спектры свободных колебаний, полученные на бездефектном образце, с



Рис. 1. Огибающие амплитудных (а) и фазовых (б) спектров свободных колебаний (обозначения кривых см. в тексте)

отметками 1-3 — спектры свободных колебаний, полученных на образцах, которые были подвержены нагружениям 500 000, 750 000 и 1 000 000 циклов соответственно. Предварительно анализируя рис. 1 можно сказать, что амплитудные спектры, по которым принято классифицировать сигналы свободных колебаний, незначительно отличаются один от другого. Это также хорошо видно из спектров разностей амплитуд (рис. 2), рассчитанных между амплитудными спектрами сигналов, полученных на дефектных образцах, и амплитудным спектром сигнала, полученного на бездефектном образце.

На рис. 2 кривая *1* характеризует разностные амплитудные спектры свободных колебаний между спектром на образце с 500 000 циклов нагружений и спектром на бездефектном образце; *2* — между спектром на образце с 750 000 циклов и спектром на бездефектном образце; *3* — между спектром на образце с 1 000 000 циклов и спектром на бездефектном образце.

Согласно методике, приведенной в [8], по разностным спектрам рассчитывается обобщенный параметр В. Для полученных данных он равняется 0,146 для образца с нагружением 500 000 циклов, 0,142 — 750 000 циклов и 0,141 — 1000 000 циклов. Можно сделать вывод, что сигналы, которые соответствуют различным типам дефектов, мало



Рис. 2. Разностные амплитудные спектры свободных колебаний (обозначения кривых см. в тексте)

различаются между собой по обобщенному параметру B, что не позволяет классифицировать их таким способом.

На рис. 3. изображен спектр метрических расстояний [7] между комплексными компонентами преобразования Фурье сигналов, полученных на образцах, которые подвергались нагружениям, и сигнала, полученного на образце, который не подвергался нагружению.

Обобщенный параметр *B*, рассчитанный по спектру метрических расстояний, для перечисленных выше образцов равняется соответственно 0,259; 0,234; 0,205. Таким образом, учет фазовой информации в спектрах метрических расстояний дает возможность несколько улучшить различимость между сигналами, которые соответствуют свободным колебаниям в образцах с различной нагрузкой. Следовательно, обработку сигналов свободных колебаний по метрическим расстояниям между комплексными спектрами можно про-



Рис. 3. Спектры метрических расстояний между комплексными спектрами, полученными на образце с 500 000 циклами нагружения и бездефектном образце (1); 750 000 циклами нагружения и бездефектном образце (2); образце с 1 000 000 циклов нагружения и бездефектном образце (3)

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, №2,2007

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА -

Таблица	1. Результаты	пошаговой	процедуры	отбора	пере
менных					

Номер шага	Номер включенной переменной	Значение Л-статистики
0		1
1	22 <i>r</i>	0,0920559
2	21 <i>r</i>	0,0207883
3	26 <i>i</i>	0,0075883
4	3i	0,0029715
5	7i	0,0009627
6	14 <i>i</i>	0,0002943
7	17 <i>i</i>	0,0001279
8	36 <i>r</i>	0,0000592
9	23 <i>r</i>	0,0000094
10	13 <i>i</i>	0,0000035
11	19 <i>r</i>	0,0000017
12	11 <i>i</i>	0,0000007
13	10 <i>i</i>	0,0000003
14	43 <i>i</i>	< 0,0000001

Таблица 2. Расстояния Махаланобиса между группами в случае шести отобранных переменных

Образец	Бездефект.	500 000	750 000	1 000 000
Бездефект.	0,0000	553,1716	77,0873	73,0016
500 000	553,1716	0,0000	733,7812	418,4604
750 000	77,0873	733,7812	0,0000	60,9781
1 000 000	73,0016	418,4604	60,9781	0,0000

Таблица 3. Расстояния Махаланобиса между группами в случае семи отобранных переменных

Образец	Бездефект.	500 000	750 000	1 000 000	
Бездефект.	0,0000	1165,497	107,475	74,456	
500 000	1165,497	0,0000	1649,311	972,549	
750 000	107,475	1649,311	0,0000	106,1182	
1 000 000	74,456	972,549	106,1182	0,0000	
Примечание. В табл. 2-4 принято: бездефект. — бездефектный образец; 500 000, 750 000 и 1 000 000 — образцы с нагружением 500 000, 750 000 и 1 000 000 циклов.					

водить предварительно для отбора наиболее информативных гармоник.

В проведенных исследованиях использовалась процедура пошагового дискриминантного анализа, которая представлена в программном пакете обработки статистической информации «STATIS-TICA» (StatSoft). Результаты данной процедуры приведены в табл. 1. Номер шага совпадает в данном случае с количеством включенных переменных. Для дискриминантного анализа было использовано 50 первых комплексных гармоник свободных колебаний исследуемых зон.



Рис. 4. График пошагового изменения А-статистики Уилкса

Номеру переменной соответствует номер гармоники спектра, а индекс r или i означает действительную или мнимую ее часть. График пошагового изменения  $\Lambda$ -статистики приведен на рис. 4.

Было исследовано два случая: в первом отобрано шесть переменных ( $\Lambda = 0,0002943$ ), во втором — 7 ( $\Lambda = 0,0001279$ ). Параметром качества разделения на группы для этих двух случаев может служить значение  $\Lambda$ -статистики, которое для семи отобранных переменных почти в 2 раза меньше, чем для шести. Но для более лучшего сравнения целесообразно найти значение некоторых мер схожести между группами для этих двух случаев. В частности, удобной мерой схожести является расстояние Махаланобиса [9]:

$$D = (x - m)^T C^{-1} (x - m),$$

где m, x — векторы средних значений переменных соответственно одной и второй группы; C — ковариационная групповая матрица; ()<sup>T</sup> — оператор транспонирования;  $C^{-1}$  — оператор обращения матрицы.

Рассчитанные с помощью пакета «Statistica» расстояния Махаланобиса для двух случаев приведены в табл. 2 и 3.

Из анализа данных, приведенных в таблицах, следует, что увеличение множества классификационных переменных ведет к увеличению расстояний между группами. Но особенность данных сигналов такова, что расстояние между сигналом на образце с максимальным количеством циклов нагружений и сигналом на бездефектном образце наименьшая по сравнению с другими и составляет 74,456. Возможно, это вызвано непропорциональными изменениями механических свойств исследуемого материала при нагружениях в определенных диапазонах.

Также были рассчитаны коэффициенты дискриминантных функций для шести и семи отобранных переменных (табл. 4 и 5).

Классификатор, который является системой дискриминантных функций согласно формуле (1)

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

## Таблица 4. Коэффициенты дискриминантных функций для шести отобранных переменных

Номер переменной	Коэффициент	Бездефект. (g = 0)	500 000 (g = 1)	750 000 (g = 2)	1 000 000 (g = 3)
X22r	<i>bg</i> ,0	-26010,7	-6173,6	-24652,1	-19130,0
X21 <i>r</i>	<i>bg</i> ,1	10163,2	3882,4	8368,5	6181,4
X26i	bg,2	40991,9	-12337,1	55426,4	35906,3
X3i	<i>bg</i> ,3	2239,4	7368,3	-989,5	67,7
X47i	bg,4	13345,3	-5771,6	18283,7	11238,8
X14 <i>i</i>	<i>bg</i> ,5	-6306,5	132,7	-8169,8	-4652,7
Const	ag	-291,6	-90,2	-275,6	-169,2

Таблица 5. Коэффициенты дискриминантных функций для семи отобранных переменных

Номер переменной	Коэффициент	Бездефект. $(g = 0)$	$500\ 000\ (g=1)$	750 000 ( $g = 2$ )	$1\ 000\ 000\ (g=3)$
X22r	<i>bg</i> ,0	-31524,3	1810,2	-33172,4	-23985,6
X21 <i>i</i>	<i>bg</i> ,1	9386,2	5007,6	7167,7	5497,1
X26r	bg,2	61015,4	-41331,7	86369,6	53540,6
X3i	<i>bg</i> ,3	-3158,3	15184,2	-9330,7	-4685,9
X47 <i>i</i>	bg,4	22040.8	-18363,0	31721,4	18896,8
X14 <i>i</i>	bg,5	-6765,0	796,7	-8878,4	-5056,6
X17 <i>r</i>	bg,6	7140,4	-10339,5	11034,4	6288,4
Const	ag	-332,5	-175,9	-373,2	-200,9

Таблица 6. Результаты работы классификаторов

Верные решения	Решения класси- фикатора с шестью перемен- ными	Решения класси- фикатора с семью перемен- ными
0	0	0
0	0	0
0	0	0
1	1	1
1	1	1
2	0	2
3	3	3
3	0	3
3	0	3
3	3	3
3	3	3
3	3	3
Количество решений, сов- падающих с верными	9	12

и построенный на основе отобранных переменных посредством пошаговой процедуры, представляет собой следующую матричную систему уравнений:

$$D = BX$$
,

где D — матрица [4×4] искомых значений дискриминантных функций для четырех групп; X — матрица [4×(m + 1)] значений отобранных переменных для четырех групп (последний столбик матрицы заполняется единицами); B — матрица [(m + 1)×4] коэффициентов дискриминантных

функций; *т* — количество отобранных переменных.

Для проверки работы классификаторов было проведено 12 измерений на различных образцах. Результаты работы классификаторов для случая шести и семи отобранных переменных представлены в табл. 6, где цифры 0–3 означают соответственно сигналы, полученные на бездефектном образце, на образце с нагружением 500 000, 750 000 и 1 000 000 циклов.

Таким образом, классификация на основе семи отобранных переменных является более достоверной. Очевидно, что в рассмотренном случае использование меньшего количества переменных для классификации нецелесообразно.

## Выводы

Применение пошагового дискриминантного анализа позволило уменьшить размерность пространства информативных признаков со 100 до 7 переменных.

Полученные дискриминантные функции дают возможность проводить диагностику не только в режиме «годен–не годен», но и осуществлять классификацию дефектных зон.

Вследствие того, что пошаговая процедура выбирает диагностические параметры, наиболее чувствительные к изменению свойств материалов, исследованная методика обеспечивает более высокую достоверность контроля, чем существующие методики на основе расчета обобщенных параметров.

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

- 1. Рапопорт Д. А., Фрейдин Б. Г., Шор Л. А. О надежности многопараметрического неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 1990. № 8. С. 81–87.
- Ахметиин А. М. Применение метода главных компонент в неразрушающем контроле // Там же. — 1981. — № 12. — С. 23–36.
- Виброакустическая диагностика неметалических элементов конструкций летательных аппаратов с использованием алгоритма множественной классификации сигналов / С. Р. Игнатович, Н. И. Бурау, И. М. Закиев, А. Д. Коган // Материалы 14-й ежегодной междунар. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». — 16–20 окт. 2006 г., Ялта. — С. 48–49.
- Статистические методы для ЭВМ / Под ред. К. Энслейна, Э.Релстона, Г. С. Уилфа. — М.: Наука, 1986. — 464 с.

Нац. авиац. ун-т, Киев

- Фудзи Т., Язако М. Механика разрушения композиционных материалов: Пер. с япон. М.: Мир, 1982. 232 с.
   Овсянкін А. М., Дереча В. Я., Луб'яний В. В. Контроль
- 6. Овсянкін А. М., Дереча В. Я., Луб'яний В. В. Контроль втомних пошкоджень конструкцій з ПКМ // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2007. — № 1. — С. 39–44.
- 7. Витрук Ю. В., Еременко В. С. Особенности применения преобразования Фурье для диагностики композиционных материалов методом свободных колебаний // Там же. 2006. № 3. С. 24–26.
- Применение спектрального анализа в низкочастотных акустических дефектоскопах / Ю. В. Ланге, С. И. Воропаев, В. Ф. Мужицкий и др. // Дефектоскопия. — 1995. — № 10. — С. 74–83.
- 9. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. — М.: Мир, 1978. — 412 с.

Поступила в редакцию 25.12.2006



При виникненні у Вас пропозицій щодо неруйнівного та руйнівного контролю, технічного diarностування, технічного огляду (опосвідчення) вищеназваних об'єктів — ми готові до співпраці.

## УЗК СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ МАЛОГО ДИАМЕТРА ИЗ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗДЕЛЬНО-СОВМЕЩЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ХОРДОВОГО ТИПА

## В. А. ТРОИЦКИЙ, В. П. РАДЬКО, А. А. ЯРОВОЙ, Г. Е. КОСТЕНКО, Л. Г. КРАВЧУК, Г. В. БОРОВСКОЙ

Изложены особенности УЗК сварных соединений труб малого диаметра совмещенными наклонными преобразователями и раздельно-совмещенными хордовыми преобразователями. Приведены А-сканы дефектных и бездефектных зон, представленных на дефектограммах образцов труб диаметрами 159 и 219 мм. Показано, что уровень структурных шумов при контроле сварных швов труб из аустенитных сталей хордовыми преобразователями ниже, чем при контроле наклонными раздельно-совмещенными преобразователями.

The features of UT of welded joints of tubes by combined inclined transducers and RT chord transducers are considered. A-scans are given for defective and sound zones appearing in defectrographs of samples of pipes of 159 mm and 219 mm diameter. It is shown that the level of structural noise at inspection of welds on austenitic steel pipes by chord transducers is lower than at inspection by the inclined RT transducers.

С помощью разработанных и изготовленных хордовых и раздельно-совмещенных наклонных УЗ преобразователей, работающих на частоте 2,5 МГц, были проведены исследования на образцах сварных соединений труб диаметром 159 и 219 мм и толщиной соответственно 20 и 25 мм.

Рассмотрим особенности УЗ контроля сварных соединений труб совмещенными наклонными преобразователями и раздельно-совмещенными хордовыми преобразователями.

Низкая выявляемость объемных дефектов совмещенными наклонными преобразователями во многом определяется отражательной способностью дефектов этого типа. Так, в отличие от плоскостных дефектов, у которых отраженное поле носит остронаправленный характер, дефекты округлой формы рассеивают ультразвуковое поле диффузно и имеют круговую диаграмму направленности. Поле рассеяния на дефектах цилиндрической формы (канальные поры или свищи) при падении на них ультразвуковых волн под углом к оси, отличным от угла  $\pi/2$ , имеет форму конуса (рис. 1, а). При озвучивании дефекта цилиндрической формы совмещенным наклонным преобразователем направление поля отражения с максимальной интенсивностью не совпадает с направлением на приемник. В результате приемником воспринимаются сигналы, образованные переотражением от донной поверхности боковых низкоэнергетических колебаний поля отражения от дефекта.

На практике это подтверждается тем, что имеют место случаи, когда выходящие на поверхность свищи диаметром 2 мм и более, видимые нево-

оруженным глазом, не выявляются совмещенными наклонными преобразователями, в том числе и миниатюрными.

Еще одним фактором, существенно влияющим на выявляемость канальных пор, является коэффициент отражения (рис. 1,  $\delta$ ). При контроле совмещенными наклонными преобразователями озвучивание дефектов осуществляется вертикально поляризованной волной  $S_V$ . Поскольку угол ввода у этих преобразователей  $\alpha > 60^\circ$ , то при падении



Рис. 1. Поле рассеяния УЗ волн на дефектах цилиндрической формы при контроле совмещенными наклонными преобразователями (*a*) и зависимость коэффициента отражения волн  $S_V$  и *S*<sub>H</sub>-поляризации от угла падения на вертикально ориентированные дефекты ( $\delta$ )

© В. А. Троицкий, В. П. Радько, А. А. Яровой, Г. Е. Костенко, Л. Г. Кравчук, Г. В. Боровской, 2007



Рис. 2. Схема УЗ контроля кольцевых сварных швов раздельно-совмещенными хордовыми преобразователями

ультразвуковых колебаний на вертикально ориентированный дефект в виде свища возникают условия, при которых угол падения/отражения  $\beta_{\rm B}$  меньше третьего критического угла (34°), в этой области углов коэффициент отражения значительно меньше 1. Особенно это характерно для плоскостных дефектов типа трещин, поскольку известно, что 95 % трещин ориентированы вертикально с углом отклонения от вертикали  $\pm$ 7°. Соответственно и коэффициент отражения  $R_{\rm V}$  будет в области от 0,1 до 0,5.

Повышение выявляемости путем увеличения чувствительности системы преобразователь-дефектоскоп не дает желаемого результата из-за большого уровня акустических шумов, образованных поверхностной волной и отражениями от валиков усиления сварного шва. Кроме того, невозможность прозвучивания всего сечения сварного шва прямым лучом и невозможность работы в дальней зоне также отрицательно сказываются на общей выявляемости дефектов (особенно объемных).

Более эффективными для контроля кольцевых сварных швов являются раздельно-совмещенные хордовые пьезопреобразователи (хордовые ПЭП) (рис. 2), которые обеспечивают прозвучивание всего сечения сварного шва прямым лучом. При этом помехи, вызванные отражением от валиков усиления сварного шва, практически отсутствуют. Отмеченные особенности обусловлены геометрией распространения ультразвуковых волн в контролируемом изделии (угол встречи ультразвуковых лучей с валиками превышает 120°).

При контроле хордовыми ПЭП сварных швов дефекты последних озвучиваются смесью вертикально  $S_{\rm V}$ , и горизонтально  $S_{\rm H}$  поляризованных волн, причем компонента  $S_{\rm H}$  волны в смеси составляет 75...100 % в зависимости от геометрии контролируемого изделия и параметров хордового ПЭП.

Так, для хордовых преобразователей, предназначенных для контроля продольных сварных швов



Рис. 3. Схема контроля продольных сварных швов или основного металла трубы (прозвучивание поперек образующей) (*a*) и кольцевых сварных швов (б) хордовыми преобразователями

или основного металла трубы (прозвучивание поперек образующей) (рис. 3, *a*) угол наклона вектора поляризации U к плоскости падения–отражения составляет  $\pi/2$ . В этом случае на дефект падает и отражается горизонтально поляризованная волна  $S_{\rm H}$ . Соответственно коэффициент отражения от дефектов всегда равен 1.

При контроле кольцевых сварных швов (прозвучивание вдоль образующей трубы) (рис. 3,  $\delta$ ) угол наклона вектора поляризации  $\xi$  к плоскости падения–отражения меньше  $\pi/2$ . В этом случае на дефект падает и отражается смесь  $S_V$  и  $S_H$  волн, в которой преобладает горизонтально поляризованная волна (75 % и более). Для труб большого диаметра угол наклона вектора поляризации больше, следовательно выше и процент горизонтально поляризованной волны, соответственно больше и коэффициент отражения:

$$R = \sqrt{\sin^2 \xi R_{\rm H}^2 + \cos^2 \xi R_{\rm V}^2}$$

На рис. 4 показана зависимость эффективного коэффициента отражения от дефекта, причем представлен худший вариант, когда угол падения— отражения на дефекте равен третьему критичес-кому углу (34°), соответственно коэффициент отражения для  $S_V$  волны равен  $R_V = 0,1$ . Даже в этом случае общий коэффициент отражения смеси  $S_V$  и  $S_H$  волн не ниже 0,8. Отсюда видно, что чувствительность хордового преобразователя только



*Рис. 4.* Зависимость коэффициентов отражения смеси волн *S*<sub>V</sub>- и *S*<sub>H</sub>-поляризации от диаметра трубы

из-за более высокого коэффициента отражения на 18 дБ выше, чем у совмещенного наклонного.

Еще один путь повышения чувствительности, а как следствие, и выявляемости — повышение соотношения сигнал/помеха, т. е. снижение уровня акустических помех.

Наибольшее влияние на соотношение полезный сигнал/помеха оказывают поверхностная волна Рэлея; реверберационные шумы призмы преобразователя; отражения от валиков усиления сварного шва.

У хордовых преобразователей уровень отражений от валиков усиления сварного шва столь незначительный, что он практически не оказывает влияния на соотношение полезный сигнал/помеха, а реверберационные шумы призмы полностью отсутствуют, однако уровень помех от поверхностной волны приблизительно такой же величины, как у совмещенных наклонных преобразователей. Известно, что уровень поверхностной волны при контроле на цилиндрической поверхности выше, чем на плоскости, что объясняется искажением поля излучения на криволинейной границе раздела сред преобразователь–контролируемое изделие (рис. 5).

При прохождении ультразвука через границу раздела сред призма преобразователя-контролируемое изделие, имеющее цилиндрическую форму, углы ввода для центрального и периферических лучей оказываются различными, т. е. происходит расфокусировка поля излучения-приема преобразователя.

Существует область приблизительно 1/4 диаметра пьезопластины, ультразвуковые лучи от которой падают на границу раздела сред под углами, превышающими второй критический угол. В результате в этой области поперечная волна не вводится в изделие, т. е. ее коэффициент прозрачности равен нулю, а вся энергия ультразвуковых волн этой области дополнительно идет на образование поверхностной волны. Причем для совмещенных наклонных преобразователей коэффициент прозрачности носит аналогичный характер.



Рис. 5. Поле излучения ультразвуковых волн на криволинейной границе раздела сред преобразователь-контролируемое изделие

Для уменьшения уровня поверхностной волны и выравнивания чувствительности по сечению сварного шва между пьезопластиной и призмой хордовых преобразователей расположена цилиндрическая фокусирующая линза, образующая которой параллельна образующей трубы, а скорость распространения ультразвуковых волн в линзе  $C_1$ и ее радиус  $r_{\rm л}$  выбраны такими, чтобы компенсировать искажение поля на цилиндрической поверхности границы раздела сред призма-контролируемое изделие.

Практическая реализация этих положений позволила поднять соотношение полезный сигнал/помеха до 24 дБ относительно вертикально ориентированного цилиндрического отражателя диаметром 1,0 мм. Кроме того, это позволило выровнять чувствительность по высоте сварного шва неравномерность чувствительности не превышает 2...3 дБ.

При контроле сварных швов тонкостенных труб совмещенными преобразователями в качестве контрольного отражателя для настройки чувствительности традиционно используется зарубка, хотя ее недостатки общеизвестны. Оценка допустимости как объемных, так и плоскостных дефектов осуществляется интегрально по превышению величины амплитуды сигнала, отраженного от дефекта, над амплитудой сигнала от контрольного отражателя. При этом не учитывается тот факт, что отражательная способность (отношение амплитуд эхо-сигналов от отражателя и донного сигналов  $A_0/A_{\pi}$ ) объемных дефектов в 3...6 раз ниже отражательной способности плоскостных дефектов (рис. 6). Например, при настройке чувствительности по зарубке 2×0,8 мм недопустимыми



*Рис. 6.* Зависимости отражательной способности различного вида отражателей от их размеров: *1*, 2 — полоса шириной 2*b*, мм (1 —  $D = 32 \times 5$ ; 2 — 57 $\times 5$  мм); 3, 4 — диск диаметром 2*b*, мм (3 —  $D = 32 \times 5$ ; 4 — 57 $\times 5$  мм); 5, 6 — вертикально ориентированный цилиндр диаметром 2*b*, мм (5 —  $D = 32 \times 5$ ; 6 — 37 $\times 5$  мм); 7, 8 — сфера диаметром 2*b*, мм (7 —  $D = 32 \times 5$ ; 8 — 57 $\times 5$  мм)

будут все плоскостные дефекты, площадь которых превысит 1,6 мм<sup>2</sup>, в то же время не будут обнаруживаться одиночные поры диаметром 2,5 мм и менее даже на поисковом уровне чувствительности.

Таким образом, в зависимости от требований нормативной документации по результатам ультразвукового контроля по этой технологии возможны либо перебраковка плоскостных дефектов, либо недобраковка объемных. Решить это противоречие можно, если разбраковку объемных и плоскостных дефектов проводить дифференцированно, для чего необходимо распознавать тип дефекта. Определить тип дефекта с помощью совмещенного наклонного преобразователя не представляется возможным. С помощью хордового преобразователя вопрос можно решить, используя коэффициент формы  $K_{\phi}$ . Для этого необходимо измерить амплитуду отраженного от дефекта сигнала  $A_0$  одним из пьезопреобразователей хордового преобразователя в совмещенном режиме (функции излучателя и приемника совмещены), а затем в раздельном режиме (когда один из пьезопреобразователей является излучателем, а второй приемником)  $A_p$ , и вычислить коэффициент формы как отношение амплитуды сигнала, измеренного в совмещенном режиме, к амплитуде сигнала, измеренного в раздельном режиме;

$$K_{\oplus} = A_0 / A_3.$$

Предлагается методика дифференцированной разбраковки дефектов при контроле хордовыми преобразователями, в основу которой положен анализ типа дефектов (объемные и плоскостные) по коэффициенту формы с последующей оценкой их допустимости по АРД-диаграммам раздельно для объемных и плоскостных дефектов.

Хордовые преобразователи особенно эффективны для выявления объемных дефектов типа канальные поры (свищи), шлаки, поры, и плоских дефектов — трещин, непроваров и несплавлений.

При контроле сварных соединений труб диаметром 159 мм и толщиной стенки  $\delta = 20$  мм использовали два хордовых преобразователя: первый — для контроля верхней части сварного соединения (П122-Н159-2,5); второй — нижней (П122-Н159-2,5).

Получены соответствующие дефектограммы УЗК верхней и нижней частей образца сварного



*Рис.* 7. Дефектограмма верхней части шва образца трубы диаметром 159 мм, толщиной h = 20 мм: браковочная чувствительность на 12 дБ выше чувствительности, при которой амплитуда сигнала от плоскодонного отражателя диаметром 3 мм равна половине высоты экрана дефектоскопа







*Рис. 9.* Дефектограмма верхней (*a*) и нижней (*б*) части шва образца трубы диаметром 219 мм, толщиной *h* = 25 мм: браковочная чувствительность на 4 дБ выше чувствительности, при которой амплитуда сигнала от плоскодонного отражателя Ø = 3 мм равна половине высоты экрана дефектоскопа

соединения. На рис. 7 представлены дефектные и бездефектные участки верхней части шва. На рис. 8 приведены отображения А-сканов, указанных на дефектограмме участков шва 1...9 на рис. 7.

На дефектограмме показаны параметры контроля — браковочная чувствительность; вид отражателя плоскодонный отражатель диаметром 3 мм.

Исследования проводили с использованием дефектоскопа УД2-12 с блоком регистрации БР К615.176.001РЭ.

Для контроля верхней части сварного соединения диаметром 219 мм и толщиной стенки δ = = 25 мм применяли разработанный по данному договору хордовый преобразователь П122-Н219-2,5; для контроля нижней части — раздельно-совмещенный преобразователь П122-2,5-65-Н.

На рис. 9 приведены дефектограммы нижней и верхней части образца диаметром 219 мм и толщиной 25 мм.

Показаны отображения А-сканов от дефектных мест при прозвучивании верхней части — с помощью хордового преобразователя (рис. 10, *a*) и нижней — с помощью раздельно-совмещенного преобразователя с углом ввода 65° и работающего на частоте 2,5 МГц (рис. 10, б). Диаметр контактной поверхности преобразователя 219 мм.

Следует отметить, что уровень структурных шумов при контроле хордовыми преобразователями меньше уровня структурных шумов, полученных раздельно-совмещенными преобразователями.

Более низкий уровень структурных шумов сварных швов при контроле хордовыми преобразователями связан с тем, что акустическое поле хордовых преобразователей обусловлено, в основном, поперечными волнами *S*<sub>H</sub>-поляризации, вза-имодействие которых со структурными неоднородностями сварного соединения дает меньший уровень эхо-сигналов по сравнению с волнами *S*<sub>V</sub>-поляризации, которые преобладают при работе с традиционными наклонными и раздельно-совмещенными преобразователями.

## Выводы

Показана принципиальная возможность УЗК сварных соединений труб из аустенитных и низколегированных сталей с использованием хордовых преобразователей.





Определены контрольные отражатели для настройки браковочной чувствительности: плоскодонный отражатель диаметром 3 мм для контроля верхней и нижней части швов трубы диаметром 159 мм и верхней части трубы диаметром 219 мм. Вертикальное сверление диаметром 2 мм — для настройки браковочной чувствительности при контроле нижней части шва трубы диаметром 219 мм.

Получены дефектограммы при УЗК образцов диаметром 159 мм,  $\delta = 25$  мм.

Приведены А-сканы дефектных и бездефектных зон, представленных на дефектограмме образца диаметром 159 мм, а также А-сканы дефектных зон, представленных на дефектограммах образца диаметром 219 мм,  $\delta = 25$  мм.

При контроле образца диаметром 219 мм обнаружено, что уровни структурных шумов при

Рис. 10. Отображения сигналов в точках 1, 2, представленных на рис. 9, б (а) и эхо-сигналов в точках 3...5, указанных на рис. 9, а (б)

контроле хордовыми преобразователями ниже, чем при контроле раздельно-совмещенными преобразователями, что вероятно, обусловлено наличием горизонтально-поляризованных волн при контроле хордовыми преобразователями.

- 1. Неразрушающий контроль качества сварных соединений / В. А. Троицкий, В. П. Радько, В. Г. Демидко, В. Т. Бобров. — Киев: Техніка, 1986. — С. 159–161.
- 2. Яровой А. А. Хордовые преобразователи для ультразвукового контроля сварных швов труб малого диаметра / Материалы 8-го междунар. семинара-выставки «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики», Ялта, 2000. — С. 82-83.
- 3. Преобразователи УЗ контроля сварных швов труб малого диаметра / Л. Г. Кравчук, С. Л. Соколов, А. Ч. Ярко-вец, А. А. Яровой // Оборудование и инструмент для профессионалов. — 2006. — № 5. — С. 62–63.

Поступила в редакцию *19.01.2007* 

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, Киев,

ООО НПЦ «Диагностика и контроль», Николаев,

ЗАТ «Северодоникое объединение «Азот»

## ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ РЕНТГЕНОТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПЗС-КАМЕР И РЕНТГЕНОВСКИХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЭКРАНОВ

## Н. Г. БЕЛЫЙ, С. В. ДЕНБНОВЕЦКИЙ, А. В. ЛЕЩИШИН, С. Р. МИХАЙЛОВ, Н. В. СЛОБОДЯН, В. А. ТРОИЦКИЙ

Приведены теоретические и экспериментальные исследования рентгенотелевизионных систем на основе рентгеновского монокристаллического экрана из материала CsI(Tl) и телевизионных камер с использованием высокочувствительных ПЗС-матриц с микролинзовым массивом на поверхности (матрицы EXviev HAD) фирмы «Sony».

Given are the theoretical and experimental studies of X-ray TV systems based on X-ray single-crystal screen from CsI (T1) material and TV cameras using highly-sensitive CCD matrices with a microlens array on the surface (EXvie HAD matrices) of Sony Company.

Рентгенотелевизионные системы (РТВС) широко применяются для неразрушающего контроля качества материалов и изделий в промышленности. В настоящее время наиболее распространены РТВС с промежуточным преобразованием теневого рентгеновского изображения в оптическое с помощью рентгеновских экранов или рентгеновских электронно-оптических преобразователей (РЭОП), а также РТВС на основе рентгеновидиконов [1, 2]. РТВС с рентгеновскими экранами имеют ряд преимуществ перед РТВС на основе РЭОП: возможность смены рентгеновского экрана, что позволяет изменять размер рабочего поля и другие параметры РТВС; простота конструкции; низкая стоимость и др. Однако из-за низкой яркости свечения экранов в телевизионных камерах таких РТВС используются высокочувствительные преобразователи свет-сигнал. Так, в прикладной телевизионной установке «Интроскоп» используется высокочувствительная передающая электронно-лучевая трубка изокон ЛИ-801, а в ПТУ-84 супервидикон ЛИ-702. В последние годы в качестве преобразователей свет-сигнал в РТВС, выполненных главным образом на основе РЭОП, все шире используются ПЗС-матрицы. Этому способствуют известные преимущества ПЗС-матриц перед передающими трубками (минимальные геометрические искажения за счет фиксированной геометрии растра, отсутствие инерционности, большой срок службы и др.). В последние годы фирмой «Sony» разработана серия ПЗС-матриц, в которой высокая чувствительность, соизмеримая с чувствительностью изокона и супервидикона, достигается за счет микролинзового массива на поверхности матрицы (так называемые матрицы EXviev HAD CCD). Поэтому актуальны теоретические и экспериментальные исследования возможности применения телевизионных камер на таких матрицах в РТВС на основе распространенного рентгеновского монокристаллического экрана из материала CsI(Tl), а также определение относительной чувствительности контроля таких РТВС.

Методика расчета относительной чувствительности. Относительная чувствительность контроля РТВС определяет наименьший в направлении просвечивания относительный размер дефекта просвечиваемого объекта, который может быть выявлен оператором с помощью данной системы. Возможность выявления на фоне рентгеновского изображения объекта дефектов с теми или иными относительными размерами в направлении просвечивания зависит от контраста изображения дефекта, отношения сигнал/шум, которое обеспечивает система на выходе, соотношения разрешающей способности системы и поперечного размера дефекта, а также от характеристик зрительного анализатора человека (оператора) [3]. Предельные размеры дефекта в направлении просвечивания  $\Delta H_{1por}$ , при которых он еще может быть обнаружен с некоторой вероятностью, определяются из условия:

$$k_B = k_{por},\tag{1}$$

где  $k_B$  — яркостный контраст изображения дефекта;  $k_{por}$  — соответствующий пороговый контраст, связанный с уровнем шумов, который определяется значением порогового отношения сигнал/шум  $\psi_{por}$  и свойствами зрительного анализатора человека.

В соответствии с принципами, изложенными в [3], для случая РТВС с рентгеноэлектрическим преобразователем, состоящим из рентгеновского экрана и ПЗС-матрицы, можно записать:

© Н. Г. Белый, С. В. Денбновецкий, А. В. Лещишин, С. Р. Михайлов, Н. В. Слободян, В. А. Троицкий, 2007

$$k_B = K_S M(\nu). \tag{2}$$

Здесь  $K_S$  — значение зарядового контраста изображения; M(v) — пространственно-частотная характеристика (ПЧХ) рентгеноэлектрического преобразователя; v — пространственная частота, соответствующая поперечным размерам дефекта.

В свою очередь

$$k_{por} = \sqrt{k_b^2 + k_v^2},\tag{3}$$

где  $k_v$  — пороговый контраст зрительного анализатора;  $k_b$  — компонент порогового контраста, обусловленный шумом на изображении.

При вычислении  $k_b$  необходимо учесть путем деления на соответствующие коэффициенты уменьшение порогового отношения сигнал/шум вследствие интегрирования зрительным анализатором в пространстве и во времени [4]:

$$k_b = \frac{\Psi_{por}}{\sqrt{(T_i/T_{EX})(\Omega/A_{CCD})}} M(\nu) K_N.$$
(4)

Здесь  $K_N$ — относительная средняя флуктуация в расчете на площадь светочувствительного элемента ПЗС-матрицы за время накопления;  $T_i$  время интегрирования зрительным анализатором;  $T_{EX}$  — длительность кадра накопления;  $\Omega$  — площадь дефекта, приведенная к поверхности ПЗСматрицы;  $A_{CCD}$  — площадь светочувствительного элемента ПЗС-матрицы.

Для упрощения процедуры оценок в данной работе принято допущение, что характеристики изображения дефекта на экране видеоконтрольного устройства (яркостный и пороговый контрасты, отношение сигнала к шуму, пространственно-частотный спектр изображения) определяются исключительно характеристиками выходного сигнала рентгеноэлектрического преобразователя.

Выходной сигнал рентгеноэлектрического преобразователя на основе ПЗС-матрицы определяется электрическим зарядом Q, накапливаемым в светочувствительном элементе матрицы за время накопления, либо соответствующим ему количеством электронов Q/q, где q — заряд электрона. Значения фонового сигнала, соответствующего бездефектным участкам просвечиваемого образца толщиной  $H_1$ , можно определить как  $Q_{\phi}/q = Q(H_1)/q$ , а разностного полезного сигнала, соответствующего локальному утолщению (углублению) высотой (глубиной)  $\Delta H_1$  как:

$$\frac{Q_S}{q} = \pm \frac{Q(H_1 \pm \Delta H_1)}{q} \mp \frac{Q(H_1)}{q}.$$
(5)

Таким образом, зарядовый контраст сигнала от дефекта может быть выражен отношением

$$K_S = \frac{Q_S/q}{Q_{\Phi}/q}.$$
 (6)

Если принять во внимание, что наиболее совершенные из современных ПЗС-матриц характеризуются чрезвычайно низким уровнем собственных шумов [5], то уровень шумов количества накопленных электронов  $n_N$  определится квантовым шумом, связанным с флуктуациями светового потока, который, в соответствии с [6, 7], можно выразить следующим образом:

$$n_N = \sqrt{Q_{\phi}/q} \,. \tag{7}$$

Тогда относительная средняя флуктуация в расчете на площадь светочувствительного элемента за время накопления будет:

$$K_N = \frac{n_N}{Q_{\phi}/q} = \frac{1}{\sqrt{Q_{\phi}/q}}.$$
(8)

Таким образом, для определения минимального размера дефекта, который может быть обнаружен РТВС, целесообразно рассчитать в соответствии с (1)–(8) зависимости яркостного и порогового контрастов от размера дефекта. Тогда точка пересечения этих зависимостей определит минимальный размер дефекта и соответственно относительную чувствительность РТВС [3].

В основу используемой ниже математической модели преобразования сигналов в рентгеноэлектрическом преобразователе на основе рентгеновского экрана CsI(Tl) и ПЗС-матрицы положены результаты математического моделирования процесса формирования теневого рентгеновского изображения контролируемого объекта [8], физические принципы функционирования сцинтилляционных преобразователей излучения [9] и приборов с зарядовой связью [6, 7].

На основании сформированной таким образом математической модели можно записать выражения для количества накопленных в элементарной ячейке ПЗС-матрицы электронов, которые соответствуют разностному сигналу от дефекта в просвечиваемом объекте  $Q_S(H_1, \Delta H_1)/q$  (т. е. полезному сигналу) и сигналу от бездефектного участка объекта  $Q_{\phi}(H_1)/q$  (фоновому сигналу):

$$\frac{Q_{S}(H_{1}, \Delta H_{1})}{q} = K_{opt} N_{k} T_{EX} A_{CCD} \times \frac{\int_{\lambda_{2}}^{\lambda_{2}} \varphi_{nS}(\lambda) F(\lambda) \lambda d\lambda}{\times \frac{C_{ef} \lambda_{1}}{hc} + \infty} \times \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_{nS}(\lambda) d\lambda$$

$$\sum_{0}^{E_{\max}} N_{0}(E) \exp \left[-\mu_{1}(E)H_{1}\right] (1 - \exp \left[-\mu_{1}(E)\Delta H_{1}\right]) \times \\ \times (1 - \exp \left[-\mu_{S}(E)H_{S}\right])EdE,$$
(9)

$$\frac{Q_{\phi}(H_{1})}{q} = K_{opt}N_{k}T_{EX}A_{CCD} \frac{C_{ef}}{hc}B(E_{max}) \times \int_{\lambda_{2}}^{\lambda_{2}} \phi_{nS}(\lambda)F(\lambda)\lambda d\lambda \times \frac{\lambda_{1}}{\int_{-\infty}^{+\infty}} \phi_{nS}(\lambda)d\lambda$$
(10)

$$\underset{0}{\overset{E_{\max}}{\times}} \int_{0}^{E} N_0(E) \exp\left[-\mu_1(E)H_1\right] \exp\left[-\mu_S(E)H_S\right] E dE,$$

где энергетический спектр плотности потока рентгеновских квантов

$$N_0(E) = \frac{k_1 I_A Z(E_{\max} - E)}{r^2 E} \times \exp\left[-\frac{\mu_m(E) \operatorname{ctg}\Theta}{\rho_m C_{TB}(E_{\max})} (E_{\max}^2 - E^2) - \mu_0(E) H_0\right], \quad (11)$$

 $k_1 = 1,1 \cdot 10^{12}$  квант/А с-кэВ; Z — атомный номер материала анода; Е — энергия квантов рентгеновского излучения, кэВ; Е<sub>тах</sub> — максимальная энергия квантов, кэВ (численно равная напряжению на аноде рентгеновской трубки  $U_A$ , кВ);  $I_A$  — анодный ток, А; r — расстояние от анода трубки до объекта, см; H<sub>0</sub>, H<sub>S</sub> — толщины выходного окна рентгеновской трубки и монокристаллического экрана, см;  $\mu_m(E)$ ,  $\mu_0(E)$  и  $\mu_1(E)$  — линейные коэффициенты ослабления рентгеновского излучения материалов анода, окна рентгеновской трубки и контролируемого образца, см<sup>-1</sup>;  $\mu_S(E)$  — линейный коэффициент истинного поглощения материала монокристаллического экрана, см<sup>-1</sup>;  $\rho_m$  — плотность материала анода, г/см<sup>3</sup>;  $\Theta$  — угол наклона анода;  $C_{\text{TB}}(E_{\text{max}})$  — константа Томсона-Виддингтона; *B*(*E*<sub>max</sub>) — фактор накопления рассеянного излучения, который зависит от ускоряющего напряжения рентгеновской трубки, материала объекта и его толщины;  $K_{opt}$  — коэффициент передачи оптической системы;  $N_k$  — количество кадров накопления; *Т*<sub>*EX*</sub> — длительность кадра накопления, с; C<sub>ef</sub> — конверсионная эффективность рентгеновского монокристаллического сцинтилляционного экрана; λ — длина волны оптического излучения, см;  $F(\lambda)$  — зависимость квантовой эффективности ПЗС-матрицы от длины волны оптического излучения;  $\phi_{nS}(\lambda)$  — нормированная спектральная характеристика излучения монокристаллического экрана;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  ограничивают диапазон длин волн, в котором произведение характеристик  $\varphi_{nS}(\lambda)$  и  $F(\lambda)$  не равно нулю; h — постоянная Планка; c — скорость света.

Теоретические и экспериментальные исследования. Для теоретических и экспериментальных исследований были выбраны две телевизионные камеры на основе наиболее высокочувствительных EXviev HAD ПЗС-матриц фирмы «SONY» формата 1/2" (размер диагонали 8 мм) с количеством активных светочувствительных элементов 752×582 [10, 11]. Одна из камер типа КТ-62.013 разработана ОКБ «ТЕКОН-ЭЛЕКТРОН» ОАО «КОН-ЦЕРН-ЭЛЕКТРОН» (г. Львов) на основе матрицы ICX-249AL [12]. Вторая камера типа VSC-746 производится ЗАО ЭВС (Санкт-Петербург, Россия) на основе матрицы ICX-429ALL [13]. Параметры ПЗС-матриц ICX-249AL и ICX-429ALL примерно одинаковы. Обе камеры работали в вещательном стандарте разложения изображения (625 строк, 25 кадров в сек., развертка чересстрочная). Камера КТ-62.013, наряду с вещательным стандартом разложения, имела возможность работы в режиме регулируемой длительности накопления изображения на матрице (до 32-х кадров) и в режиме накопления четырех соседних элементов. Камера КТ-62.013 снабжена объективом типа Xenoplan фирмы «Schneider Kreuznach» с относительным отверстием 1:1.7 и фокусным расстоянием 17 мм, а камера VSC-746 — объективом типа Computar Н1214 с относительным отверстием 1:1.4 и фокусным расстоянием 12 мм.

В экспериментальных исследованиях использовали рентгеновский аппарат РАП-150/300 с трубкой 1,2-3БПМ5-300, имеющей вольфрамовый анод с углом наклона  $\Theta = 19^{\circ}$  и выходное бериллиевое окно толщиной 4 мм [14]. В качестве контролируемых объектов использовали соединенные методом сварки стальные пластины толщиной  $H_{kz} = 10, 20$  и 30 мм. Для преобразования теневого рентгеновского изображения в оптическое применялся монокристаллический экран из материала CsI(Tl) диаметром 200 мм и толщиной 4 мм. Для переноса изображения с экрана на вход телевизионных камер использовали угловую оптическую приставку с зеркалом. Коэффициент уменьшения изображения при переносе изображения с экрана на ПЗС-матрицу составлял δ = 21,5 для камеры КТ-62.013 и δ = 30,4 для камеры VSC-746. Измерения относительной чувствительности контроля проводили с помощью соответствующих ГОСТ 7512-82 канавочных (Fe-1, Fe-2) и проволочных (Fe-2, Fe-3) эталонов чувствительности [15]. Сварные соединения стальных пластин с эталонами для измерения чувствительности контроля размещали в непосредственной близости к монокрис-
таллическому экрану. Расстояние между анодом рентгеновской трубки и монокристаллическим экраном составляло 400 мм.

При расчете относительной чувствительности контроля с помощью приведенной в математической модели справочные данные по энергетической зависимости массовых коэффициентов ослабления для W (материала анода рентгеновской трубки), Ве (материала выходного окна рентгеновской трубки), Fe (материала контролируемых объектов) и массовых коэффициентов истинного поглощения для Cs и I (элементов монокристаллического экрана) взяты из работы [16]. При этом массовый коэффициент истинного поглощения CsI(Tl) pacсчитывали по формуле для сложных соединений путем сложения произведений массовых доль каждого элемента соединения и его массового коэффициента истинного поглощения. Линейные коэффициенты ослабления и истинного поглощения  $\mu_m(E)$ ,  $\mu_0(E)$ ,  $\mu_1(E)$  и  $\mu_S(E)$  получали умножением массовых коэффициентов на плотность соответствующих материалов.

Коэффициент передачи оптической системы камер определяли как

$$K_{opt} = \xi \frac{K_{pr}}{4D^2},\tag{12}$$

где  $K_{pr} = 0,85$  — коэффициент пропускания объектива; диафрагма объектива D = 1,7 для камеры KT-62.013 и D = 1,4 для камеры VSC-746;  $\xi = 0,7$  — коэффициент потерь оптической системы.

Таким образом,  $K_{opt} = 0.05$  для камеры КТ-62.013 и  $K_{opt} = 0.075$  для камеры VSC-746. Пло-щадь светочувствительного элемента ПЗС-матрицы  $A_{CCD} = L_{py} \times L_{pz} = 0,71 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$ ; конверсионная эффективность сцинтиллятора CsI(Tl)  $C_{ef} = 0,06$ [9]. Нормированная спектральная зависимость излучения сцинтиллятора CsI(Tl)  $\phi_{nS}(\lambda)$  взята из работы [9]. Фактор накопления рассеянного излучения  $B(E_{max})$ , который учитывается при вычислении фонового сигнала, в соответствии с работой [8] определяли по формуле:  $B(H_1, E_{\text{max}}) = 1 + 0.013(E_{\text{max}}H_1)^{0.8}$ . Толщина объекта для случая использования проволочных эталонов равна толщине контролируемого образца:  $H_1 = H_{kz}$ , а размер дефекта — диаметру эталонной проволоки:  $\Delta H_1 =$ = d. Для случая использования канавочного эталона толщина объекта равна сумме толщин контролируемого образца и эталона:  $H_1 = H_{kz} + h_e$ , а размер дефекта — глубине канавки, значение которой берется с противоположным знаком:  $\Delta H_1 =$  $= -h_k$ . Пространственную частоту дефекта определяет ширина канавки b. Площадь дефекта Ω, приведенная к поверхности ПЗС-матрицы, определяли как  $\Omega = b^2/\delta^2$  и  $\Omega = d^2/\delta^2$  при использовании канавочних и проволочных эталонов соответственно.

Как показало сопоставление ПЧХ ПЗС-матриц ICX-429ALL и ICX-249AL (оцененной в соответствии с работой [6]) с одной стороны, и пространственных частот использованных эталонных проволок и канавок (оценки выполнены в соответствии с работой [3]) с другой, эффект пространственной фильтрации в данных условиях несущественен (M(v) не опускается ниже 95 %) и в настоящих вычислениях не принимался во внимание.

Время интегрирования зрительным анализатором принимали равным  $T_i = 0,1$  с, значение порогового зрительного контраста  $k_v = 2$  %, а пороговое отношения сигнал/шум  $\psi_{por} = 3$  [3, 17].

Сопоставление результатов экспериментальных и теоретических исследований. Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице для камеры КТ-62.013 и камеры VSC-746. В таблице указаны ускоряющее напряжение рентгеновской трубки U<sub>A</sub>, толщина контролируемого стального объекта *H*<sub>kz</sub> и количество кадров накопления ПЗС-камеры N<sub>k</sub>. Анодный ток рентгеновской трубки поддерживался постоянным и составлял 10 мА. Результаты измерений представлены указанием номера наименьшей по глубине обнаруженной канавки (в скобках указаны номера канавок, которые намечались) и наименьшей по диаметру обнаруженной проволоки, с обозначением типов соответствующих эталонов (Fe-1, Fe-2 или Fe-3), а также экспериментальными значениями относительной чувствительности контроля K<sub>k</sub> и K<sub>d</sub>. Для сравнения в таблице представлены значения  $K_k$  и  $K_d$ , вычисленные с помощью математической модели, описанной ранее.

Из таблицы видно, что при работе камеры КТ-62.013 в вещательном стандарте разложения наилучшая относительная чувствительность по канавочному эталону составляет  $K_k = 3,3 \%$  для толщины объекта  $H_{kz} = 10$  мм,  $K_k = 2,1$  % для тол-щины  $H_{kz} = 20$  мм и  $K_k = 2,9$  % для толщины  $H_{kz} =$ = 30мм. Перевод камеры КТ-62.013 в режим накопления телевизионных кадров значительно улучшает относительную чувствительность контроля. Так, накопление 32-х кадров для толщин  $H_{kz} = 10$  мм и  $H_{kz} = 30$  мм улучшает чувствительность приблизительно в два раза (с 3,3 в п. 1 до 1,7 % в п. 3 и с 2,9 в п. 6 до 1,5 % в п. 7). Для толщины  $H_{kz} = 20$  мм чувствительность по проволочному эталону при накоплении 32-х кадров увеличилась в 2,5 раза (см. п. 4 и 5). Для этой толщины при накоплении 32-х кадров чувствительность по канавочному эталону составляла менее 2 % (наблюдались все канавки эталона Fe-2), т. е. в п. 5 измерение чувствительности следовало бы проводить по эталону Fe-1. Накопления четырех соседних элементов позволяет улучшить

# НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

	Канавочный эталон		Проволочный эталон						
Номер	<i>U</i> A, кВ	<i>H</i> <sub>kz</sub> , мм	Nk	Номер канав- ки и тип этало- на	<i>K<sub>k</sub></i> , % (эксп.)	<i>К<sub>k</sub></i> , % (выч.)	Номер прово- локи и тип эта- лона	<i>K</i> <sub>d</sub> , % (эксп.)	<i>К</i> <sub>d</sub> , % (выч.)
KT-62-013									
1	130	10	1	3 Fe-1	3,3	1,67		_	—
2	160	10	1	3 Fe-1	3,3	1,67		_	—
3	160	10	32	5 Fe-1	1,67	1,67	2 Fe-2	3,2	3,2
4	180	20	1	6 Fe-2	2,1	2,1	2 Fe-3	5	2
5	180	20	32	6 Fe-2	2,1	2,1	6 Fe-3	2	1,6
6	200	30	1	3 Fe-2 (4 Fe-2)	3,68 (2,9)	1,47		_	
7	200	30	32	6 Fe-2	1,47	1,47	4 Fe-3	2,1	1,67
VSC-746							-		
1	130	10	1	4 Fe-1 (5 Fe-1)	2,5 (1,67)	2,5	—		
2	140	10	1	4 Fe-1 (5 Fe-1)	2,5 (1,67)	1,67		_	
3	160	10	1	5 Fe-1	1,67	1,67		_	
4	160	20	1	2 Fe-1 (6 Fe-2)	2,27 (2,1)	2,27 (2,1)		_	—
5	180	20	1	3 Fe-1 (6 Fe-2)	1,8 (2,1)	1,8 (2,1)	3 Fe-3	4	2,5
6	200	20	1	2 Fe-1	2,27	1,8	4 Fe-3	3,15	2,5
7	200	30	1	6 Fe-2	1,47	1,47	—	_	—

Экспериментальные (эксп.) и вычисленные (выч.) значения относительной чувствительности контроля РТВС на основе камер КТ-62.013 и VSC-746

чувствительность по канавочному эталону в 1,3 раза, однако режим накопления элементов уменьшает разрешающую способность системы (в ряде случаев проволочный эталон на изображении вообще не наблюдался).

Данные таблицы свидетельствуют, что камера VSC-746, которая может работать лишь в вещательном стандарте разложения, обеспечивает наилучшую относительную чувствительность по канавочному эталону  $K_k = 1,7 \%$  для толщины объекта  $H_{kz} = 10$  мм,  $K_k = 1,8 \%$  для толщины  $H_{kz} = 20$  мм и  $K_k = 1,5 \%$  для толщины  $H_{kz} = 30$  мм. По проволочному эталону наилучшая чувствительность для толщины  $H_{kz} = 20$  мм составила 3,2 %.

Таким образом, камера VSC-746 показала относительную чувствительность, которая в 2 раза превысила аналогичный параметр для камеры КТ-62.013 в вещательном стандарте разложения, и, фактически, достигла показателей камеры КТ-62.013 при ее работе в режиме накопления 32-х кадров. Это обусловлено наличием у камеры VSC-746 более светосильного объектива, а также эффективной автоматической регулировки усиления (АРУ) с глубиной регулировки 32 дБ и автоматическим смещением уровня черного.

Для теоретического расчета относительной чувствительности в соответствии с формулами (1)–(12) вычисляли зависимости контраста выходного сигнала ПЗС-матрицы и порогового контраста от размера дефекта для тех же условий, для которых осуществлялись эксперименты, с использованием параметров камер КТ-62.013 и VSC-746. Графики рассчитанных зависимостей представлены на рис. 1 и рис. 2 для камер КТ-62.013 и VSC-746 соответственно. На рисунках на шкале толщин отмечены размеры, соответствующие эталонам.

Зависимости, приведенные на рис. 1, *a*, соответствуют:

канавочному эталону Fe-1:  $I - k_B$  при  $H_{kz} =$ = 10 мм,  $U_A = 130$  кВ, I' — соответствующее  $k_{por}$ при  $N_k = 1$ ;  $2 - k_B$  при  $H_{kz} = 10$  мм,  $U_A = 160$  кВ, 2' — соответствующее  $k_{por}$  при  $N_k = 1$ , 2'' — при  $N_k = 32$ ;

рис. 1, б — канавочному эталону Fe-2:  $I = k_B$  при  $H_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 180$  кВ; I' — соответствующее  $k_{por}$  при  $N_k = 1$ , I'' — при  $N_k = 32$ ;  $2 = k_B$  при  $H_{kz} = 30$  мм,  $U_A = 200$  кВ, 2' — соответствующее  $k_{por}$  при  $N_k = 1$ , 2'' — при  $N_k = 32$ ;

рис. 1,  $e - проволочным эталонам: 1 - k_B$ при  $H_{kz} = 10$  мм,  $U_A = 160$  кВ,  $1' - соответствующее <math>k_{por}$  при  $N_k = 32$ ;  $2 - k_B$  при  $H_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 180$  кВ,  $2' - соответствующее <math>k_{por}$  при  $N_k = 1$ ,  $2'' - при N_k = 32$ ;  $3 - k_B$  при  $H_{kz} = 30$  мм,  $U_A = 200$  кВ,  $3' - соответствующее <math>k_{por}$  при  $N_k = 32$ .

Зависимости, приведенные на рис. 2, *a*, соответствуют канавочному эталону Fe-1:  $I - k_B$  при  $H_{kz} = 10$  мм,  $U_A = 130$  кВ;  $2 - k_B$  при  $H_{kz} = 10$  мм,  $U_A = 140$  кВ;  $3 - k_B$  при  $H_{kz} = 10$  мм,  $U_A = 160$  кВ;  $4 - k_B$  при  $H_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 160$  кВ;  $5 - k_B$  при  $H_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 180$  кВ;  $6 - k_B$  при  $H_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 200$  кВ;



Рис. 1. Зависимости контраста выходного сигнала ПЗС-матрицы  $k_B$  (сплошные линии) и порогового контраста  $k_{por}$  (штриховые линии) для камеры КТ-62.013 от размера дефекта  $\Delta H_1$  для канавочного эталона Fe-1 (*a*); Fe-2 (*б*) и проволочных эталонов Fe-2, Fe-3 (*в*) (обозначения кривых см. в тексте)

рис. 2,  $\delta$  — канавочному эталону Fe-2: I —  $k_B$  при  $H_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 160$  кВ;  $2 - k_B$  при  $H_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 180$  кВ;  $3 - k_B$  при  $H_{kz} = 30$  мм,  $U_A = 200$  кВ;

рис. 2, в — проволочным эталонам:  $I - k_B$ при  $H_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 180$  кВ;  $2 - k_B$  при  $H_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 200$  кВ.

Характеристики, номер которых отмечен штрихом, обозначают соответствующее  $k_{por}$  при  $N_k = 1$ .

Из представленных на рис. 1, 2 зависимостей видно, что контраст выходного сигнала матрицы в рассмотренном диапазоне линейно возрастает с увеличением размера дефекта (глубины канавки и диаметра проволоки). Соответствующий угол



Рис. 2. Зависимости контраста выходного сигнала ПЗС-матрицы  $k_B$  (сплошные линии) и порогового контраста  $k_{por}$  (штриховые линии) для камеры VSC-746 от размера дефекта  $\Delta H_1$  для канавочного эталона Fe-1 (*a*); Fe-2 (*б*) и проволочных эталонов Fe-2, Fe-3 (*в*) (обозначения кривых см. в тексте)

наклона характеристики тем меньше, чем больше толщина контролируемого образца и чем выше напряжение на аноде трубки. Значение  $k_{por}$  уменьшается при увеличении площади, на которой происходит интегрирование квантов и при увеличении времени, на протяжении которого оно осуществляется, в частности, в режиме регулируемой длительности накопления. Значение  $k_{por}$  крайне слабо зависит от глубины (толщины) дефекта. Для канавочних эталонов, у которых поперечные размеры канавок (ширина *b*) одинаковые, соответствующие зависимости порогового контраста имеют вид линий, параллельных оси абсцисс. Для

# НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

проволочных эталонов, толщина проволоки которых равна ее поперечному размеру (диаметру d), форма зависимостей более сложная и пороговый контраст уменьшается с увеличением диаметра проволоки.

Определение значений относительной чувствительности осуществлялось на основе наименьшей по глубине канавки канавочного эталона или наименьшего по диаметру проволочного эталона, для которых выполняется критерий (1) (т. е. ближайшее со стороны больших размеров значение глубины или диаметра эталона относительно точки пересечения соответствующих кривых на рис. 1, 2). Вычисленные на основе таких принципов расчетные значения относительной чувствительности помещены для сравнения рядом с соответствующими экспериментальными значениями в таблице.

Видно, что расчетные оценки относительной чувствительности достаточно хорошо согласуются с экспериментальными. Различия расчетных и экспериментальных оценок в основном наблюдаются при использовании проволочных эталонов чувствительности. Причиной такого различия для проволочных эталонов может быть то, что при расчетах не учитывалась пространственная фильтрашия изображений в рентгеноэлектрическом преобразователе. Вместе с тем пространственная фильтрация больше проявляется как раз при использовании проволочных эталонов.

### Выводы

Телевизионные камеры КТ-62.013 и VSC-746 в вещательном стандарте разложения с монокристаллическим рентгенооптическим преобразователем CsI(Tl) при неразрушающем контроле стальных объектов толщиной до 30 мм обеспечивает относительную чувствительность контроля не хуже относительной чувствительности контроля прикладных телевизионных установок ПТУ «Интроскоп» на изоконе ЛИ-801 и ПТУ-84 на супервидиконе ЛИ-702.

Телевизионная камера VSC-746 в вещательном стандарте разложения при прочих равных условиях обеспечивает относительную чувствительность контроля, превосходящую почти в 2 раза аналогичный показатель для камеры КТ-62.013.

Перевод телевизионной камеры КТ-62.013 в режим накопления кадров позволяет улучшить относительную чувствительность контроля в 2...2,5 раза.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Нац. техн. ун-т Украины «КПИ», Киев

Использование режима накопления элементов в камере КТ-62.013 нецелесообразно из-за уменьшения разрешающей способности рентгенотелевизионной системы.

Разработанная математическая модель рентгеноэлектрического преобразователя на основе рентгеновского монокристаллического экрана CsI(Tl) и ПЗС-матрицы оптического диапазона ІСХ-429ALL (ICX-249AL) хорошо соответствует реальному прототипу и может быть использована для выполнения предварительных оценок технических характеристик разрабатываемых рентгенотелевизионных систем.

- 1. Дефектоскопические рентгенотелевизионные системы высокой чувствительности / С. В. Денбновецкий, В. А. Троицкий, Н. Г. Белый и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1997. — № 4. — С. 13-22.
- Денбновецкий С. В., Лещишин А. В., Михайлов С. Р. Высокочувствительные рентгенотелевизионные системы неразрушающего контроля на основе электронно-лучевых приборов // Электроника и связь. — Тем. вып. «Проблемы электроники». — 2005. — Ч. 1. — С. 72-81.
- 3. Гурвич А. М. Физические основы радиационного контроля и диагностики. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 168 с.
- 4. Luhta R., Rowlands J. A. Feasibility of a large area X-ray sensitive vidicon for medical fluoros- copy: signal and noise factors // Med. Phys. — 1997. — 24,  $N_{\text{P}}$  5. —  $\vec{P}$ . 609 — 620.
- Diagonal 8 mm (Type 1/2) CCD Image Sensor for CCIR B/W Video Cameras ICX429ALL. //www.sony.net.
- 6. Носов Ю. Р., Шилин В. А. Основы физики приборов с зарядовой связью. — М.: Наука, 1986. — 320 с.
- 7. Быков Р. Е., Фрайер Р., Иванов К. В., Манцветов А. А. Цифровое преобразование изображений / Под ред. Р. Е. Быкова. - М.: Горячая линия-Телеком, 2003. — 228 с.
- 8. Михайлов С. Р. Моделирование теневого рентгеновского изображения контролируемого объекта в рентгеноскопических системах неразрушающего контроля // Электроника и связь. — 2002. — № 16. — С. 59–70.
- 9. Абрамов А. И., Казанский Ю. А., Матусевич Е. С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 488 с
- Майоров В., Овчинников Л. ССД-матрицы компании 10. SONŶ. Что выбрать? //www.videoscan.ru.
- SONY B/W Video Camera CCD. //www.sony.net/Pro-11. ducts/SC-HP/pro/image\_senser/bw\_video.html.
- 12. Денна телевізійна камера КТ-62.013 //www.tecon.lviv.ua.
- Внутренние ТВ камеры. Сер. V-С //www.evs.ru.
   Рентгенотехника. Справ.: В 2-х кн. Кн.2. / А. А. Алтухов, К. В. Анисович, Х. Г. Бергер и др. — 2-е изд., доп. / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1992. -431 c.
- 15. ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. — М.: Издательство стандартов, 1983. — 30 с.
- Сторя Э., Исраэль Х. Сечения взаимодействия гамма-16. излучения (для энергий 0,001...100 мэВ и элементов с 1 по 100). Справ. / Пер. с англ. — М.: Атомиздат, 1973. 256 c.
- 17. Роуз А. Зрение человека и электронное зрение / Пер. с англ. — М.: Мир, 1977. — 216 с.

Поступила в редакцию 20.12.2006

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРОВ ТРЕЩИНОПОДОБНЫХ НЕСПЛОШНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВОЛН ДИФРАКЦИИ

### Е. А. ДАВЫДОВ

Приведены результаты эксперимента по измерению размеров трещиноподобных несплошностей с помощью волн дифракции. Все данные получены с использованием традиционной технологической базы V3 контроля.

Given are the results of an experiment on variation of the dimensions of cracklike discontinuities by diffracted waves. All the data were obtained using the traditional technological base of UT control.

Целью данной статьи является демонстрация возможности использовать традиционную технологию проведения измерений (включая аппаратную базу) УЗ неразрушающего контроля (НК) для оценки размеров трещиноподобных несплошностей си помощью краевых волн. В настоящее время существует большое количество публикаций об использовании краевых волн для точного определения размеров несплошностей с помощью специализированных дефектоскопов. В Украине действует стандарт [1], регламентирующий правила проведения измерений с помощью краевых волн и требования к оборудованию. Использование положений указанного стандарта возможно с позиционированием преобразователей и накоплением результатов измерений, что само по себе уже представляет сложность для широкого использования метода измерений размеров несплошностей при помощи краевых волн. Поэтому была предпринята попытка провести исследование точности измерений размеров внутренних трещиноподобных несплошностей, используя только традиционную техническую базу УЗ контроля.

Для проведения измерений использовали плоские образцы толщиной  $50 \pm 0,05$  мм (рис. 1). Трещиноподобные несплошности имитировали резом разной высоты, выполненным электроискровым методом. Глубина реза *h* составляла 15, 25, 35 мм от поверхности ввода с погрешностью  $\pm 0,05$  мм. Ширина реза составляла 0,1 мм. Шероховатость рабочей поверхности экспериментальных образцов не хуже  $R_Z$  20 мкм.

Для обеспечения фиксации преобразователей, их соосности, удобства перемещения и возможности изменения расстояния между преобразователями было изготовлено специальное механическое устройство. Для настройки и калибровки использовали стандартные образцы СО-2, СО-3. Все исследования проводили с помощью УЗ дефектоскопа УД2-12. Данный дефектоскоп не оптимален

© Е. А. Давыдов, 2007

для работы с краевыми волнами, в частности, нет возможности наблюдать радиосигнал, что существенно ограничивает фазовый анализ. Выбор дефектоскопа с ограниченными возможностями был сделан сознательно. Для улучшения соотношения сигнал/шум применяли предварительный усилитель, что было единственным отличием в использовании дефектоскопа от стандартной версии. Использовали преобразователи A533S (2 МГц), V535 (5 МГц) производства «Panametric» со сменными призмами из органического стекла с углами ввода продольной волны в металл α, град: 20±2, 30±2, 35±2, 40±2, 45±2, 50±2, 55±2, 60±3, 65±3, 70±3, 80±3. Использование данных преобразователей объясняется удачными конструктивными особенностями, позволяющими легко крепить их к плексигласовой призме. Определение точки выхода УЗ луча и времени задержки в призме выполнялось на образце СО-3 обычным способом. Проверку угла ввода проводили по образцу СО-2. Статистические методы для повышения точности измерений не использовали.

Скорость распространения ультразвуковых волн в металле определяли непосредственно на экспериментальных образцах по формуле



*Рис. 1.* Геометрические характеристики экспериментальных образцов (*h* = 15, 25, 35 мм)



$$C_L = 2l/\Delta t$$
,

где *l* — толщина образца;  $\Delta t$  — время прохождения УЗ волной расстояния поверхность ввода–донная поверхность–поверхность ввода.

Измерение времени прихода УЗ волны определяли по максимуму сигнала электрического импульса. Следует отметить, что данный способ не позволяет выполнять измерения с наименьшей погрешностью, но является достаточно простым в использовании и поддерживается практически всеми дефектоскопами.



Рис. 3. Результаты экспериментального определения погрешности измерений высоты реза по схеме рис. 2 для закрытых (а) и открытых (б) преобразователей («Рапатеtric»,  $2M\Gamma$ ц). Уравнения регрессий у получены по методу наименьших квадратов

*Рис. 2.* Схема измерения высоты трещины: *а* — открытые; *б* — закрытые ПЭП

Общая схема измерения высоты трещины представлена на рис. 2. Центрированное положение преобразователей относительно кромки реза определяли по минимальному времени прохождения УЗ волны пути ПЭП 1 (2) – кромка реза – ПЭП 2 (1). При проведении измерений выполнялось правило: для любых расстояний *S* вершина реза должна находиться на пересечении угловых диапазонов раскрытия основных лепестков диаграммы направленности, что обеспечивалось соответствующим подбором углов ввода преобразователей.

Глубину залегания вершины реза (для случая симметричного расположения преобразователей) определяли по формуле:



Рис. 4. Результаты экспериментального определения погрешности измерения высоты трещин по схеме рис. 2 для закрытых (*a*) и открытых ( $\delta$ ) преобразователей («Panametric», 5 МГц). Уравнения регрессий получены по методу наименьших квадратов (условные обозначения те же, что и на рис. 3)



Рис. 5. Расчетные погрешности положения вершины трещины

$$H = \sqrt{(C_L (\Delta T - \Delta T_{\rm np})/2)^2 + (S/2)^2},$$

где  $C_L$  — скорость продольной волны в материале; S — расстояние между точками ввода преобразователей (ПЭП 1 и ПЭП 2);  $\Delta T$  — время распространения волны от ПЭП 1 до ПЭП 2;  $\Delta T_{\rm np}$  суммарное время распространения УЗ волны в призмах преобразователей ПЭП 1 и ПЭП 2.

Погрешность измерений *ΔН* определяли по формуле

$$\Delta H = H_{\text{uct}} - H_{\text{s}}$$

где  $H_{\rm ист}$  — действительная глубина залегания вершины трещины, выполненная с погрешностью  $\pm 0.05$  мм.

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

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

Результаты измерений для открытых и закрытых преобразователей представлены на рис. 3, 4.

Для сравнительного анализа на рис. 5 приведены аналогичные расчетные погрешности измерения глубины реза [2] ( при расчете принимали  $\Delta R = 0,3 + 0,002R$ ,  $\Delta S = 0,5$  мм, где R, мм — расстояние от ПЭП 1 – кромка реза – ПЭП 2).

### Выводы

Использование традиционных технологических приемов настройки (калибровки) оборудования позволяет достигать практически значимых погрешностей в измерении размеров трещиноподобных несплошностей, по крайней мере, начиная с глубин залегания кромки трещины (от поверхности ввода) более 15 мм погрешность измерения не превышает 2 мм.

Приведенный способ измерения нельзя рассматривать как эквивалентную замену специализированным системам с механическим сканированием и накоплением результатов контроля.

Поступила в редакцию 21.03.2007

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Журнал «Техническая диагностика и неразрушающего контроль» входит в перечень утвержденных ВАК Украины изданий, публикации в котором засчитываются как обязательные для соискателей ученых степеней.

ВАК Украины принял постановление от 15.01.2093 г. № 7-05/01 «Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліків ВАК України». В соответствии с этим постановлением редакционные коллегии научных специализированных изданий, признаваемых ВАК, должны принимать к печати только те статьи, которые имеют следующие необходимые элементы:

- постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными или практическими заданиями
- анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы
- и на которые ссылается автор;
- выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которой посвящена данная статья
- формулировка целей статьи (постановка задачи);
- изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов;
- выводы из представленного исследования и перспективы дальнейших исследований в данном направлении.

Специализированным ученым советам при приеме к защите диссертационных работ предписано засчитывать статьи, опубликованные, начиная с февраля 2003 года, только при условии выполнения изложенных выше требований.

В связи с этим редколлегия журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» будет принимать к печати только те статьи, которые отвечают требованиям ВАК Украины.

ДСТУ ENV 583-6:2005. Неруйнівний контроль. Контроль ультразвуковий. Ч. 6. Дифракційно-часовий метод для виявлення і визначення розмірів несуцільностей (ENV 583-6:2000, IDT).

<sup>2.</sup> Точностные характеристики определения размеров трещин при помощи дифрагированных волн // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1999. — № 2. — С. 21–26.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ФЕРРОМАГНИТНОГО ОБРАЗЦА С ТРЕЩИНОЙ

### В. Ф. ГАМАЛИЙ, С. В. СЕРЕБРЕННИКОВ, Д. В. ТРУШАКОВ

Представлены результаты исследований взаимодействия накладного вихретокового преобразователя (ВТП) с П-образным магнитопроводом и ферромагнитного материала с дефектом типа «непровар» или «сквозная трещина». Разработана графоаналитическая модель и получены упрощенные формулы для инженерного расчета внесенной индуктивности ВТП в зависимости от ширины раскрытия трещины и величины зазора. Получены выражения для оценки чувствительности ВТП к ширине трещины и величине зазора.

The work contains the results of theoretical and experimental research of interaction between a laying-in U-type core eddy-current transformer (ECT) and tested ferromagnetic material with defects of through-the-thickness crack type and fusion type. There has been developed a graphic-analytical model and received simplified equations for engineering calculation of introduced inductances of such eddy-current transformer depending on crack width and air-gap fluctuation size. The have been received equations for estimation sensitivities of eddy- current transformer to depends on crack width growth and to change of air-gap.

Современная вихретоковая дефектоскопия характеризуется широкой гаммой серийно выпускаемых приборов, обусловленной спецификой их применения (особенностями структуры и свойств материала, формы контролируемого изделия, требований заказчика и т. п.). В то же время возникает необходимость разработки и исследования специализированных приборов для вихретоковой дефектоскопии [1]. До настоящего времени особенно актуальной задачей остается создание инженерных методик расчета ВТП, поскольку строгое теоретическое описание физических процессов при контроле неоднородных сред ВТП с неоднородным полем вызывает определенные трудности. Классический подход к решению этой задачи, основанный на решении уравнений Максвелла и Гельмгольца в дифференциальном виде [2], является сложным и громоздким. Поэтому при создании инженерных методик расчета используют некоторые упрощения и допущения, позволяющие применить методы, рассмотренные в работе [3].

Целью данных исследований является разработка упрощенной математической модели взаимодействия ВТП с ферромагнитным образцом, содержащим дефект типа «непровар» или «сквозная трещина». Полученная математическая модель позволила бы оценить приемлемость совпадения теоретических и экспериментальных исследований [1].

Методика проведения предыдущих исследований, описанных в работе [4], включала:

изготовление накладных ВТП стержневого типа и с П-образным магнитопроводом (сердечником); имитирование продольных сквозных трещин с шириной раскрытия T, нормированной к диаметру D полюса магнитопровода ВТП в пределах 0...0,3 мм на образцах ферромагнитной стали;

изменение зазора  $\delta$  между накладным ВТП и контролируемой поверхностью, нормированного к диаметру D магнитопровода ВТП в пределах 0...0,3 мм;

построение и анализ зависимостей вносимой индуктивности  $L_{\rm BH}$  от соотношений T/D и  $\delta/D$ .

Исследования ВТП с различной формой магнитопровода показали, что для надежного выявления несплошностей типа «непровар» необходимо использовать накладной ВТП с П-образным сердечником, который имеет наибольшую чувствительность к анизотропии такого рода дефектов. Меньшая чувствительность стержневого ВТП объясняется тем, что у него (в отличие от П-образного) лишь один торец является рабочим (рис. 1, *a*). Экспериментальные исследования показали, что П-образный ВТП превосходит стержневой по чувствительности даже в том случае, ког-



Рис. 1. ВТП, расположенный над контролируемым ферромагнитным образцом, содержащим дефект типа «трещина – непровар»:  $a, \delta$  — соответственно со стержневым и П-образным сердечником

<sup>©</sup> В. Ф. Гамалий, С. В. Серебренников, Д. В. Трушаков, 2007

да трещина находится под одним из двух полюсов магнитопровода. Наибольшая чувствительность обеспечивается при попадании непровара или трещины одновременно под оба полюса П-образного ВТП (рис. 1, *б*) [5].

Моделирование ВТП с П-образным магнитопроводом. Создание упрощенной математической модели, которая позволит описать взаимодействие накладного ВТП с П-образным магнитопроводом и ферромагнитного материала с дефектом типа «сквозная трещина» или «непровар» с шириной раскрытия T при наличии главного мешающего вихретоковому контролю фактора — изменяющегося зазора  $\delta$  между полюсами ВТП и контролируемой поверхностью, основано на графоаналитическом анализе схемы, представленной на рис. 1,  $\delta$ .

П-образный накладной параметрический ВТП представляет собой катушку индуктивности с ферромагнитным сердечником П-образной формы, на который намотана высокочастотная обмотка с числом витков W. Магнитный поток  $\Phi$  от ВТП индуцирует в контролируемом образце вихревые токи  $i_{\rm B}$ , интенсивность которых определяется удельной электропроводностью образца и параметрами трещины. При изменении ширины раскрытия трещины T или величины зазора  $\delta$  изменяется потокосцепление магнитного поля и магнитное сопротивление цепи ВТП-образец. Определим зависимость силы тока I в обмотке ВТП от величины зазора  $\delta$  и ширины раскрытия трещины T:

$$I = \frac{U}{Z_0 + Z_{\rm BH}} = \frac{U}{Z},\tag{1}$$

где U — напряжение питающего ВТП тока;  $Z_0$  — сопротивление обмотки ВТП в воздухе;  $Z_{\rm BH}$  — дополнительное сопротивление, вносимое в ВТП образцом ( $Z_{\rm BH} = f(T, \delta)$ ); Z — полное сопротивление обмотки ВТП.

При «жестких» условиях технологического процесса изготовления деталей, которые диктует современная конкурентная среда, магнитная проницаемость  $\mu$  и электропроводность  $\sigma$  материала практически остаются неизменными для всех образцов. Поэтому влияние  $\mu$  и  $\sigma$  на  $Z_{\rm BH}$  при решении поставленной задачи не рассматриваем.

Импеданс обмотки ВТП состоит из активного R и индуктивного  $X_L$  сопротивлений:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (2\pi f L)^2},$$
 (2)

где f — частота тока; L — индуктивность обмотки ВТП. (3)

$$L = L_0 + L_{\rm BH} = \frac{W\Phi}{I}$$

Здесь  $L_0$  — индуктивность обмотки ВТП в воздухе;  $L_{\rm BH}$  — дополнительная индуктивность, вносимая в ВТП образцом ( $L_{\rm BH} = f(T, \delta)$ ).

При достаточно малых значениях T и  $\delta$  и значительных величинах магнитных проницаемостей магнитопровода ВТП и контролируемого образца потоками рассеивания можно пренебречь и считать, что через образец замыкается весь магнитный поток:

$$\Phi = \frac{IW}{R_{_{\rm M}}},\tag{4}$$

где  $R_{\rm M}$  — магнитное сопротивление цепи ВТПобразец,  $R_{\rm M} = R_{\rm cT} + R_3$  ( $R_{\rm cT}$  — магнитное сопротивление сердечника и ферромагнитной стали, из которой изготовлена деталь;  $R_3$  — магнитное сопротивление воздушного зазора).

Магнитное сопротивление воздушного зазора:

$$R_3 = \frac{2\delta}{\mu_0 S_{\rm M}},\tag{5}$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \, \Gamma$ н/м);  $S_{\rm M}$  — площадь поперечного сечения сердечника в зоне воздушного зазора.

С учетом этого магнитный поток:

$$\Phi = \frac{IW}{R_{\rm cr} + 2\delta/(\mu_0 S_{\rm M})}.$$
(6)

Тогда, согласно выражений (3) и (6), индуктивное сопротивление обмотки ВТП:

$$X_L = \omega L = \frac{\omega W^2}{R_{\rm cr} + 2\delta/(\mu_0 S_{\rm M})}.$$
 (7)

Полное сопротивление обмотки ВТП:

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 \left[\frac{W^2}{R_{\rm cr} + 2\delta/(\mu_0 S_{\rm M})}\right]^2}.$$
 (8)

Анализ зависимости показывает, что с увеличением воздушного зазора импеданс Z уменьшается по закону, близкому к гиперболическому.

Пренебрегая величиной  $R_{\rm ct}$  в выражении (8), поскольку магнитное сопротивление воздушного зазора значительно превышает магнитное сопротивление сердечника, получаем упрощенные выражения для определения индуктивного сопротивления и индуктивности:

$$X_L \approx \frac{\omega W^2}{2\delta/(\mu_0 S_{\rm M})} = \frac{0.5\,\mu_0 \omega W^2 S_{\rm M}}{\delta},\tag{9}$$

$$L \approx \frac{(W^2 \mu_0 S_{\rm M})/2}{\delta} = \frac{K}{\delta},\tag{10}$$

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, №2,2007

ЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

где *К* — функция конструктивных параметров ВТП.

Оценим чувствительность ВТП при включении его в плечо мостовой измерительной схемы в качестве изменяющегося сопротивления. Питание моста осуществляется напряжением переменного тока частоты f. Под чувствительностью ВТП к изменению воздушного зазора  $K_{\delta}$  будем понимать относительное изменение сопротивления, нормированное к приращению величины воздушного зазора [4]:

$$K_{\delta} = \frac{\Delta Z/Z}{\Delta \delta},\tag{11}$$

где  $\Delta\delta$  — приращение величины воздушного зазора, которое вызывает нежелательное изменение полного сопротивления обмотки ВТП Z на величину  $\Delta Z$ .

При  $R \ll X_L$  из выражения (2) получим  $Z = \omega L$ . Производная полного сопротивления по изменению воздушного зазора при  $\omega$  = const и с учетом выражения (9)

$$\frac{dZ}{d\delta} = \frac{\omega dL}{d\delta} = -\frac{\omega W^2 \mu_0 S_{\rm M}}{2\delta^2}$$
(12)

или в конечных приращениях

$$\frac{\Delta Z}{\Delta \delta} = -\frac{\omega W^2 \mu_0 S_{\rm M}}{2\delta^2}.$$
(13)

Из выражений (10), (11) и (13) получаем формулу для определения чувствительности ВТП к изменению воздушного зазора:

$$K_{\delta} = \frac{\Delta Z / \Delta \delta}{Z} \approx \frac{\omega W^2 \mu_0 S_{\rm M}}{2\delta^2 \omega L} \approx \frac{W^2 \mu_0 S_{\rm M} 2\delta}{2\delta^2 W^2 \mu_0 S_{\rm M}} \approx \frac{1}{\delta}.$$
 (14)

Таким образом, с увеличением величины зазора чувствительность ВТП уменьшается гиперболически. При малых рабочих зазорах чувствительность



Рис. 2. Схематическое изображение расположенной под полюсом сердечника ВТП трещины, разделенной на следующие элементы: 1 — прямоугольник; 2 — треугольник; 3 — сегменты

 $K_{\delta}$  велика, например, при  $\delta = 0,1$  мм и  $\Delta \delta = 0,01$  мм чувствительность  $K_{\delta} = 1/10^{-4} = 10000$  1/м и относительное изменение сопротивления  $\Delta Z/Z = K_{\delta} \Delta \delta = 10000 \cdot 10^{-5} = 0,1$ ; т. е. при изменении зазора на 0,01 мм сопротивление ВТП изменяется на 10 %, что соизмеримо с полезным сигналом от трещины.

Для определения зависимости внесенной индуктивности ВТП  $L_{\rm BH}$  от ширины раскрытия трещины представим трещину, расположенную под полюсами сердечника ВТП, в виде прямоугольника и двух прилегающих к нему сегментов (рис. 2).

Обозначим соотношение ширины раскрытия трещины *T* к диаметру сердечника *D* через величину  $\alpha$ : *T/D* =  $\alpha$ . Как видно из рис. 2,  $\sin \gamma = \frac{T/2}{D/2} = \frac{T}{D}$ . Для малых значений угла  $\gamma \sin \gamma = \frac{T}{D} = \frac{T}{D}$ .

 $\gamma \approx \gamma$ , таким образом  $\gamma \approx \alpha$ . Площадь трещины  $S_{\rm Tp}$  равняется сумме площадей прямоугольника  $S_{\rm Tp}$  и двух сегментов  $S_{\rm cer}$ :  $S_{\rm Tp} = S_{\rm Tp} + 2S_{\rm cer}$ . При малых  $\alpha$  ( $\alpha \leq 0,3$ ) площадь прямоугольника:

$$S_{\rm rp} = \frac{D}{2}\cos\gamma \, 2T = DT\sqrt{1 - \sin^2\gamma} \cong DT\sqrt{1 - \gamma^2} =$$
$$= DT\sqrt{1 - \alpha^2} \cong DT\left(1 - \frac{1}{2}\alpha^2\right) = D^2\alpha\left(1 - \frac{1}{2}\alpha^2\right).$$

Площадь сегмента:  $S_{cer} = \frac{\pi R^2}{360} 2\gamma - S_{rp}$  ( $S_{rp}$  — площадь треугольника) или

$$S_{\rm cer} = \frac{\pi (D/2)^2}{360} 2 \frac{360}{2\pi} \alpha - S_{\rm rp}.$$

В свою очередь, площадь треугольника:

$$S_{\rm rp} = \frac{1}{2} \frac{D}{2} \cos \gamma T = \frac{D^2}{4} \alpha \sqrt{1 - \alpha^2} =$$
$$= \frac{D^2}{4} \alpha \left(1 - \frac{1}{2} \alpha^2\right).$$

Таким образом, площадь сегмента равняется:

$$S_{\text{cer}} = \frac{D^2}{4}\alpha - \frac{D^2}{4}\alpha(1 - \frac{1}{2}\alpha^2) = \frac{D^2}{8}\alpha^3$$

Общая площадь трещины под полюсом ВТП:

$$S_{\rm np} = D^2 \alpha + 2 \frac{D^2}{8} \alpha^3 - \frac{1}{2} D^2 \alpha^3 =$$
$$= D^2 \left[ \alpha - \frac{1}{4} \alpha^3 \right] = D^2 \left[ \frac{T}{D} - \frac{1}{4} \left( \frac{T}{D} \right)^3 \right].$$
(15)

Определим угол  $\gamma$  для максимальной ширины раскрытия трещины  $T/D = \alpha = 0,3$ , т. е.  $\sin \gamma = 0,3$ ;  $\gamma = 17^{\circ} \approx 0,3$  рад. Таким образом, общая площадь трещины при  $\alpha = 0,3$ :

# - НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

$$S_{\rm rp} = D^2(0,3 - \frac{1}{4}0,027) = 0,293D^2.$$

Анализ этого соотношения показывает, что с погрешностью 2 % можно считать, что в пределах  $0 \le \alpha \le 0,3$  площадь трещины  $S_{\rm rp}$  изменяется линейно в зависимости от параметра  $\alpha$ :

$$S_{\rm TP} \cong \alpha D^2$$
.

Таким образом, при  $\alpha \le 0,3$  активная площадь поперечного сечения полюса над трещиной  $S_{M}^{a}$ (незаштрихованная часть на рис. 2) будет связана с шириной раскрытия трещины *T* также линейно:

$$S_{M}^{a} = S_{0} - S_{TP} = \frac{\pi D^{2}}{4} - \alpha D^{2} = \frac{\pi D^{2}}{4} \left[ 1 - \frac{4}{\pi} \alpha \right],$$

где S<sub>0</sub> — полная площадь полюса ВТП.

Величина потока рассеивания пропорциональна площади трещины  $S_{\rm Tp} \approx \alpha D^2$ , поэтому с ростом раскрытия трещины *T* она будет линейно возрастать. Индуктивность ВТП:

$$L \approx \frac{0.5\,\mu_0 W^2 S_{_{\rm M}}}{\delta} = K_1 S_{_{\rm M}} = K_1 S_0 \left(1 - \frac{4}{\pi}\alpha\right) \qquad (16)$$

будет уменьшаться линейно с ростом T (и соответственно  $\alpha$ ).

Таким образом, зависимость величины внесенной индуктивности ВТП от изменения раскрытия трещины T описывается линейной функцией при условии, что  $T/D \le 0,3$ :

$$L_{\rm BH} \approx \left[ 1 - \frac{4}{\pi} \frac{T}{D} \right]. \tag{17}$$

Определим чувствительность ВТП  $K_{\rm тр}$  к ширине раскрытия трещины. Чувствительность представляет собой относительное изменение сопротивления, деленное на приращение величины площади раскрытия трещины:

$$K_{\rm rp} = \frac{\Delta Z_{\rm rp}/Z_{\rm rp}}{\Delta T} = \frac{\Delta Z_{\rm rp}/Z_{\rm rp}}{D\Delta\alpha}.$$
 (18)

Индуктивность  $L_{\rm TP}$  обмотки ВТП, полюсы которого размещены вдоль трещины, определяется из упрощенного выражения:

$$L_{\rm rp} \approx \frac{W^2}{2\delta/(\mu_0 S_{\rm M})} \approx \frac{W^2 S_{\rm M} \mu_0}{2\delta} \approx \frac{W^2 \mu_0}{2\delta} S_0 \left(1 - \frac{4}{\pi}\alpha\right).$$
(19)

Полное сопротивление:

$$Z_{\rm rp} \approx \sqrt{R^2 + \omega^2 \left[\frac{W^2}{2\delta/(\mu_0 S_{\rm M})}\right]^2}.$$
 (20)

При  $R \ll X_L$  получаем  $Z_{\rm Tp} \approx \omega L_{\rm Tp}$ . Производная полного сопротивления по изменению ширины трещины:

$$\frac{dZ_{\rm rp}}{d\alpha} = \omega \frac{dL_{\rm rp}}{d\alpha}.$$
 (21)

$$\frac{dZ_{\rm rp}}{d\alpha} = \frac{2\pi\omega W^2}{\delta} S_0 \frac{d(1-\frac{4}{\pi}\alpha)}{d\alpha} = -\frac{8\omega W^2 S_0}{\delta}.$$
 (22)

Поделив выражение (22) на  $Z_{\rm Tp} \approx \omega L_{\rm Tp} \approx \frac{2\pi\omega W^2 S_0}{s}$ , получим:

$$K_{\rm rp} = \frac{\Delta Z}{ZD\Delta\alpha} \approx \left| -\frac{\frac{2\pi\omega W^2 S_0}{\delta}}{\frac{\omega W^2 \mu_0 S_0 (1-\alpha)}{2\delta}} \right| \approx (23)$$
$$\approx \frac{1}{D(1-\alpha)} \approx D(1+\alpha).$$

Таким образом, при раскрытиях трещины  $\alpha \le 0,3$  чувствительность ВТП изменяется приблизительно линейно с ростом  $\alpha$ .

При сравнении выражения (14) для определения чувствительности ВТП к изменению величины зазора  $\delta$  с выражением (23) для определения чувствительности ВТП к изменению ширины раскрытия трещины *T* видно, что изменение величины зазора между ВТП и контролируемой поверхностью является серьезным мешающим вихретоковому контролю фактором, особенно в области малых  $\delta$ . Поэтому для повышения точности проведения вихретокового контроля нами розработан резонансный способ отстройки от мешающего влияния изменяющейся величины зазора [6], на основе которого был разработан вихретоковый дефектоскоп для контроля металлических изделий [7].

Экспериментальные исследования, проведенные на частотах 1 и 10 кГц, с точностью до 85 % подтвердили справедливость выражений (10), (17) [5].

### Выводы

В результате проведенных исследований создано графоаналитическую модель ВТП с П-образным магнитопроводом при его взаимодействии с ферромагнитным образцом, содержащим дефект типа «сквозная трещина» (непровар). Анализ модели показал, что:

зависимость внесенной индуктивности от соотношения ширины раскрытия трещины T, отнесенной к диаметру сердечника D, для П-образного ВТП описывается линейной функцией: НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

$$L_{\rm BH} \approx \left[1 - \frac{4}{\pi} \frac{T}{D}\right];$$

зависимость величины внесенной индуктивности ВТП от изменения воздушного зазора  $\delta$  между полюсами преобразователя и контролируемой поверхностью (что является основным мешающим вихретоковому контролю фактором) описывается гиперболическим законом:  $L_{\rm BH} \approx K/\delta$ .

Для оценки чувствительности ВТП получены следующие выражения: в диапазоне  $T/D \le 0.3$  чувствительность зависит от T линейно  $K_{\rm rp} \approx D(1 + T/D)$ ;

чувствительность ВТП к изменению воздушного зазора обратно пропорциональна  $\delta$ :  $K\delta \approx 1/\delta$ .

Результаты исследований были использованы при разработке автоматизированной системы дефектоскопии ответственных деталей гидронасоса [1].

1. Гамалий В. Ф., Серебренников С. В., Трушаков Д. В. Автоматизированная система дефектоскопии ответственных деталей гидронасоса // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2006. — № 1. — С. 27–32.

Кировоград. нац. техн. ун-т

- 2. Соболев В. С., Шкарлет Ю. М. Накладные и экранные датчики. Новосибирск: Наука, 1967.
- Серебренніков С. В., Смірнов Б., Трушаков Д. В. Математичне моделювання взаємодії електромагнітного поля прямокутної котушки з вертикальношаровим провідним середовищем // Теор. електротехніка. — 2000. — Вип. 55. — С. 85–89.
- Серебренников С. В., Трушаков Д. В., Версаль В. А. Сравнительный анализ вихретоковых датчиков с магнитопроводом // Матер. науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Датчик-2001). М.: МГИЭМ, 2001. С. 309–310.
- Серебренніков С. В., Трушаков Д. В. Дослідження вихрострумових перетворювачів з П-подібним та стержневим осердями // Фіз. методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. — Зб. наук. праць Фіз.-мех. ін-ту ім. Г. В. Карпенка НАН України. — Львів. — 2005. — С. 126–130.
- Деклараційний патент 34933А, Україна, МКИ G01N27/86. Спосіб повного відстроювання від впливу проміжку у вихорострумовій дефектоскопії феромагнітних виробів / Б. І. Ващенко, Д. В. Трушаков. — Кіровоград. держ. техн. ун-т. — Опубл. 15.03.2001.
- Пат. 62570, Україна, МКИ G01N27/00, G01N27/90. Вихорострумовий дефектоскоп для контролю металевих виробів / В. Ф. Гамалій, В. Ф. Пащенко, Д. В. Трушаков. — Кіровоград. держ. техн. ун-т. — Опубл. 15.07.2005.

Поступила в редакцию 30.06.2006

## ШОСТА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ»

### 24-25 квітня 2007 р.

### м. Київ, Україна

24–25 квітня 2007 р. у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» (НТУУ «КПІ») відбулася Шоста науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Метою конференції було спілкування фахівців з питань перспективних розробок, прецизійних технологій, нових рішень в приладобудуванні, зустріч з керівниками провідних підприємств, формування спільних проектів, пошук партнерів для співпраці.

Роботу конференції розпочав своїм привітанням декан приладобудівного факультету НТУУ «КПІ» д-р техн. наук, проф. Тимчик Г. С., побажавши її учасникам плідної співпраці та обміну досвідом у галузі приладобудування.

В межах конференції на кафедрі приладів та систем неруйнівного контролю НТУУ «КП» працювала секція «Неруйнівний контроль, технічна та медична діагностика». В роботі секції взяли участь більше тридцяти фахівців у галузі неруйнівного контролю з різних міст України. Серед них: д-р техн. наук, проф. Кісіль І. С., Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ; д-р техн. наук, проф. Стороженко В. А., Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків; д-р техн. наук, проф. Марчук В. І., Луцький державний технічний університет, м. Луцьк; канд. фіз.-мат. наук Рижевич А. А., Інститут фізики ім. Б. І. Степанова НАН Білорусі, м. Мінськ; д-р техн. наук, проф. Мірошніков В. В., Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, м. Луганськ; Козіна Ю. Ю., Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса та багато інших. Окрім названих гостей міста, свої доповіді представили і викладачі та студенти НТУУ «КПІ», зокрема кафедри приладів та систем неруйнівного контролю: д-р техн. наук, проф. Маєвський С. М., ст. викладач Лігоміна С. М., аспірант Гльойнік К. А., магістранти Мисюра О. П., Лисенко Ю. Ю., Юрченко Г. С., Юрченко О. С., Друзенко Н. В., а також інших ВНЗ м. Києва: Німченко Т. В. та Вітрук Ю. В., Національний авіаційний університет; Шевченко К. Л., Київський національний університет технологій та дизайну та ін.

Доповідачі у своїх виступах висвітлювали такі актуальні в наш час питання, як основні проблеми при розробці акустико-емісійних вимірювальних систем (доповідь Німченко Т. В.), методика теплової дефектоскопії об'єктів у вигляді тіл обертання (доповідь Стороженка В. А.), підвищення вірогідності та швидкодії приладів дефектоскопії ходової частини рухомого складу (доповідь Жученко Н. А., Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, м. Луганськ) та багато інших проблемних питань сьогодення. Учасники конференції продемонстрували своє бачення проблем неруйнівного контролю, технічної та медичної діагностики, а також можливі шляхи їх вирішення.

Пропонуємо колегам взяти участь у роботі секції «Неруйнівний контроль, технічна та медична діагностика», що працюватиме у межах VII науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», яка відбудеться у квітні 2008 р. (тел. оргкомітету секції: (044) 454-95-47).

# ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОЦЕНКИ ТЕПЛОПОТЕРЬ В ЗДАНИЯХ ПУТЕМ ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ

### В. А. СТОРОЖЕНКО, С.Б. МАЛИК

Приведены результаты апробации термографического метода обследования зданий для определения теплопотерь. Предложена методика, основанная на определении коэффициента относительных теплопотерь, которая позволяет локализовать места наиболее интенсивных утечек тепла при минимальном объеме измерений. Преимуществом методики является высокая производительность при минимальных затратах.

The results of approbation of thermographic technique on the buildings investigation for the definition of heat losses are reported. Technique based on the determination of relative heat losses factor is proposed. It allows to locate the areas of most intensive heat leaks with minimized volume of measurements The advantage of this technique is high efficiency with low expenses.

Во многих странах для контроля теплоизоляции строительных конструкций широко используется термография (тепловой метод неразрушающего контроля). В частности, этот метод получил достаточно широкое распространение в России, где принят ряд соответствующих правительственных постановлений, выпущены нормативные документы, разработаны методики и созданы центры по проведению термографических обследований зданий и сооружений [1].

Конечной целью термографического обследования является определение сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций, а также оценка их энергоэффективности. Для ее достижения согласно действующим в России методикам [2, 3] необходимо получение достаточно большого объема экспериментальных данных, включающих в себя не только результаты собственно термографирования, но и результаты измерения тепловых потоков через здания, температуры внутри помещений, скорости ветра, а также других климатических условий на протяжении 5...14 дней. В качестве измерительной аппаратуры используется не только тепловизор, но и целый ряд других устройств (самопишущие датчики температуры, измерители тепловых потоков и т. д.). Такой всеобъемлющий подход позволяет в итоге определить качество теплоизоляции стен здания с достаточно высокой точностью (погрешность до 15 %), но является достаточно трудоемким и дорогостоящим.

Учитывая, что в Украине применение этого метода для рассматриваемой цели находится на начальной стадии (об этом свидетельствует незначительное количество публикаций, например [4]), авторами была предпринята попытка апробации метода термографического обследования зданий по более упрощенной схеме. Для этого разработали методику, сущность которой заключается в получении экспресс-оценки относительных теплопотерь в здании по результатам исключительно термографического обследования, т. е. без измерения тепловых потоков и других дополнительных характеристик. Предлагаемая методика основана на определении коэффициента относительных теплопотерь η [5], расчет которого производится по формуле [6]:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i (T_i - T_{\rm B})}{S_{\rm ofill} (T_{\rm cp} - T_{\rm B})}$$

где  $S_{\text{общ}}$  — площадь поверхности здания, попадающей в каждый кадр при термографировании;  $S_i$  — площадь более нагретых (по сравнению с  $T_{\text{ср}}$ ) участков этой поверхности;  $T_i$  — температура этих участков;  $T_{\text{в}}$  — температура наружного воздуха;  $T_{\text{ср}}$  — средняя температура поверхности в пределах данного кадра.

Из приведенной формулы видно, что для определения  $\eta$  необходимо осуществить термографирование всей наружной поверхности здания (с покадровой разбивкой), зафиксировав при этом температуру окружающей среды. В этом и состоит предлагаемая методика проведения обследования, которая апробирована авторами на нескольких зданиях. Опыт ее применения свидетельствует, что на одной термограмме (на одном кадре тепловизора) удается зарегистрировать температурное поле участка поверхности здания площадью до 250 м<sup>2</sup>, что позволяет обеспечить производительность термографирования на уровне 1000 м<sup>2</sup>/ч. Это означает, что на обследование достаточно большого многоэтажного здания затрачивается всего 3 ч.

На рис. 1 представлен пример термограммы школьного здания, полученной с помощью тепловизора «ИРТИС-200».

Цветовая шкала температур, приведенная на правом краю термограммы (рис. 1), позволяет рас-

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ



Рис. 1. Термограмма школьного здания



Рис. 2. Визуализация результатов обработки термограммы

шифровать полученное тепловое изображение и, в частности, установить, что отдельные участки поверхности здания существенно отличаются по температуре от общего фона (значения температуры этих участков указаны на термограммах). При этом участки с повышенной температурой и являются местами наибольших теплопотерь. Как показывает накопленный опыт, это прежде всего окна (особенно с открытыми форточками), но могут быть и дефекты стен (участок стены над правым окном первого ряда, рис. 1).

Для качественной оценки утечек тепла через такие участки по критерию  $\eta$  (1) полученные термограммы обрабатываются с помощью созданной специально для этой цели программы «ThermoSquare v.1.0». По содержащейся в термограмме информации о значениях температуры  $T_i$  в каждой точке (пикселе) программа вычисляет входящие в формулу величины  $S_i$ ,  $T_{cp}$ ,  $S_{общ}$  и определяет значения  $\eta$  для каждой термограммы, а также для здания в целом. Результаты обработки по указанной программе могут быть и визуализированы, что иллюстрирует рис. 2, на котором участки термограммы с температурой, превышающей  $T_{cp}$ , выделены белым цветом.

Как показывает практика, значения коэффициента относительных теплопотерь для разных зданий разные. Например, для школьного здания, построенного в 1960-х годах со старыми окнами,  $\eta = 60$  %, для нового административного здания с металлопластиковыми окнами он значительно ниже —  $\eta = 40$  %.

### Выводы

Предлагаемый подход к оценке теплопотерь в зданиях и сооружениях является действительно экспресс-методом, поскольку позволяет получить искомую оценку (в относительных единицах) буквально в течение дня, причем с минимальными затратами (обследование одного здания объемом 24000 м<sup>3</sup> обходится в сумму порядка 1500 грн.).

Получаемая в результате обследования информация дает не только интегральную оценку теплоизолирующих свойств стен и окон здания, но и позволяет определить (идентифицировать) места наиболее интенсивных утечек тепла.

Несмотря на свою эффективность в определении утечек тепла, термографический метод имеет и ограничения в применении, а именно:

может использоваться только в отопительный сезон; требует соответствующих погодных условий (наличие облачности, отсутствие тумана, осадков, сильного ветра);

при термографировании поверхности здания в поле обзора тепловизора не должны попадать деревья, прилегающие постройки и другие предметы.

- Комплексный тепловой контроль и дефектометрия качества строительства административных и жилых строительных сооружений / О. Н. Будадин, Д. В. Киржанов, О. В. Лебедев и др. // Матер. 14 межд. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». Ялта, 16–20 окт. 2006. С. 96–104.
- Будадин О. Н., Абрамова Е. В., Слитков М. Н. Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом. Свидетельство об аттестации Госстандарта России № 09/442-2001 от 09.07.2001 г. — 41 с.
- Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом (летний вариант) / О. Н. Будадин, Е. В. Абрамова, О. С. Крутогоров и др. — Свидетельство об аттестации Госстандарта России № 09/442-2002 от 09.08.2002 г. — 41 с.
- Использование тепловизионной техники для дистанционного неразрушающего контроля строительных конструкций / Ф. Ф. Сизов, С. Л. Кравченко, В. П. Маслов и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2004. — № 1. — С. 48–49.
- Методика диагностики и определения теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным методом / В. П. Вавилов, А. Г. Климов, В. В. Ширяев, К. Д. Трофимов. — Свидетельство об аттестации МВИ Госстандарт РФ № 1305/442 от 10.01.2001 г. — 35 с.
- Стороженко В. А., Маслова В. А. Новые разработки НТЦ «Термоконтроль» в области термографии — энергоаудит и радиоэлектроника // Матер. 14 междунар. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». — г. Ялта, 16– 20 окт. 2006 г. — С. 151–154.

Харьков. нац. ун-т электроники

Поступила в редакцию 01.03.2007

# АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ РАЗРУШЕНИЯ ДВУХСЕКЦИОННОГО КОМПЕНСАТОРА В УСЛОВИЯХ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

### В. А. КОБЗЕВ, С. А. БЕЛОВ, М. А. ОРАЗОВА, Д. Г. РЯУЗОВ

На основе анализа результатов малоцикловых испытаний линзового компенсатора с использованием метода локаций акустической эмиссии (АЭ) показана возможность определения координат усталостных повреждений на стадии начала процесса циклического упрочнения, а также определения момента зарождения усталостной трещины на основе соотношений изменения в ходе испытания активности и амплитуды АЭ. Координаты усталостных повреждений хорошо согласуются с положением областей с максимальными значениями суммарных эквивалентных деформаций, предварительно рассчитанных на основе метода конечных элементов.

Proceeding from analysis of the results of low-cycle testing of a lens compensator using the method of acoustic emission (AE) location, the possibility of establishing the fatigue damage coordinates at the stage of the start of cyclic strengthening process was demonstrated, as well as determination of the moment of fatigue crack initiation based on the ratios of AE activity and amplitude variation during testing. Fatigue damage coordinates agree well with the position of the regions with maximum values of the total equivalent deformations pre-calculated based on the finite element method.

Использование метода акустической эмиссии (АЭ) в условиях воздействия на оборудование циклических нагрузок при определенных условиях может стать важным источником информации о местоположении и времени зарождения усталостных повреждений в материале, динамике их развития, образования и роста магистральной усталостной трещины до момента разрушения.

Актуальность этого была отмечена еще в первых работах по использованию метода АЭ при усталостных испытаниях образцов различных металлических материалов [1, 2]. Однако контроль развития усталостных повреждений аппаратурой того времени был возможен только в режиме зонной локации — в период ускоренного роста усталостной трещины. Если учесть, что этот период весьма незначителен, то эффективность применения метода АЭ на основе одноканальной аппаратуры была также довольно мала.

С развитием аппаратуры АЭ стало возможным использование при контроле усталостного разрушения методов локации источников АЭ. В этом случае представляется возможным получение информации о процессах зарождения и развития циклического повреждения металла оборудования на более ранних стадиях усталостного процесса. В данной работе приведены результаты испытания до разрушения в режиме малоцикловой усталости двухлинзового компенсатора с одновременной регистрацией параметров АЭ.

Испытанию на усталость был подвергнут двухлинзовый компенсатор типа КЛО-2-100-0,6-2 [4], изготовленный из стали Ст 3пс с толщиной стенки 3,0 мм. Испытание на усталость проводили на базе 3000 циклов на универсальной разрывной машине «Инстрон-1595». Частота нагружения составляла три цикла в минуту.

Процесс воздействия циклических нагрузок на металл компенсатора контролировали шестью каналами системы АЭ A-Line DDM. Шесть преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) были установлены двумя группами по три ПАЭ в каждой и распределены равномерно по кольцу вдоль двух сварных швов (рис. 1).

Места установки ПАЭ были определены на основе результатов расчета деформационного состояния компенсатора, характеризующих распределение по поверхности максимальных суммарных эквивалентных деформаций. Для расчета деформированного состояния компенсатора применяли программный комплекс SCAD Office 11.1, реализующий метод конечных элементов. Для создания расчетной модели брали восьмиузловой конечный элемент оболочки, обычно используемый для моделирования искривленных поверхностей. Элемент имеет шесть степеней свободы в каждом узле: перемещения в направлении осей X, Y и Z узловой системы координат и повороты вокруг этих осей. Учитывая симметрию конструкции и нагрузки рассматривали 1/12 часть конструкции. Максимальная деформация компенсатора при расчетах соответствовала максимальной деформации при испытаниях и составляла  $\Delta = 12$  мм. Расчет выполняли с учетом геометрической и физической нелинейности. В качестве граничных условий использовали условия симметрии по меридиональным линиям отсечения рассматриваемого сектора, а также запрещение всех перемещений одного из торцов. Максимальные значения деформаций, превышающие 1,5 %, соответствуют зоне перехоПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ



*Рис. 1.* Схема проведения испытания. Преобразователи АЭ (ПАЭ) установлены двумя локационными группами в соответствии с кольцевой замкнутой схемой установки вдоль сварных швов компенсатора

да от трубной к торовой области компенсатора (рис. 2).

В системе регистрации АЭ на основе каждой группы сформированы локационные группы, с помощью которых в реальном масштабе времени во время испытания проводили идентификацию координат мест генерации в компенсаторе импульсов АЭ. Кроме локации в ходе испытания проводили регистрацию зависимостей от времени основных параметров АЭ, таких, как уровень шума, амплитуда сигналов, активность, время нарастания до максимальных значений амплитуды импульсов АЭ, длительность АЭ импульсов, накопление событий АЭ в каждом канале, суммарная активность и суммарная амплитуда АЭ по всем каналам. Линейный размер кластера локации в ходе испытания составлял 20 мм.

Результаты локации АЭ в ходе испытания приведены на рис. 3 и 4. Время испытания было разделено на девять этапов в соответствии с диапазонами чисел циклов испытания. Параметры испытания на этапах 1–7 соответствовали приведенным выше. Абсолютная деформация на этапах 8–9 составляла 18 мм, что способствовало ускоренному завершению испытания. На основании анализа результатов локации АЭ можно обнаружить, что распределение локационных импульсов на каждом этапе испытания было неравномерным и характеризовалось определенной повторяемостью от этапа к этапу. После завершения испытания, которое характеризовалось резким уменьшением величины нагрузки при постоянной деформации,



Рис. 2. Диаграмма суммарных эквивалентных деформаций

компенсатор обследовали визуально. При визуальном обследовании в околошовной зоне были обнаружены сквозные трещины. Наличие и расположение трещин хорошо проявлялось в условиях приложения к компенсатору небольшой растягивающей статической нагрузки. Схематическое изображение трещин, обнаруженных в области установки ПАЭ локационной группы 1 (трещины в зонах А, Б и В) и ПАЭ локационной группы 2 (трещина в зоне  $\Gamma$ ), представлены на рис. 5. При перенесении координат обнаруженных трещин на диаграммы локаций на каждом этапе испытаний можно заметить, что эти координаты соответствуют, как правило, зонам наибольшей акустической активности в соответствующей локационной группе. Для определения динамики усталостной повреждаемости непосредственно в пределах каждой из зон просуммированы все лоцированные импульсы, соответствующие координатам обнаруженных трещин на каждом этапе испытания. Результат накопления лоцированных импульсов в зонах А-Г, соответствующих координатам обнаруженных после завершения испытания трещин, представлен на рис. 6. При анализе графиков накопления лоцированных импульсов, соответствующих зонам А-Г, обнаружено, что скорости их накопления в каждой из зон различны и изменяются по ходу испытания. Однако можно выделить ряд перегибов кривых, характерных для большинства исследуемых зон образования будущих трещин. Так, после 600 циклов происходит небольшое уменьшение скорости накопления в зонах А-В (фактически снижение акустической активности в зоне). Исключение составляет зона  $\Gamma$ , которая соответствует положению локационной группы 2. Наиболее характерным для усталост-



*Рис. 3.* Результаты локации источников АЭ на различных этапах циклических испытаний компенсатора (этапы 1–5). По оси X представлены линейные координаты вдоль сварного шва; координата X = 0 соответствует положению ПАЭ 1/01, ось Y соответствует количеству зарегистрированных лоцированных импульсов АЭ

ного процесса является увеличение акустической активности для всех зон контроля в районе 1600 циклов, которое продолжалось примерно до 2000 цикла нагружения, затем активность снова снижалась (зоны A, B и  $\Gamma$ ) или оставалась неизменной (зона  $\delta$ ). Резкое увеличение активности АЭ наблюдали во всех зонах контроля после 3000 цикла за 105 циклов до окончательного разрушения. Наличие перегибов на кривых накопления локационных импульсов АЭ в зонах может быть отражением стадийности процесса усталости [3]. Так, уменьшение акустической активности после 600 цикла соответствует завершению стадии циклической микротекучести и переходу к циклическом му прочнению, процесс которого завершается на-

чалом образования и роста усталостных трещин после 1600 цикла. Стабильный рост усталостных трещин происходит в интервале от 2000 до 3000 цикла. После 3000 цикла наблюдается ускоренный рост усталостных трещин.

Наиболее важными результатами проведенного анализа является то, что определение зон предстоящего развития усталостных трещин с помощью локации импульсов АЭ происходит на самых ранних стадиях усталостного процесса, а местоположение этих зон соответствует областям с максимальными деформациями, рассчитанными методом конечных элементов. Так, координаты зон A, E и B формируются уже к 300 циклу, а координаты зоны  $\Gamma$  — к 600. Это свидетельствует



Рис. 4. Результаты локации источников АЭ на различных этапах циклических испытаний компенсатора (этапы 6-9)



Рис. 5. Зоны, в которых обнаружены магистральные усталостные трещины после завершения испытания



о том, что лоцированные импульсы АЭ являются результатом не только роста усталостных трещин, но также отражают процессы зарождения, динамики движения дислокаций, образования их скоплений. В реальной конструкции из-за структурной

1000

500

Таким образом, при циклических испытаниях конструкции при использовании метода АЭ локации представляется возможность определить координаты усталостного разрушения на ранних стадиях. После определения зон повышенной акустической активности степень их опасности для эксплуатации конструкции может быть выявлена другими методами неразрушающего контроля. На стадиях циклического течения, циклического упрочнения и начальной стадии развития усталостной трещины с помощью этих методов не будут выявлены опасные дефекты, в то время как локализованная акустическая активность свидетельствует о процессах начальных стадий усталости, связанных с накоплением усталостной повреждаемости. Это предположение было подтверждено экспериментально. До проведения испытаний с помощью маг-

Накопление лоцированных импульсов АЭ

2500

2000

1500

1000

500



Рис. 7. Процентное соотношение импульсов АЭ n, лоцированных в зонах A, E и B (локационная группа 1, кривая 1) и в зоне  $\Gamma$  (локационная группа 2, кривая 2) по отношению ко всем лоцированным импульсам N, зарегистрированным в соответствующей локационной группе

нитопорошкового контроля было подтверждено отсутствие трещин на наружной поверхности компенсатора. После проведения циклических испытаний на базе 3000 циклов в результате повторного капиллярного контроля трещин на наружной поверхности не выявлено.

Следует отметить, что более половины зарегистрированных локационными группами 1 и 2 лоцированных импульсов инициированы в зонах будущих трещин (рис. 7). Так, локационной группой 1 в зонах A, E и B в интервале импульсов от 300 до 3000 циклов нагружения регистрировалось 50...85 %. Локационной группой 2 в зоне  $\Gamma$  в интервале от 600 до 3000 циклов нагружения регистрировалось до 87 % всех обнаруженных группой лоцированных импульсов. Результаты такой оценки также дают информацию о высокой степени локализации АЭ излучения в зонах будущих трещин в периоды стабильного развития усталостного процесса, начиная с ранних периодов начала накопления усталостной повреждаемости.

Если проанализировать динамику среднего уровня активности всей АЭ в канале, аналогично тому, как это делается в условиях проведения зонной локации, то можно заметить, что изменения этого параметра по ходу испытания на усталость не столь информативны по сравнению с лоцированными импульсами АЭ, отнесенными к зонам будущих усталостных трещин (рис. 8). За 1000 циклов активность незначительно возрастает от 3 до 12 имп/с, а затем уменьшается до уровня 5...7 имп/с и остается такой вплоть до наступления нестабильности после 3000 циклов. При этом с помощью капиллярной дефектоскопии поверхностные дефекты не были выявлены. В ходе нестабильного ускоренного развития усталостной трещины активность возростала до 35 имп/с за период меньший, чем 100 циклов нагружения. Таким образом, ситуация, соответствующая активной



*Рис. 8.* Изменение усредненного параметра активности всех зарегистрированных в ходе испытания импульсов АЭ

АЭ, сопровождающаяся наличием ускоренного роста трещины, согласно [5], создается только на завершающем этапе испытания, когда остается довольно малое время для принятия решения и осуществления мероприятий по предотвращению разрушения. Эти результаты согласуются с данными, приведенными в работе [6], где 99 % циклов от общего их количества усталостный процесс был связан с зарождением и ростом усталостной трещины до критических размеров. При этом параметры АЭ возрастали только после наступления нестабильности.

При анализе изменения в ходе испытания усредненных значений амплитуд АЭ в канале и сопоставлении этих изменений с соответствующими изменениями активности АЭ можно заметить, что уменьшение амплитуды АЭ на начальном этапе испытания сопровождается увеличением активности АЭ (от начала испытания до 1000 цикла). Затем от 1000 цикла до 1600 при неизменном значении амплитуды АЭ происходит уменьшение активности до значений 5 имп/с. После 1600 цикла характер изменения амплитуды и активности АЭ становится одинаковым: сначала их значения увеличиваются (от 1600 до 2000 цикла), а затем несколько снижаются (от 2000 до 2800...3000 цикла). Нестабильный рост трещин сопровождается резким возрастанием амплитуды и активности АЭ (рис. 9). Если сопоставить эти изменения с процессами, происходящими на каждой стадии усталости, описание которых приведено выше, то можно заметить, что до периода зарождения усталостных трещин (к 1600 циклу) изменения амплитуды и активности обратно пропорциональны, а после зарождения и роста усталостной трещины изменения амплитуды и активности АЭ прямо пропорционально. Возможно, что факт такого изменения соотношений амплитуды и активности АЭ может стать определенным критерием, характеризующим время начала развития усталостной трещины. Обнаруженные закономерности можно объяснить с точки зрения дислокационных процессов. Так, в материале изделия в исходном сос-



*Рис. 9.* Изменение усредненных значений амплитуд всех зарегистрированных в ходе испытания импульсов АЭ

тоянии всегда содержится определенное количество дислокаций, возникших в ходе изготовления металла, а затем изделия. При приложении нагрузки дислокации начинают перемещаться, заниэнергетически выгодные положения, мая останавливаясь в районе всевозможных стопоров (включения, границы фаз, зерен и др.). На начальном этапе испытаний пробег дислокаций большой и они выделяют за счет торможения на стопорах энергию, пропорциональную квадрату величины пробега [7]. Поэтому начальные стадии усталости характеризуются относительно редкими импульсами АЭ (низкая активность АЭ), имеющими большую энергию и амплитуду (энергия АЭ пропорциональна квадрату амплитуды АЭ [1]). По мере прохождения процесса циклического упрочнения происходит увеличение плотности дислокаций и уменьшение величин их пробега за счет увеличения количества стопоров (малоугловые дислокационные границы, скопления дислокаций, ячеистая дислокационная структура и др.). Это приводит к увеличению активности, но энергия каждого импульса АЭ небольшая из-за уменьшения величины пробега дислокаций. В начале зарождения усталостных трещин движение дислокаций практически прекращается, при этом активность и амплитуда АЭ зависит от количества разорванных связей кристаллической решетки (практически оба параметра становятся пропорциональными площади вновь созданной поверхности за счет образования и роста усталостной трещины [2]).

## Выводы

ОАО «УкрНИИхиммаш», Харьков Применение метода локаций АЭ в процессе малоцикловой усталости позволяет определить координаты локализации усталостной повреждаемости на ранних стадиях, соответствующих началу процесса циклического упрочнения, контролируемого движением дислокаций.

Координаты локаций АЭ, а также места зарождения и роста усталостных трещин соответствуют областям с максимальными значениями эквивалентных деформаций, рассчитанных на основе метода конечных элементов. Результаты такого расчета позволяют получать информацию о наиболее нагруженных участках конструкции, что является основанием оптимального размещения ПАЭ при проведении испытаний.

В период активного развития усталостного процесса 50...85 % лоцированных импульсов соответствуют координатам будущих магистральных усталостных трещин.

При испытании компенсатора на базе 3000 циклов поверхностные усталостные трещины не были зарегистрированы с использованием капиллярного метода.

Изменения параметров активности и амплитуды АЭ независимо одна от другой являются информативными для обнаружения времени наступления нестабильности усталостного процесса. При рассмотрении этих параметров совместно может быть определено время зарождения усталостной трещины, которое будет соответствовать изменению в ходе испытания взаимного соотношения активности и амплитуды АЭ от обратно пропорционального к прямо пропорциональному.

- Грешников В. А., Дробот Ю. В. Акустическая эмиссия. Применение для испытания материалов и изделий. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 272 с.
- Acoustic emission from low-cycle high-stress-intensity fatigue / C. E. Hartbower, C. F. Morais, W. G. Reuter, P. P. Crimmins // Engineering fracture mechanics. — 1973. — 5. — P. 765–789.
- 3. *Терентьев В. Ф.* Усталостная прочность металлов и сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2002. 288 с.
- 4. *ТУ У 29.2-00217417-062–2005*. Компенсаторы линзовые осевые.
- ДСТУ 4227–2003. Настанови щодо проведення акустикоемісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки.
- 6. *Shinaishin O. A., Darlow M. S., Acquaviva S. J.* Acoustic emission detection of fatigue crack initiation and propagation in notched and unnotched titanium specimens // Materials Evaluation. 1976. 34, № 6. P. 137–143.
- 7. *Фридель Ж.* Дислокации. М.: Мир, 1967. 645 с.

Поступила в редакцию 04.09.06



# ДВАНАДЦЯТА МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ЛЕОТЕСТ-2007» В СЛАВСЬКУ

Щороку взимку спеціалісти з неруйнівного контролю збираються в засніжених Карпатах у відомому гірськолижному центрі Славське, Львівської області. Цього року чергова Дванадцята міжнародна науково-технічна конференція «ЛЕОТЕСТ-2007 — Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів» проходила з 19 по 23 лютого.

Організаторами конференції виступили Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики (УТ НКТД), Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України (ФМІ), Львів; Івано-Фран- ківський національний університет нафти і газу (ІФНУНГ); НВФ «Ультракон-Сервіс», Київ; НВФ «Спеціальні Наукові Розробки», Харків і Центр «Леотест-Медіум», Львів (організаційне бюро конференції).

Відкрив конференцію вступним словом голова Оргкомітету, член Правління і голова Західного відділення УТ НКТД, директор центру «Леотест-Медіум», канд. техн. наук *Учанін В. М.* 

На першому пленарному засідання заслухані доповіді:

• В. О. Троїцький, Ю. М. Посипайко, IE3 ім. Є. О. Патона НАНУ, Київ. Комплексний неруйнівний контроль зварних резервуарів великого об'єму для зберігання рідкого аміаку, нафтопродуктів і спиртів.

• *І. Ейнав*, МАГАТЕ, Відень, Австрія. Роль МАГАТЕ в розвитку неруйнівного контролю.

• *Б. Чесла*, ЕКОПОЛ, Хожув, Польща. Establishing the scope of NDT in Negative Reporting Systems.

• *С. Азізова*, Навоїський гірничо-металургійний комбінат, Навої, Узбекистан. Шляхи розвитку неруйнівного контролю на НГМК.

• В. М. Учанін, ФМІ, Львів. Розвиток вихрострумових методів контролю.

• В. О. Нічога, П. Б. Дуб, В. М. Іванчук, ФМІ, Національний університет «Львівська політехніка», Львів. Сучасний стан методів та апаратури для швидкісної технічної діагностики залізничної колії магнітними методами.

• *І. В. Рибіцький, О. М. Карпаш, М. О. Карпаш,* ІФНТУНГ, Івано-Франківськ. Аналіз безконтактних методів ультразвукового контролю матеріалів і виробів.

• *М. О. Карпаш, Т. Т. Котурбаш*, ІФНТУНГ, Івано-Франківськ. Удосконалення методу визначення фізикомеханічних характеристик матеріалу металоконструкцій довготривалої експлуатації.

• К. А. Мартиненко, В. Ю. Бойко, ТОВ «ДДАП-РАКСИ, Дніпродзержинськ. Досвід застосування засобів неруйнівного контролю при виготовленні залізничних осей.

Як завжди, найбільшу на конференції кількість доповідей винесли на суд колег науковці ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ, частина з яких підготовлена спільно з співробітниками інших організацій:



Вступне слово голови Оргкомітету конференції Учаніна В. М.

• В. М. Учанін, А. В. Джаганян, ФМІ, Львів, НВФ «Промприлад», Київ. Особливості вихрострумового контролю гільз циліндрів автомобільних двигунів.

• В. М. Учанін, В. Л. Найда, А. Н. Гогуля, В. Т. Гулько, ФМІ, Львів, ДКТБ ІЕЗ ім. Є. О. Патона, Київ. Вихрострумовий контроль перемичок колекторів атомних електростанцій за допомогою автоматизованого маніпулятора.

• О. П. Осташ, І. М. Андрейко, Ю. В. Головатюк, В. М. Учанін, ФМІ, Львів. Оцінка деградації сплаву В95пчТ1 за механічними і фізичними параметрами.

• О. П. Осташ, О. В. Вольдемаров, О. А. Федоришин, П. В. Гладиш, Г. Я. Безлюдько, В. М. Учанін, ФМІ, АТ «ЛьвівОРГРЕС», Львів, НВФ «Спеціальні Наукові Розробки», Харків. Магнітна діагностика мікроструктурної деградації та накопичення пошкоджуваності в сталі парогонів.

• В. Г. Рибачук, ФМІ, Львів. Особливості функціонування підсистем намагнічування та розмагнічування коерцитиметра ВКС-968.

• В. В. Кошовий, А. Б. Лозинський, О. М. Мокрий, І. М. Романишин, Г. В. Савицький, Р. В. Шарамага, ФМІ. Національний університет «Львівська політехніка», ІППММ ім. Я. С. Підстригача, Львів. Використання інтерферометра Майкельсона для реєстрації ультразвукових хвиль в неруйнівному контролі.

• В. В. Кошовий, О. Є. Левицький, А. М. Муравйов, І. М. Романишин, Р. І. Романишин, ФМІ, Львів. Багатоканальний ультразвуковий перетворювач для томографічного контролю циліндричних виробів.

• *Р. І. Романишин*, ФМІ, Львів. Алгоритм, програмне забезпечення та результати чисельного моделювання томографічного відтворення неоднорідностей в циліндричних виробах.

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ -



Робочий момент виставки

• В. Р. Скальський, П. М. Долішній, В. Б. Михальчук, Р. І. Семегенівський, ФМІ, Львів. Оцінка впливу водню на прояв ефекту Баркгаузена у нікелі.

• В. Р. Скальський, Т. В. Селівончик, ФМІ, м. Львів, ЛДТУ, Луцьк. Акустико-емісійна оцінка впливу водневого окрихчення конструкційної сталі.

• В. Р. Скальський, Ю. Л. Лотоцький, Р. І. Сулим, Р. М. Плахтій, ФМІ, Львів. Оцінка заникання пружних хвиль акустичної емісії у бетоні та залізобетоні.

• В. Р. Скальський, О. М. Сергієнко, Ю. С. Окрепкий, ФМІ, Львів. Акустико-емісійна оцінка руйнування пластинчастого графіту у матриці чавуна.

• Я. Л. Іваницьций, О. П. Бухало, Г. В. Микитин, М. М. Гвоздюк, З. В. Дмитрів, Є. П. Почапський, Б. П. Клим, ФМІ, Львів. Прилад для оцінювання магнітної післядії феромагнітних матеріалів.

• Р. А. Воробель, Г. І. Бавда, О. Р. Берегуляк, І. М. Журавель, І. Б. Івасенко, Т. С. Мандзій, Н. В. Опир, К. В. Сущик, ФМІ, Львів. Система «ОБРАЗ-ДЗ» автоматизованого оброблення та аналізу зображень, що формуються при неруйнівному контролі якості виробів.

• В. М. Учанін, А. Я. Тетерко, В. Г. Тихий, ФМІ, Львів, ДКБ «Південне», Дніпропетровськ. Вихрострумовий метод вимірювання проміжку між немагнітними оболонками двошарових конструкцій космічної техніки.

• О. П. Максименко, Л. І. Муравський, О. Г. Куць, Н. В. Фітьо, О. М. Сахарук, ФМІ, Львів. Оптико-цифровий спекл-корелятор для визначення полів переміщень деформованої поверхні.

• *О. М. Сахарук, Л. І. Муравський*, ФМІ, Львів. Оцінка відповідності положень фрагмента спекл-зображення та кореляційного піка.

• Т. І. Вороняк, А. Б. Кметь, Т. М. Маланчук, ФМІ, Львів. Виявлення підповерхневих дефектів в зразках конструкційних матеріалів засобами електронної спекл-інтерферометрії.

• О. М. Мокрий, В. В. Кошовий, І. М. Романишин, Р. В. Шарамага, ФМІ; Національний університет «Львівська політехніка», Львів. Нова схема детектування поверхневих акустичних хвиль з використанням інтерферометра Майкельсона.

• С. П. Почапський, Б. П. Клим, Г. В. Микитин, О. П. Бухало, З. В. Дмитрів, ФМІ, Львів. Критерії відбракування хибних подій при локації джерел акустичної емісії.



Посипайко Ю. М. щиро ділиться досвідом з колегами

Кілька доповідей представили співробітники університетів України, Росіі та Білорусі, що свідчить про виконання наукових досліджень в галузі НК і в навчальних закладах:

• А. Снарський, М. Женировський, В. Бакаєв, О. Бакаєв, А. Левченко, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ; Н. ROSEN Engineering GmbH, Німеччина. Ітераційний метод розв'язання інтегральних рівнянь прямої задачі магнітної дефектоскопії магістральних нафто- і газопроводів.

• О. І. Сіріков, Серебренников С. В., Кіровоградський національний технічний університет, Кіровоград. Діагностика стану забруднення високовольтних ізоляторів під напругою по струму витоку.

• Л. П. Теліпко, В. М. Манько, А. А. Ващенко, Дніпродзержинський державний технічний університет, ТОВ «МІТ», Дніпродзержинськ. Діагностування технічного стану будівельних конструкцій вентиляційних багатосекційних градірень.

• С. В. Прохоренко, П. М. Коваль, В. Я. Прохоренко, П. М. Сташук, П. Легутко, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Державний дорожній НДІ ім. М. Шульгіна, м. Київ; Жешівський університет, Жешів, Польща. Особливості застосування методу акустичної емісії для діагностики стану мостів.

• С. К. Паврос, С. В. Реука, Санкт-Петербургський державний електротехнічний університет «ЛЕТІ», Санкт-Петербург. Про вибір оптимальних параметрів струминного акустичного тракту.

• В. С. Белявський, І. С. Манак, Білоруський державний університет, Мінськ. Імпульсно-фазовий НВЧ далекомір.

Про свої дослідження в розробці дефектоскопів та автоматизованих установок розповіли представники ряду підприємств, що давно пропонують свою продукцію в Україні:

• Г. Я. Безлюдько, О. І. Йолкіна, НВФ «Спеціальні Наукові Розробки», Харків. Нові можливості експлуатаційного контролю стану втоми металу посудин тиску по зміні магнітної характеристики металу — коерцитивної сили.

• В. Б Галаненко, Г. Г. Луценко, Д. В. Галаненко, УкрНДІНК, Київ. Структура поля пружних хвиль, створюваних електромагніто акустичними випромінювача-



На засніжених схилах

ми в електропровідному неферомагнітному напівпросторі.

• А. А. Погорелов, П. Н. Желтов, УкрНДІТМ, Дніпропетровськ. Ультразвуковий контроль виробів із неметалів. Основні проблеми та способи їх вирішення.

• Л. Ю. Сабадош, С. Я. Яценко, В. І. Петренко, Н. А. Шумейко, В. А. Півень, Ю. А. Маховський, А. Є. Бавикін, В. М. Бойченко, ДНВП «Об'єднання Комунар», НТ СКБ «Полісвіт», Харків; ВАТ «Інгулецький ГЗК», НВФ «Укркомплект», Кривий Ріг. Пристрій для оцінки дольового складу магнетитового заліза в зразках руди.

Доповіді конференції видані окремою збіркою (звертатись в Оргкомітет). В холі конференц-залу проходила виставка засобів неруйнівного контролю та технічної діагностики. В ній брали участь:

- НВФ «Ультракон-Сервіс», м. Київ;
- НВФ «Промприлад», м. Київ;
- НВФ «Спеціальні Наукові Розробки», м. Харків
- НВФ «Інтрон-СЕТ», м. Донецьк;
- ТОВ «Шерл», м. Київ;
- ТОВ «Арматор», м. Дніпропетровськ;
- Центр «Леотест-Медіум», м. Львів.

Конференція пройшла в діловій та доброзичливій атмосфері. Під час роботи секцій учасники конференції мали час для плідних дискусій та відпочинку. Проживали учасники конференції в пансіонаті «Бойківщина», що розташувався на околиці Славського в оточенні багаторічних сосен, ялин та смерек, поблизу гірськолижних трас. Частину дня її учасники могли присвятити відпочинку на гірських лижах на схилах гір Тростян, Кремінь, Погар, Варшава та Високий Верх.

Організатори конференції чекають на Вас і в наступному році!

### Адреса оргкомітету: 79017, м. Львів-17, вул. Генерала Грицая, 11/5 Тел./факс: (0322) 75-08-69; E-mail: uchanin@ipm.lviv.ua aбo leotest@org.lviv.net

Інформаційне повідомлення підготовано Ю. М. Посипайко, IE3 ім. Є. О. Патона НАНУ

 $- \diamondsuit - \diamondsuit - \diamondsuit -$ 

# І СТУДЕНТСЬКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ У ПРОМИСЛОВОСТІ І МЕДИЦИНІ»

### Юрченко О. В., Протасов А. Г. (НТУУ «КПІ»)

<u>18 квітня</u> 2007 р. в м. Києві в Національному технічному університеті «Київський політехнічний інститут» (НТУУ «КПІ») вперше пройшла студентська науковопрактична конференція «Неруйнівний контроль у промисловості і медицині». Її організатором виступила кафедра приладів та систем неруйнівного контролю (ПСНК) приладобудівного факультету (ПБФ) НТУУ «КПІ». Головною метою організаторів був обмін інформацією та поглиблення знань студентів з видів і методів неруйнівного контролю, їх застосування у сучасній промисловості та медицині.

Відкрив конференцію Голова оргкомітету, завідувач кафедри ПСНК, доц. Протасов А. Г. Він відзначив зростаючу актуальність питань забезпечення працездатності та експлуатаційної надійності технологічного обладнання, що реалізується в багатьох випадках за допомогою засобів неруйнівного контролю і технічної діагностики, а також актуальність розвитку медичної діагностики в ракурсі поступового «молодшання» тяжких захворювань та відповідного дорожчання новітньої техніки і технологій, з чим пов'язана гостра необхідність розробки та виробництва вітчизняних систем меддіагностики. Тому основним завданням конференції є обмін інформацією про отримані результати і обмін досвідом у практичних аспектах проведення наукових досліджень студентами спеціальності «Прилади та системи неруйнівного контролю» та споріднених спеціальностей.

Учасників та гостей конференції привітав декан приладобудівного факультету НТУУ «КПІ» проф. Тимчик Г. С., який побажав успіхів учасникам в їх науковій діяльності та висловив побажання, щоб «перша студентська науково-практична конференція» набула статусу «щорічної міжнародної студентської науково-практичної конференції».

Окрім організаторів та учасників конференції, у залі були присутні гості з інших кафедр та факультетів НТУУ «КПІ», а також Національного авіаційного університету (НАУ). Конференцію відвідали учні ліцею «Універсум», які планують своє подальше навчання пов'язати з НТУУ «КПІ».

Поряд із науковими повідомленнями студентів НТУУ «КПІ» приладобудівного факультету (кафедри ПСНК, оптичних та оптико-електронних приладів (ООЕП)) та факультету електроніки були заслухані вис-

### ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ -

тупи студентів спеціальності інформаційно-вимірювальної техніки дружнього НАУ.

Протягом двох засідань, ранкового та вечірнього, до уваги слухачів було представлено понад 30 доповідей студентів. Наукові дискусії, що виникали під час роботи конференції, сприяли обміну інформацією щодо тематики науково-дослідних робіт студентів ІІІ–V курсів. Водночає студенти молодших курсів отримали конкретні поради щодо науково-дослідницької роботи від їх старших колег.

Особливий інтерес аудиторії викликали доповіді студентів Яцевського В., Супруненко М., Подоляна О. (НТУУ «КПІ», ПБФ, ПСНК), Воскресенського Я. (НТУУ «КПІ», ПБФ, ООЕП), *тези яких наведено ниж*че. Студентами ПСНК були представлені цікаві доповіді на медичну тематику: «Методи реконструкції трьохвимірних зображень, отриманих за допомогою ультразвукової медичної діагностичної системи» (Макота Ю.), «Огляд існуючих ультразвукових методів та

#### РЕЗОНАНСНІ УЛЬТРАЗВУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПОЗИТІВ З АЛЮМІНІВОЮ МАТРИЦЕЮ, ЗМІЦНЕНИХ ЧАСТИНКАМИ SIC

**М. Супруненко**, студентка V курсу НТУУ «КПІ», кафедра ПСНК (керівники: канд. техн. наук Вдовиченко О. В., Інт проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН Украї- ни; канд. техн. наук, доц. Протасов А. Г., НТУУ КПІ).



Композитні матеріали з алюмінієвою матрицею, що зміцнені частинками карбіду кремнію, мають великі перспективи використання в автомобільній та авіаційній промисловості завдяки під- вищеним характеристикам питомої пружності та міц- ності в порівнянні з базовими сплавами.

Механічні властивості композитів залежать як від вмісту та властивостей компонентів, так і

від розмірів та просторового розподілу фаз і пор.

Мета даної роботи полягає у визначенні залежності модуля пружності та декремента коливань композиту AlCuMn-SiC від середнього розміру частинок матриці методом резонансної ультразвукової спектроскопії. Цей метод оснований на вимірюванні частот власних пружних коливань стрижневого зразка певної форми та розмірів, вимірюванні ширини резонансної кривої та наступним визначенням властивостей і структури матеріалів. Зразки композитів були виготовлені екструзією попередньо спресованих порошків матриці та зміцнювача. Об'ємний вміст SiC в композиті змінювали від 5 до 20 %, середній розмір частинок металічного порошку становив від 40 до 180 мкм для різних груп матеріалів, а керамічних частинок — 14 мкм. Для усунення дефектів, що містились на поверхні, зразки після екструзії фрезерували до розмірів 50×5×3 мм. Всі ультразвукові вимірювання проводили в діапазоні 10...20 кГц.

пристроїв для діагностики в маммології» (Назаренко Н.) та ін.

За результатами конференції організаційний комітет нагородив дипломами шістьох студентів, що представили кращі доповіді. Найкращою названа доповідь студента кафедри ПСНК НТУУ «КПІ» Яцевського В. на тему «Численное исследование температурного поля сотовых конструкций при наличии дефектов и попадания воды».

Під час конференції студенти обмінялися думками щодо проведення навчального процесу і наукових досліджень у своїх ВНЗ та на своїх кафедрах, а також щодо актуальних питань студентського життя.

Підводячи підсумки І Студентської науково-практичної конференції «Неруйнівний контроль у промисловості і медицині», Голова оргкомітету висловив сподівання, що проведення такої конференції стане традицією і збиратиме все більшу кількість студентів, сприяючи популяризації наукової діяльності серед майбутніх фахівців.

Визначено, що при збільшенні середнього розміру частинки матриці композитів AlCuMn15%SiC при сталому розмірі частин SiC приводить до зниження модуля Юнга композита та відповідного зростання декремента коливань. Такі механічні характеристики викликані наявністю як пор, так і планарних дефектів в агломератах частинок кераміки.

### ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОНДИРУЮ-ЩИХ ИМПУЛЬСОВ В ЭМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

А. Подолян, студент V курса НТУУ «КПИ», кафедра ПСНК (руководитель: д-р техн. наук, проф. Маевский С. М., НТУУ «КПИ»)



Для углового ввода ультразвуковых колебаний требуется создание бегущей волны по границе раздела сред. Бегущая волна с заданной скоростью и направлением распространения может быть эффективно возбуждена с помощью ЭМА преобразователя, построенного на основе решетки элементарных проводников-излучателей, расположенных в одной плоскости.

Получено выражение для угла ввода ультразвуковой волны, который является функцией частоты изменения тока в нитях-излучателях и сдвига фаз подачи зондирующего сигнала на нити-излучатели.

На основе полученного выражения синтезирована функциональная схема узла управления ЭМА преобразователем для углового ввода ультразвуковой волны, который построен по цифровой схеме и включает несколько независимых формирователей гармонических колебаний, синхронизируемых от общей схемы управления. Получено выражение для задержек подачи сигнала на управляющие входы каналов формирования гармонических сигналов. Показана перспективность использования интегральных синтезаторов частоты, управляемых от микроконтроллера.

### ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

#### ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ГО ПОЛЯ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ НАЛИЧИИ ДЕФЕКТОВ И ПОПАДАНИЯ ВОДЫ

В. Яцевский, студент IV курса НТУУ «КПИ», кафедра ПСНК (руководитель: канд. техн. наук, доц. Протасов А. Г., НТУУ «КПИ»)



Конструкции из сотовых материалов, благодаря налиуникальных чию ряда свойств (в первую очередь их высокой относительной жесткостью и прочностью), широко применяются в самолетостроении, ракетной и космической технике, транспортном машиностроении, солнечной и тепловой энергетике, строительстве. Сотовые конструкции могут изготавливаться с использова-

нием сварки, пайки, клеевых соединений, методом горячего прессования, а также возможно применение сочетаний различных технологических процессов. В настоящее время используются трехслойные сотовые конструкции с алюминиевыми или углепластиковыми обшивками и сотовыми заполнителями из алюминиевой фольги, стеклоткани, углеродной ленты, пленки ПЭТФ, полимерной бумаги «Номекс», крафт-бумаги. В частности, к сплавам на основе алюминия относятся АМгб, АМг2, АМг, Д16АТ, АЦМУ. При замене монолитных конструкций на сотовые можно достигнуть снижения массы на 25...55 %, появляются новые возможности создания тепло- и шумозащитных конструкций, создания радиопрозрачных конструкций, что особенно ценно для военных самолетов.

Постоянное ужесточение требований к качеству выпускаемых сотовых заполнителей в связи с непрерывно усложняющимися условиями эксплуатации, разработка новых видов сотовых заполнителей, необходимость неразрушающего контроля в процессе производства и на этапе эксплуатации требуют создания адекватных компьютерных моделей для прогнозирования состояния сотовых конструкций при наличии тех или иных дефектов (отслоения, непроклеи и т. д.) или попадания влаги внутрь сотового заполнителя. С помощью варьирования геометрическими и теплофизическими параметрами модели, производя ряд последовательных расчетов можно осуществить оптимизацию сотовых конструкций и сотовых заполнителей.

Трехмерная геометрическая компьютерная модель содержит обе наружные обшивки (сплав алюминия), клеевые прослойки или припой и сотовый заполнитель. Внутри сотовой ячейки находится воздух, или композиция — внизу вода, а сверху воздух. Все элементы

модели имеют различные теплофизические свойства и плотность. На границах шестигранной призмы (соты) задавались адиабатические граничные условия, на одной из наружных обшивок — тепловой поток (граничные условия второго рода), на противоположной обшивке — конвективные граничные условия (третьего рода). Задача решалась в стационарной и нестационарной постановке с помощью конечно-элементного метода, реализованного в программном комплексе ANSYS.

### СИНТЕЗ ГОЛОГРАФІЧНИХ ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

**Я.** Воскресенський, студент V курсу HTVУ «КПІ», кафедра ООЕП (керівник: канд. фіз.-мат. наук, доц. Богатирьова Г. В., HTVУ «КПІ»)



Сучасна оптична промисловість висуває нові високі вимоги до таких параметрів оптичних деталей, як світлосила, роздільна здатність та якість зображення, що формується чи обробляється за допомогою оптичних елементів, а також до габаритів, ваги та інших конструктивних параметрів цих деталей. Комп'ютерний синтез та новітні технології виготовлення дозволяють отримати

дифракційні оптичні еле-

менти дуже великих чи дуже малих розмірів без використання важкого та вартісного скла з високою якістю та можливістю виправлення аберацій на стадії розрахунку, перекачки енергії падаючого випромінювання в одному чи декількох вибраних напрямах тощо.

В роботі показано етапи формування дифракційних оптичних елементів: 1) приведено алгоритм програмування дифракційних оптичних елементів типу сферична та циліндрична лінзи, дифракційна гратка, гратка для синтезу мод, який будується на основі теорії інтерференції хвиль; 2) описано методи виготовленні таких елементів: голографічний, фотографічний, фотолітографічний, метод пресування або тиснення; 3) показано схеми та основний принцип запису та зчитування голограм; 4) продемонстровано готові дифракційні оптичні елементи та об'ємні голограми та наведено перспективні області застосування таких елементів: це формування та обробка зображень у мікроскопах, телескопах та проекційних системах, кодування та передача даних по волоконнооптичному тракту, неруйнівна безконтактна діагностика, зображення музейних експонатів тощо.

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ -

# НОВОСТИ

#### ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС «InfoPipeMaster»

В Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НА-НУ розроблено програмний комплекс «InfoPipeMaster», призначений для моніторингу реального стану повітряних переходів магістральних трубопроводів. В його основі лежить інтегрована База Даних, в якій зберігається різноманітна інформація по повітряним переходам, розділена на окремі проміжки часу (фотографії, схеми та протоколи з даними геодезичних та корозійних об-

### ПОРТАТИВНИЙ 8-КАНАЛЬНИЙ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНИЙ ПРИЛАД

У Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України розроблено восьмиканальний акустикоемісійний прилад для відбору, реєстрації та обробки сигналів акустичної емісії. Прилад призначений для використання в області неруйнівного контролю матеріалів, виробів та конструкцій різної форми та функціонального призначення. Застосовані SMD-елементи та здійснена адаптація його програмного забезпечення для роботи з операційними системами сімейства Windows. У програмному забезпеченні реалізовані функції для обробки вхідних даних, їх візуального відображення, визначення координат дефектів та збереження отриманих результатів у пам'яті комп'ютера.

Вище перераховані властивості, а також висока швидкість обміну даними між приладом і персональним комп'ютером (12 Mbit/s), що забезпечує можливість роботи в режимі реального часу, та ефективне програмне забезпечення дозволяють конкурувати з розробками знаних світових виробників, таких як РАС, Vallen Systeme, Интерюнис тощо.

### КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ТЕЧЕИСКАТЕЛЬ «КОРШУН-10»

В результате сотрудничества ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины и МП «ДИСИТ» был создан корреляционный течеискатель «КОРШУН-10».

Прибор предназначен для определения координат утечек в подземных напорных трубопроводах систем тепло-, водо- и нефтеснабжения независимо от глубины их прокладки и вида грунта.

Прибор «КОРШУН-10» является продолжением



серии течеискателей «КОРШУН», хорошо зарекомендовавших себя в различных регионах Украины и России.

На концах диагностируемого участка трубопровода, находящегося под давлением, устанавстежень, геометричні моделі для розрахунків на міцність, значення тисків в трубопроводі, матеріали труб тощо). В комплекс інтегровано розрахункові модулі по оцінці міцності труби та небезпеки знайдених дефектів, що дозволяє в режимі on-line аналізувати вплив зміни геометрії переходу, зумовленої різними причинами (зсуви та ерозія рунтів, просідання опор, зсув переходу відносно опор тощо) на його стан. Програмний комплекс впроваджено в ВАТ «Укртранснафта».

Прилад можна використовувати як для моніторингу та технічної діагностики об'єктів довготривалої експлуатації (мости, резервуари, ємностей високого тиску, трубоп-



роводи та ін.), так і

в лабораторних умовах для фундаментальних і прикладних досліджень конструкційних матеріалів на статичну та циклічну тріщиностійкість, повзучість, пластичне деформування, зародження та розвиток холодних і гарячих тріщин під час зварювання тощо.

У порівнянні з розробками відомих світових виробників прилад має низку переваг: портативність (габаритні розміри 370×256×30 мм, вага — 2,1 кг), автономне живлення, струм споживання 120 мА, чутливість до переміщення поверхні контролю  $10^{-14}...10^{-12}$  м. Підключення через USB-інтерфейс забезпечує високу швидкість обміну даними між приладом і персональним комп'ютером.

ливаются с помощью магнитных держателей вибропреобразователи, улавливающие шум утечки. Принимаемые сигналы усиливаются и по каналам связи (кабельным или радиоканалам) передаются в блок оператора. Исходной информацией для течеискателя являются: длина диагностируемого участка трубопровода, диаметр и материал трубы, вид и температура транспортируемой среды. Принцип действия течеискателя основан на измерении разности времен прихода к датчикам поперечных гидравлических волн, создаваемых утечкой, путем обнаружения подобных сигналов и определения координаты утечки по экстремуму корреляционной функции.

Длина диагностируемого участка трубопровода достигает 2 кг, диаметр — 1200 мм. Многократные сравнительные трассовые испытания показали, что «КОР-ШУН-10» по чувствительности, точности, помехозащищенности не уступает лучшим зарубежным аналогам. Характеризуется индустриальным исполнением. В отличие от аналогов имеет расширенный температурный рабочий диапазон — от –30 до +50 °C.

# ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ<sup>\*</sup>

Спосіб рентгенотелевізійної дефектоскопії, відрізняється тим, що необхідні умови просвічування (тривалість накопичення зображення та потужність експозиційної дози рентгенівського випромінювання) визначають за допомогою попередньо розрахованих сімей залежностей відношення сигнал/шум від режимних параметрів джерела рентгенівського випромінювання, властивостей об'єкта (матеріал та товщина) та характеристик очікуваного дефекту (відносний розмір), а за допомогою цифрової моделі застосованого рентгеноелектричного перетворювача, яка створена на основі заздалегідь розрахованої та прокаліброваної за еталонними зразками (плоскопаралельними пластинами тих чи інших матеріалів з каліброваними товщинами) у контрольних точках сім'ї амплітудних характеристик даного рентгеноелектричного перетворювача, і яка враховує результат впливу на формування зображення наявних індивідуальних особливостей конкретної апаратури (неоднорідностей фону по полю зображення), відтворюють зображення плоскопаралельної пластини, матеріал та товщина якої відповідають по поглинанню рентгенівського випромінювання матеріалу та товщині бездефектного об'єкта, а закладені до цифрової моделі режимні параметри рентгенівського апарата та детектора рентгенівського випромінювання, які складають рентгеноелектричний перетворювач, відповідають раніше визначеним значенням таких параметрів для забезпечення необхідного відношення сигнал/шум при дефектоскопії об'єкта з даними властивостями, та запам'ятовують відтворене за допомогою цифрової моделі зображення, після чого просвічують об'єкт за таких саме значень режимних параметрів рентгеноелектричного перетворювача, з одержаного зображення об'єкта віднімають відтворене за допомогою цифрової моделі зображення бездефектної пластини, різницеве зображення запам'ятовують, після чого використовують його для визначення наявності дефектів, вимірювання параметрів визначених дефектів та визначення придатності об'єкта. Патент України 19254. М. Г. Білий, С. В. Денбновецький, О. В. Лещишин та ін. Нац. техн. ун-т України «КПІ» (№ 12)\*\*.

Способ диагностирования рельсовых плетей металлического моста и устройство для его осуществления, отличающийся тем, что при наезде поезда на рельс непрерывно измеряют продольные и поперечные деформации рельса и скорость изменения продольной и поперечной деформаций, причем прием и регистрацию акустических сигналов начинают при скорости изменения продольной деформации отличной от нуля, а прекращают — при скорости изменения поперечной деформации отличной от нуля и возобновляют прием акустических сигналов при скорости изменения поперечной деформации равной нулю, а прекращают при скорости изменения продольной деформации равной нулю. Патент РФ 2284519. Муравьев, Муравьев В. В., Степанова Л. Н. и др. Сибир. гос. ун-т путей сообщения.

Устройство размагничивания магистральных трубопроводов, отличающееся тем, что постоянные магниты расположены на корпусе-носителе, имеющем возможность движения вдоль и внутри трубы, и распределены по периметру в трех кольцевых рядах, плоскости которых перпендикулярны продольной оси трубы и удалены друг от друга на расстояние, обеспечивающее после воздействия полей постоянных магнитов получение остаточной намагниченности участков трубы, причем в каждом ряду магниты обращены к внутренней поверхности трубы однополярными полюсами, а полюса магнитов, обращенных к внутренней поверхности трубы, последовательно расположенных рядов, противоположны по знаку, при этом напряженность поля, создаваемая магнитами первого ряда, обеспечивает наибольшую остаточную индукцию В1 материала размагничиваемой трубы, напряженность поля, создаваемая магнитами второго ряда, обеспечивает перемагничивание материала трубы до остаточной индукции В2, при этом B1 > B2, а напряженность поля, создаваемая магнитами третьего ряда, размагничивает материал трубы. Патент РФ 2285254. Шелихов Г. С., Лозовский В. Н., Красильников В. А. и др. ДНТЦ «Дефектоскопия».

Способ неразрушающего контроля качества детали с покрытием, нанесенным на основу методом взрывного плакирования, включающий нагрев контролируемой детали до температуры, вызывающей снижение прочностных характеристик не менее чем в 1,5 раза и провоцирующей деформацию покрытия в зоне неудовлетворительного

<sup>\*</sup> Приведены сведения о патентах на изобретения, опубликованные в Бюллетенях РФ за 2006 г.

<sup>\*\*</sup> Опубликовано в Бюллетне Украины «Промислова власність» за 2006 г.

## ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

соединения покрытия с основой, а по наличию деформации покрытия определяют наличие дефектов. Патент РФ 2285914. Малинов В. И., Серов В. Ф. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭСР».

Автоматизированная установка для дефектоскопии колесных пар вагонов, отличающаяся тем, что средство диагностики снабжено блоком генераторов, блоком синхронизации, оптическим датчиком метки и электромагнитно-акустическими преобразователями, выходы электромагнитноакустических преобразователей через блок усилителей подключены к входу блока предварительной обработки информации, который соединен с вычислительным блоком, входы электромагнитноакустических преобразователей подключены к соответствующим выходам блока генераторов, выход оптического датчика метки соединен с входом блока синхронизации, к выходу которого подключены входы синхронизации блока генераторов, блока предварительной обработки информации и пульта управления, который соединен с цепями управления устройства подачи колесных пар с механизмом их разворота, устройства очистки зоны контроля, устройства вращения колесных пар и кареток, при этом электромагнитно-акустические преобразователи установлены в каретках так, что по отношению к контролируемому изделию первый электромагнитно-акустический преобразователь, формирующий волны Рэлея, и второй приемный электромагнитно-акустический преобразователь расположены под углом к оси катания колеса, третий электромагнитно-акустический преобразователь, излучающий и принимающий сдвиговые волны, расположен над поверхностью обода колеса ... . Патент РФ 2289128. Горделий В. И. *НПФ* «Вигор».

Способ неразрушающего испытания или регистрации результатов измерений дискообразных или кольцеобразных объектов, в частности колесных бандажей или колес железнодорожного подвижного состава, при котором испытуемый объект помещают на два расположенных на некотором расстоянии друг от друга опорных ролика, каждый из которых установлен на подшипнике с возможностью вращения, причем испытуемый объект удерживают в положении тестирования с помощью поддерживающего ролика, расположенного на некотором расстоянии от опорных роликов, характеризующийся тем, что поворотное устройство поворачивают вокруг оси вращения, причем помещенный на поворотном устройстве ходовой ролик перемещают до прилегания к тестируемой поверхности испытуемого объекта, по меньшей мере, один помещенный на поворотном устройстве датчик устанавливают в положение тестирования, причем, по меньшей мере, один датчик перемещают вдоль тестируемого участка. Патент РФ 2289811. Барч Томас и др. ООО «Лепунов и партнеры».

Вибрационный способ диагностики начала процесса разрушения в элементах конструкции объекта, отличающийся тем, что на основе практического опыта, инженерных расчетов, исследований устанавливается допустимое пороговое значение разности сравниваемых сигналов датчиков, превышение которого в процессе эксплуатации объекта квалифицируется как начало процесса разрушения, о чем выдается предупреждающий сигнал, при этом функции порогового элемента с регулируемым порогом, контролирующего превышение порогового значения разности сравниваемых сигналов датчиков, могут быть реализованы любыми средствами. Патент РФ 2284518. Нариманов М. В., Нариманов Т. В.

Внутритрубный крот для контроля качества сварных торцевых соединений, отличающийся тем, что блок камер выполнен в виде набора отдельных детекторов, размещенных в плоскости поперечного сечения трубопровода равномерно по окружности и симметрично относительно продольной оси трубопровода с возможностью одновременного панорамно-кругового приема отраженного потока панорамно-направленного рентгеновского излучения, при этом плоскости блока камер и источника рентгеновского излучения расположены по разные стороны плоскости, образованной контактной окружностью стыкуемых сварным соединением торцов труб в пределах 4...5 мм, и отстоят от нее на равных расстояниях вдоль оси трубопровода, а кольцевая головка выполнена трапецеидальной формы, обеспечивающей угловой панорамный поток рентгеновскому излучению, направленному на стыковое сварное соединение так, чтобы угол излучения рентгеновского потока был равен углу отражения потока от структуры материала сварного шва, второй датчик позиционирования расположен между плоскостями блока камер и источника панорамно-направленного излучения, т. е. в плоскости, совмещенной с плоскостью, образованной стыком сварных труб. Патент РФ 2285252. Клюев З. В., Кузин М. А., Воропаев С. И. и др. ЗАО «Спектр».



# ПОЗДРАВЛЯЕМ ЮБИЛЯРА!

6 апреля 2007 года исполнилось 70 лет со дня рождения доктора технических наук, профессора, академика транспортной академии Украины, известного ученого в области машиноведения, стандартизации и сертификации, неразрушающего контроля и технической диагностики, общественного деятеля Белокура Ивана Павловича.

Иван Павлович после срочной службы на Северном флоте окончил в 1967 г. Киевский государственный университет им. Т. Г. Шевченко и работал до 1976 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона инженером, ведущим

инженером, руководителем группы. В 1975 г. окончил аспирантуру при Физико-механическом институте им. Г. В. Карпенко НАН Украины. После защиты кандидатской диссертации в 1976 г. возглавил лабораторию технической диагностики УкрНИИпродмаш. Он один из организаторов в Киевском политехническом институте специальности «Физические методы контроля». В 1980 г. переведен на должность доцента кафедры приборов и систем неразрушающего контроля. В 1986 г. на сварочном факультете организовал структурную лабораторию контроля качества сварных соединений. В 1990 г. в МВТУ им. Н. Баумана защитил докторскую диссертацию на тему «Разработка элементов теории и средств определения концентрации напряжений в вершинах дефектов сварных соединений» и работал на должности профессора кафедры сварочного производства НТУУ «КПИ» до 2000 г.

С 2000 г. в Национальном авиационном университете возглавляет кафедру машиноведения и организованный им научно-технологический центр «Эксперт».

И. П. Белокуром разработаны научные основы комплексной дефектоскопии в космосе, непрерывной рентгенографии в условиях радиационного фона. Под его руководством и непосредственном участии развиты вихретоковые и ультразвуковые методы ручного контроля с документальной регистрацией результатов. Разработаны и внедрены на машиностроительных заводах установки и лаборатории рентгентелевизионного контроля, а также передвижные диагностические лаборатории для Республики Куба. Разработана концепция развития неразрушающего контроля авиационной техники, которая воплощается в практику. Иван Павлович является организатором научной школы по качеству, стандартизации и сертификации в НТУУ «КПИ». Организовал работы по сертификации персонала неразрушающего контроля и персонала, выполняющего специальные технологические процессы при изготовлении, обслуживании и ремонте авиационной техники в соответствии с требованиями международных стандартов. И. П. Белокур возглавляет экспертный центр авиационной администрации Украины, более 30 лет ведет подготовку специалистов высшей квалификации. Имеет третий уровень квалификации по пяти методам НК.

Творческая энергия, целеустремленность, уникальная работоспособность, талант ученого и преподавателя обеспечили весомые результаты, которых достиг Иван Павлович. Им опубликовано три монографии, восемь учебных пособий, более 160 научных работ и изобретений. Свои знания и опыт охотно передает молодежи — им подготовлено шесть кандидатов и одного доктора наук. Иван Павлович — руководитель научных тем по разработке методов определения технического состояния авиационной техники; Президент украинской ассоциации специалистов по неразрушающему контролю и технической диагностики «OKO»; руководитель научного отделения «Промышленный, городской, трубопроводной и нетрадиционные виды транспорта» Транспортной академии Украины; член специализированного и експериментального Совета по вопросам ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин при Президиуме НАНУ, член Технического комитета по стандартизации № 78, член правления УОНК ТД, член редколлегии журнала ТД и НК, награжден почетной грамотой министра образования, двумя медалями и золотой медалью ВДНХ СССР.

По случаю славного юбилея желаем Вам. Иван Павлович. крепкого здоровья, счастья, долгих лет жизни, деловой и творческой активности!

## ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ -



# ПОЗДРАВЛЯЕМ ЮБИЛЯРА!

1 апреля 2007 г. исполнилось 70 лет Висиловскому Николаю Григорьевичу, заведующему лабораторией технического диагностирования ООО «Сереп», кандидату технических наук.

Николай Григорьевич начал свою трудовую деятельность в 1956 г. техником-электриком в Гниванском карьероуправлении по добыче гранита.

В 1965 г. закончил Харьковский политехнический институт и был направлен на работу на ПО «Ждановский завод тяжелого машиностроения». Проведенные им испытания по специальным программам и методикам, а также разработанные предложения по устранению выявленных недостатков позволили обеспечить требуемую надежность ответственных элементов выпускаемых машин.

При проведении статических прочностных, а также циклических прочностных испытаний еще в 1973 г. Н. Г. Висиловским был применен метод акустической эмиссии, позволяющий прогнозировать предразрушающее состояние металлических конструкций. С этой целью была изготовлена специальная аппаратура. Результатом этих работ явилась диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, защищенная в 1979 г.

Комплексный подход к решению проблем создания новой техники путем обеспечения обратной связи между проектированием, изготовлением и эксплуатацией явилось характерной особенностью его деятельности. Николай Григорьевич разработал метод ускоренных ресурсных испытаний цистерн на автомобильном ходу в сборе. Для этих целей создано устройство, обеспечивающее воспроизведение широкого спектра нагрузок, эквивалентных эксплуатационным.

Николай Григорьевич — признанный специалист по техническому диагностированию с использованием метода акустической эмиссии на объектах повышенной опасности Украины, России, Узбекистана, Казахстана. Его профессиональная классификация подтверждена международным третьим уровнем (DAR) по акустической эмиссии.

На протяжении многих лет Висиловский Н. Г. совмещал практическую и научную деятельность на производстве с преподавательской деятельностью в Ждановском металлургическом институте и Мариупольском филиале Одесской государственной морской академии. Он автор 29 печатных работ по вопросам АЭ-контроля и диагностики.

Благодаря стараниям и опыту Н. Г. Висиловского, на промышленных предприятиях Мариуполя при техническом диагностировании изделий широко используется метод акустической эмиссии. Он проводит подготовку и обучение специалистов по акустической эмиссии не только для Украины, но и для стран СНГ.

Деятельность Николая Григорьевича многогранна. Он активно работает в составе Технического комитета Госстандарта Украины ТК-78 «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», является членом редколлегии журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль».

Николаю Григорьевичу присущи любознательность, интерес ко всему новому. Он пользуется заслуженным авторитетом среди сотрудников не только как технический специалист, но и как примерный семьянин.

Сердечно поздравляем Николая Григорьевича с прекрасным юбилеем. Желаем здоровья, счастья, востребованности и долгих лет жизни!

# ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛА «ДЕФЕКТОСКОПИЯ» (РФ) за 2006 г.



Горшков В. А., М. Кренинг. Сравнительный анализ топографии на трансмиссионном и рассеянном рентгеновском излучении, № 4.

Гусев А. П., Косовец С. А. Влияние размагничивающего действия поверхности раздела сред на поле поверхностных дефектов при намагничивании приставным электромагнитом, № 5.

Данилов В. Н. Программа компьютерного моделирования работы электроакустических трактов дефектоскопов «ИМПУЛЬС+», № 3.

Данилов В. Н., Самохвалов В. Н. Применение АРД-диаграмм для настройки чувствительности метода ультразвукового контроля осей колесных пар подвижного состава, № 4.

Добманн Г., Альтпетер И., Копп М. Неразрушающее определение характеристик материалов стальных образцов облученных корпусов атомных реакторов с помощью микромагнитных методов с целью определения механических свойств, № 4.

Дымкин Г. Я., Бочарова И. В., Пудовиков С. А., Шевелев А. В. Методические принципы и технологии приемочного ультразвукового контроля осей колесных пар, № 3.

Жуковский М. Е., Подоляко С. В., Йениш Г.-Р., Беллон К. Численное моделирование процессов рассеяния рентгеновского излучения при радиографическом контроле материалов, № 6.

Захаров А. В. Преимущества ультразвуковых хордовых преобразователей в эластичном протекторе без корпуса для контроля сварки трубных изделий, № 2.

Зуев В. М., Капустин В. И., Карпенко А. И., Ванькова Н. Е. Радиографический контроль и техническая диагностика, № 3.

Зуев В. М. Контроль структуры металла при рентгенографии сварных соединений, № 3.

Иванов В. Е., Башкинова В. Н. Визуализация и топографирование магнитного поля рассеяния

неспошностей типа «трещина» в магнитных материалах, № 1.

**Ильясов Р. С., Боровкова М. А.** Новый метод дефектоскопии внутренних дефектов ферродиэлектриков и сегнетоэлектриков, № 4.

Коган Л. Х., Ниипурук А. П., Гаврилова Л. Г. Влияние содержания углерода на магнитные электрические свойства термообработанных углеродистых сталей и возможности контроля качества отпуска изделий из них вихретоковым методом, № 9.

Кондартьев А. И., Иванов А. Н., Химухин С. Н. Влияние термообработки на акустические характеристики материалов, № 3.

Лебедев М. Б., Сидуленко О. А., Удод В. А. Выбор параметров дискретно-сканирующих систем цифровой рентгенографии, № 11.

Ли Кинькун, Ку Пейвен, Гуо Хуавей, Сон Шупень. Устранение шума из сигналов ультразвукового контроля с использованием метода отделения ослепляющих сигналов, № 1.

Лоскутов В. Е., Матвиненко А. Ф. Патраманский Б. В., Щербинин В. Е. Магнитный метод внутритрубной дефектоскопии, газо- и нефтепроводов: прошлое и настоящее, № 8.

Лухвич А. А., Шукевич А. А., Кременькова Н. В., Булатов О. А. Магнитный метод контроля слоистых структур, № 8.

Макаров А. В., Горкунов Э. С., Коган Л. Х., Колобылин Ю. М., Коршунов, Осинцева А. Л. Вихретоковый и коэрцитиметрический контроль абразивной износостойкости шарикоподшипниковой стали ШХ15, подвергнутой лазерной и объемной термическим обработкам, № 10.

Наседкин А. В., Шихман В. М., Захарова С. В., Иванилов И. В. Применение конечно-элементных методов для расчета систем акустикоэмиссионного контроля, № 2.

Никитина Н. Е., Камышев А. В., Смирнов В. А., Борщевский А. В., Шарыгин Ю. М. Определение осевых и окружных напряжений в стенке закрытой трубы ультразвуковым методом на основе явления акустоупругости, № 3.

Новиков В. Ф., Семенов В. В., Бахарев М. С., Исаков В. В. О возможности неразрушающего определения предела выносливости стали 20H2M, № 3.

Петров В. А. Анализ с позиций кинетической теории разрушения результатов акустико-эмиссионного контроля при перегрузочном испытании, № 11. ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

# ИЄС им. Е. О. Патона НАНУ ПРЕДСТАВЛЯЕТ

# ЕМА-З — ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ. 100%-НЫЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ И ИСПЫТАНИЙ БЕЗ ИХ РАЗБОРКИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ

**Диагностическая система ЕМА-3** предназначена для оценки состояния и определения разрушающих нагрузок сосудов высокого давления, хранилищ различного назначения, компрессорных станций, магистральных трубопроводов, агрегатов котлов, котельных установок, подвижных деталей, роторов турбин, элементов мостов и других конструкций и агрегатов в процессе испытаний и эксплуатации.

Аппаратное обеспечение выполняет автоматизированные измерения, сбор, обработку и хранение диагностической информации. Программное обеспечение формирует и выдает информацию о состоянии конструкций, предупреждает о возможной опасности и прогнозирует сохранение их работоспособности.

Диагностическая система ЕМА-З используется также для решения задач акустико-эмиссионного (АЭ) контроля общих при технологическом процессе сварки, для непрерывного мониторинга изделий в течение всего процесса эксплуатации, принятия решения о состоянии контролируемых изделий. Базовый вариант системы ЕМА-З поставляется с 16-ю акустическими датчиками и 16-ю дополнительными низкочастотными каналами для измерения сопровождающих испытания параметров. Число датчиков по желанию заказчика может быть увеличено.



#### Программное обеспечение ЕМА-З

- предназначено для управления диагностической аппаратурой в процессе испытаний
- и для обработки результатов испытаний;
- построено на основе компонентной технологии и позволяет легко наращивать возможности;

• в процессе испытаний определяет координаты развивающихся дефектов, прогнозирует разрушающую нагрузку на ранних этапах нагружения и оценивает остаточный ресурс контролируемого изделия;

- позволяет после испытаний моделировать их повторно и проводить углубленный анализ,
- изменяя настроечные параметры и алгоритмы обработки.

**Результаты испытаний** могут быть представлены в виде таблиц и графиков, а также опубликованы в Интернет. Сохраняются результаты испытаний в файлах или в базе данных, где их обработка может быть выполнена на основе сложных запросов — выборок. По результатам испытаний программа автоматически создает готовый к печати отчет.

### Основные преимущества ЕМА-З перед конкурирующими решениями

• Интеллектуальные возможности автоматизированной оценки и прогноза состояния конструкций в реальном времени, без привлечения специалистов.

- Простота использования, настройки, внедрения и масштабирования.
- Интеграция в существующие компьютерные сети предприятий.
- Минимальные затраты средств и времени на переход от периодического контроля
- к непрерывному мониторингу.

Дистанционное управление, поддержка и обучение с использованием сети Интернет.

Аппаратное и программное обеспечение проходят метрологическую проверку на базе ЦСМ Госпотребстандарта Украины. Государственные стандарты Украины и нормативные документы, согласованные с Госгортехнадзором Украины, обеспечивают применение системы на различных промышленных конструкциях. На базе Госгортехнадзора и Технического комитета по технической диагностике и неразрушающему контролю Украины осуществляется обучение и сертификация специалистов по применению приобретенной системы. Существует сервисная служба, осуществляющая обслуживание и сопровождение системы в процессе ее эксплуатации.

Системы ЕМА-З широко применяются на предприятиях Украины. В настоящее время функционируют семь комплексов непрерывного мониторинга крупных химических производств, а также мобильные диагностические лаборатории. За последние 16 лет с применением систем семейства ЕМА испытано более 1000 объектов в Украине, России и Польше.

#### ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев Предприятие «Индпром», Киев. Тел.: 289-06-60; e-mail: ned@paton.kiev.ua

## НПФ «СПЕЦИАЛЬНЫЕ НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ» ПРЕДСТАВЛЯЕТ

# УЛУЧШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НЕРАЗРУШАЮЩИМ КОНТРОЛЕМ ПО МАГНИТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ МЕТАЛЛА — КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЕ

#### БЕЗЛЮДЬКО Г. Я., СОЛОМАХА Р. Н., НПФ «Специальные Научные Разработки», Харьков, Украина; КОВБАСЕНКО С. Н., Ин-т ядерных исследований НАН Украины, Киев; МУРАВЬЕВ Е. В., Диагностическая фирма «КАМЕРТОН», Москва, Россия

Показана возможность неразрушающего контроля усталостного состояния как сварных соединений, так и основного металла конструкций и оборудования. Эта эксклюзивная диагностика особенно эффективна при использовании приборов и методик фирмы «СНР».

Коэрцитивная сила ( $H_c$ ) является эффективным параметром оценки текущего состояния металла в течение всего срока службы. Уже с момента пуска оборудования она «чувствует» остаточные, монтажно-сборочные, конструкционные и другие напряжения и деформации. С ростом службы оборудования нарастают и необратимые усталостные изменения металла, к которым  $H_c$  особенно чувствительна. Поэтому и коэрцитиметрический мониторинг зон концентрации нагружений с увеличением времени работы становится все более значимым. Как мера совокупного воздействия всех эксплуатационных факторов, влияющих на структуру, величина  $H_c$  при превышении некоторого порогового значения является надежным предвестником усталостных дефектов. Следовательно, коэрцитиметрический мониторинг как сварных соединений, так и основного металла позволяет реально перейти в диагностике от поиска дефектов к гораздо более эффективной концепции их предупреждения.

Величина *H*<sub>с</sub> перед появлением усталостного дефекта в зоне нагружения возрастает в 2...3 раза (в зависимости от марки металла). Это подтверждают результаты НК сварных соединений, а также стендовые разрушающие испытания образцов металла (статические и циклические, в режиме малоцикловой усталости). Из практики контроля оборудования известно, что в некоторых зонах металл начинает разрушаться намного раньше, чем это предусмотрено расчетами. Значит реальные нагрузки в такой зоне контроля локально существенно превышают расчетные значения. Или же под действием совокупности неучитываемых эксплуатационных факторов металл в такой зоне быстрее теряет свои прочностные характеристики и не может сопротивляться расчетным нагрузкам. В действительности имеют место оба эти механизма локального ускорения усталости.

Коэрцитиметрическая оценка степени усталости и скорости ее накопления хорошо соответствует реальным физическим процессам деградации металла. Это позволяет по измерениям  $H_{\rm C}$  наиболее обоснованно судить об отработанном ресурсе, точнее прогнозировать остаточный. Измерять  $H_{\rm C}$  нашими коэрцитиметрами в процессе обычных регламентных работ много проще, быстрее и дешевле, чем любые другие параметры НК. Здесь не нужна никакая зачистка или контактная жидкость. Измерения можно выполнять вручную или манипулятором. Можно работать по горячему металлу и через слой защитного покрытия в несколько миллиметров.

Особо эффективна двухпараметрическая диагностика при сочетании коэрцитиметрии с измерениями толщины нашими бесконтактными ЭМА-толщиномерами, потому что даже слабые признаки пластического деформирования металла вызывают резкое увеличение величины  $H_c$ . И это сопровождается локальным утонением металла из-за его перехода в состояние текучести. И наоборот, из-за ускоренного локального корродирования металла уменьшается его толщина. Это ведет к локальным же перегрузкам, сопровождающимся выраженным увеличением величины  $H_c$ . Классификация таких опасных зон по двум параметрам НК повышает надежность контроля.

Кроме того, по аномальным значениям *H*<sub>C</sub> такие зоны лучше выявлять. Области металла, имеющие текущие значения *H*<sub>C</sub> ниже определенного (для каждой марки стали) граничного значения, не содержат усталостных дефектов. Поэтому в таких зонах не надо проводить дефектоскопию. Обоснованно сокращаются объемы диагностических работ без снижения достоверности. При такой концепции диагностики существенно уменьшается ее стоимость, а надежность работы оборудования возрастает. Результаты многолетних практических измерений оборудования энергоблоков российских АЭС с использованием наших приборов и методик хорошо признаны специалистами служб эксплуатации и наши приборы имеют приоритеты среди других диагностических предложений (*иллюстрации см. на 3-й стр. обложки*).

### ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

УЛУЧШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ, ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И СЕБЕСТОИМОСТИ ДИАГНОСТИКИ МЕТАЛЛА ОБОРУДОВАНИЯ ТЭЦ И АЭС С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭМА-ТОЛЩИНОМЕТРИИ

#### Г. Я. БЕЗЛЮДЬКО, Е. В. ДОЛБНЯ, Р. Н. СОЛОМАХА, С. М. УДОВЕНКО, НПФ «Специальные Научные Разработки», Харьков, Украина; Е. В. МУРАВЬЕВ, Диагностическая фирма «КАМЕРТОН», Москва, Россия

Кратко изложены достоинства ЭМА-метода вообще и ЭМА-толщиномеров фирмы «СНР» в частности, а также преимущества диагностики оборудования энергоблоков, построенной на ЭМА-толщинометрии, состоящие в совокупном улучшении себестоимости, производительности и достоверности контроля состояния металла.

Электромагнитоакустические (ЭМА) ультразвуковые толщиномеры имеют ряд только им присущих преимуществ перед традиционными приборами с пьезодатчиком. Поэтому у них лучше производительность, достоверность и себестоимость контроля. Так, наши ЭМА-толщиномеры не требуют зачистки поверхности металла от ржавчины, шероховатости, защитного красочного слоя и других покрытий толщиной до 2...3 мм! При этом толщина металла измеряется без учета толщины покрытия. Такова физика ЭМА-метода, позволяющая измерять толщину металла всегда независимо от угла наклона ЭМА-датчика на поверхности контроля как на плоской, так и на криволинейной. В ЭМА-методе не нужна контактная жидкость.

Возможны измерения по горячему металлу при температурах порядка 700 °С и при любых природных отрицательных температурах. И на объектах под водой. В наших ЭМА-толщиномерах используется поперечная волна, скорость распространения которой в металлах вдвое меньше, чем у волны продольной. Это вдвое повышает разрешающую способность. Поперечная волна лучше отражается от внутренних дефектов металла типа «расслоение», а также от границ раздела сред типа металл-жидкость. Это повышает достоверность ЭМА-измерений, особенно там, где традиционный ультразвук неработоспособен. Наши приборы одинаково эффективны для контроля цветных, нержавеющих и ферромагнитных металлов и сплавов, включая чугуны.

Более высокая производительность наших приборов в условиях АЭС уменьшает дозу облучения персонала. У наших толщиномеров велика дефектоскопическая составляющая в информации о толщине. Прибор показывает и толщину, и глубину залегания дефекта. Поэтому традиционные УЗ-дефектоскопы зачастую достаточно применять только в таких локализованных ЭМА-толщиномером зонах, а не «всплошную». По мере развития микроэлектроники, схемотехники, методов обработки преимущества ЭМА-приборов только растут, а недостатки — только уменьшаются. Поэтому покупка наших приборов, как лучших в своем классе, дает особо устойчивую диагностическую перспективу.

Особо эффективна двухпараметрическая оценка состояния металла при сочетании толщинометрии и измерений магнитной характеристики металла — коэрцитивной силы  $H_{\rm C}$ . В местах ускоренного накопления усталостных изменений величина  $H_{\rm C}$  увеличивается в 2...3 раза. Здесь же из-за снижения прочности происходит и локальное утонение металла. И наоборот, если из-за коррозии происходит утонение металла, он перегружается и переходит в пластическое состояние, сопровождающееся резким ростом  $H_{\rm C}$ . Классификация таких опасных зон, склонных к ускоренному разрушению и еще не имеющих дефектов металла, по этим двум параметрам ПК улучшает достоверность.

Вероятность обнаружения таких зон по измерениям *H*<sub>C</sub> намного выше. Зоны металла, имеющие значения *H*<sub>C</sub> в пределах эксплуатационной нормы (для данной марки металла), не нуждаются ни в толщинометрии, ни в дефектоскопии. Это сокращает объемы диагностики без снижения надежности оборудования. Результаты многолетних измерений на энергоблоках российских АЭС убедительно свидетельствуют о сказанном выше. Предупреждение разрушения металла оборудования становится практической реальностью диагностики при использовании наших приборов и подходов (иллюстрации см. на 3 стр. обложки).

Украина, г. Харьков, ул. Светлая, д. 10, кв. 16. Тел./ф.: 38 (057) 738-32-06, тел.: 38 (057) 771-65-91 E-mail: bezlyudko@yahoo.com. Тел. в Москве: 7 (495) 338-07-32, тел. 7 (495) 798-42-73



## ИНФОРМАЦИЯ -



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

	Укра	ина	Poc	сия	Страны Дальнего зарубежья				
Стоимость	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год			
подписки через релакцию*	60 грн.	120 грн.	600 руб.	1200 руб.	26 долл. США	52 долл. США			
порее редакцию	*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.								

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

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

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

ПОДПИСНОЙ КУПОН Адрес для доставки журнала		
Срок подписки с Фамилия И. О. Компания	200 г. по	200 г. включительно
Должность Тел., факс, E-mail		

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

### Обложка наружная, полноцветная

Первая страница обложки (190×190 мм) — 500 \$ Вторая страница обложки (200×290 мм) — 350 \$ Третья страница обложки (200×290 мм) — 350 \$ Четвертая страница обложки (200×290 мм) — 400 \$ **Обложка внутренняя, полноцветная** Первая страница обложки (200×290 мм) — 350 \$ Вторая страница обложки

(200×290 мм) — 350 \$ Третья страница обложки (200×290 мм) — 350 \$ Четвертая страница обложки (200×290 мм) — 350 \$ Внутренняя вставка Полноцветная (200×290 мм) — 300 \$ Полноцветная (разворот А3) (400×290 мм) — 500 \$ Полноцветная (200×145 мм) 150 \$ Черно-белая (170×250 мм) — 80 \$ Черно-белая (170×125 мм) — 50 \$ Черно-белая (80×80 мм) — 15 \$ • Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу.

• Для организаций-резидентов Укра-

ины цена с НДС и налогом на рекламу.

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

• При заключении рекламных контрак-

тов на сумму, превышающую 1000 \$,

предусмотрена гибкая система скидок.

# Технические требования к рекламным материалам

Размер журнала после обрези
 200×290 мм.

• В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов, необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации.

### Все файлы в формате IBM PC

- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 5.0

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

© Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2007

Подписано к печати 20.05.2007. Формат 60×84/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 8,4. Усл. кр.-отт. 9,1. Уч.-изд. л. 9,3 + 2 цв. вклейки. Цена договорная.