

# ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

## № 1, 2003

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. Ключев,  
Л. М. Лобанов, А. А. Лебедев,  
В. К. Лебедев, Г. Г. Луценко,  
Н. В. Новиков, Е. С. Переверзев,  
П. П. Прохоренко, В. П. Радько,  
В. Н. Учанин, А. Ф. Улитко,  
А. И. Степаненко,  
В. А. Стрижало, А. Я. Тетерко,  
Т. М. Швец, И. Я. Шевченко,  
А. В. Шимановский

### Адрес редакции:

03680, Украина, г. Киев-150,  
ул. Боженко, 11  
Институт электросварки  
им. Е. О. Патона НАН Украины  
Тел.: (38044) 261-58-81, 269-26-23  
Факс: (38044) 268-04-86  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

### Научные редакторы:

Н. Г. Белый, А. А. Грузд

### Электронная верстка:

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

### Свидетельство

о государственной регистрации  
КВ 4787 от 09.01.2001.

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

При перепечатке материалов  
ссылка на журнал обязательна.

За содержание рекламных  
материалов редакция журнала  
ответственности не несет.

Цена договорная.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

<i>БЕЛОКУР И. П., ОВСЯНКИН А. М., КУДРИН А. П.</i> Элементы дефектологии конструкций современной авиационной техники .....	3
<i>БУХАЛО О. П., КЛИМ Б. П., МИКИТИН Г. В., ПОЧАПСКИЙ Е. П., ФЕДОРОВ Р. Ф.</i> Комьютеризированная информационно-вычислительная система отбора и обработки сигнала акустической эмиссии АЕ-2Л .....	8
<i>КОМАРОВСКИЙ А. А.</i> Диагностика разрушения .....	14
<i>ТАРАРЫЧКИН И. А.</i> Диагностические подходы к управлению состоянием сварочных технологических процессов .....	17
<i>БОНДАРЕНКО А. Ю.</i> Мониторинг состояния сварных соединений для прогнозирования остаточного ресурса магистральных нефтепроводов ...	20

### НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

<i>НАЙДА С. А.</i> Пьезоприемники теплового акустического излучения для зондирования внутренней температуры объектов .....	25
<i>ЛЫМАРЕНКО Ю. А., ШАМРОВСКИЙ А. Д.</i> Математическое моделирование процесса акустической эмиссии .....	30
<i>ГОРОДНИЧИЙ В. В., СЕРЬГА М. А.</i> Увеличение коэффициента прохождения в ультразвуковых системах неразрушающего контроля с воздушно-акустической связью .....	34
<i>ЛЮТАК І. З., КІСІЛЬ І. С.</i> Дослідження імпульсного режиму роботи ультразвукового перетворювача .....	36
<i>АТАМАНЮК И. П.</i> Векторное полиномиальное каноническое разложение случайного процесса .....	40
Система «SKF Sorperhead» — обнаружение неисправностей горнодобывающего оборудования и оборудования для переработки полезных ископаемых .....	43

### СТАНДАРТЫ ПО НК

<i>БЕЛЫЙ Н. Г., ТРОИЦКАЯ Н. В.</i> О новых национальных стандартах по радиационному контролю .....	47
--	----

### ХРОНИКА

<i>СЕРЕДЮК О. Є.</i> Спеціалізована науково-технічна конференція на Прикарпатті .....	53
---	----

РЕКЛАМА .....	57
---------------	----

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

Технический комитет по стандартизации "Техническая диагностика и неразрушающий контроль"



Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

# TECHNICAL DIAGNOSTICS and NON-DESTRUCTIVE TESTING

№ 1, 2003

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.: (38044) 261 58 81,  
269 26 23  
Fax: (38044) 268 04 86  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

### Scientific editors:

N. G. Bely, A. A. Gruzd

### Electron galley:

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

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

- BELOKUR I.P., OVSYANKIN A.M., KUDRIN A.P.* Elements of defectology of structures in modern aircraft systems ..... 3
- BUKHALO O.P., KLIM B.P., MIKITIN G.V., POCHAPSKY E.P., FEDORIV R.F.* Computerized information-computation system AE-2L of selection and processing of the acoustic emission signal ..... 8
- KOMAROVSKY A.A.* Diagnostics of fracture ..... 14
- TARARYCHKIN I.A.* Diagnostic approaches to controlling the condition of welding technological processes ..... 17
- BONDARENKO A.YU.* Monitoring of the condition of welded joints for forecasting the residual life of main oil pipelines ..... 20

### NON-DESTRUCTIVE CONTROL

- NAIDA S.A.* Piezoreceivers of thermal acoustic radiation for probing the internal temperature of objects ..... 25
- LYMARENKO Yu.A., SHAMROVSKY A.D.* Mathematical modeling of the process of acoustic emission ..... 30
- GORODNICHY V.V., SERGA M.A.* Increase of transmission factor in ultrasonic NDT systems with air-acoustic coupling ..... 34
- LYUTAK I.Z., KISIL I.S.* Investigation of pulsed mode of operation of an ultrasonic transducer ..... 36
- ATAMANYUK I.P.* Vector polynomial canonic decomposition of the random process ..... 40
- SKF Copperhead system — detection of faults in mining equipment and equipment for mineral resources processing ..... 43

### NDT Standards

- BELY N.G., TROITSKAYA N.V.* On new national standards on radiation control ..... 47

### NEWS AND INFORMATION

- SEREDYUK O.E.* Specialized scientific-technical conference in the Near-Carpathian region ..... 53

- ADVERTISING ..... 57

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



## ЭЛЕМЕНТЫ ДЕФЕКТОЛОГИИ КОНСТРУКЦИЙ СОВРЕМЕННОЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

И. П. БЕЛОКУР, А. М. ОВСЯНКИН, А. П. КУДРИН

*Рассмотрены особенности выбора показателей качества, классификации дефектов, возникающих на различных этапах жизненного цикла авиационной техники (АТ), а также обоснованы методы НК на этапах ее производства и эксплуатации с учетом материалов современных авиационных конструкций. Приведены рекомендации по решению задач контроля технического состояния и обеспечения надежности АТ.*

*Considered are the features of selection of quality indices, classification of defects, initiating at different stages of the life cycle of aeronautic systems (AS), methods of NDT in the stages of their production and operation are substantiated, allowing for the spectrum of materials of currently used aircraft structures. Recommendations are given on solving the problems of controlling the technical condition and ensuring the reliability of AS.*

Управление качеством продукции неразрывно связано с технической дефектологией, позволяющей решать актуальные задачи повышения качества и предупреждения дефектов. При управлении качеством АТ с помощью дефектологии решаются задачи обеспечения надежности и ресурса конструкций [2]. При этом методы дефектологии используют для исследования характеристик материалов изделий с учетом особенностей конструкций, технологий их изготовления и условий эксплуатации.

Основные задачи дефектологии — выбор показателей качества, методов их оценки, а также выявление факторов, влияющих на качество [1]. Учитывая, что конструкция воздушного судна (ВС) состоит из большого количества деталей и узлов из различных материалов, работающих при неодинаковых нагрузках и в различных условиях, качество конструкций оценивают по множеству показателей, выбор которых связан со многими про-

изводственными и эксплуатационными факторами [3]. Основными комплексными показателями качества изделий АТ являются показатели назначения, включающие потребительские свойства: надежности, технологичности, экономичности, а также определяющие воздействие на людей.

Они в свою очередь включают ряд единичных показателей, по совокупности которых оценивается качество ВС (рис. 1). Количественную оценку качества изделия в целом с учетом вклада единичных показателей проводят по комплексному показателю  $K$ :

$$K = \sum_{i=1}^n (m_i q_i) / n,$$

где  $q_i$  — единичный показатель качества;  $m_i$  — коэффициент его весомости;  $i = 1, 2, \dots, n$  — количество показателей качества.

Показатели качества изделий выбирают с учетом не только их изменяемости в производстве и

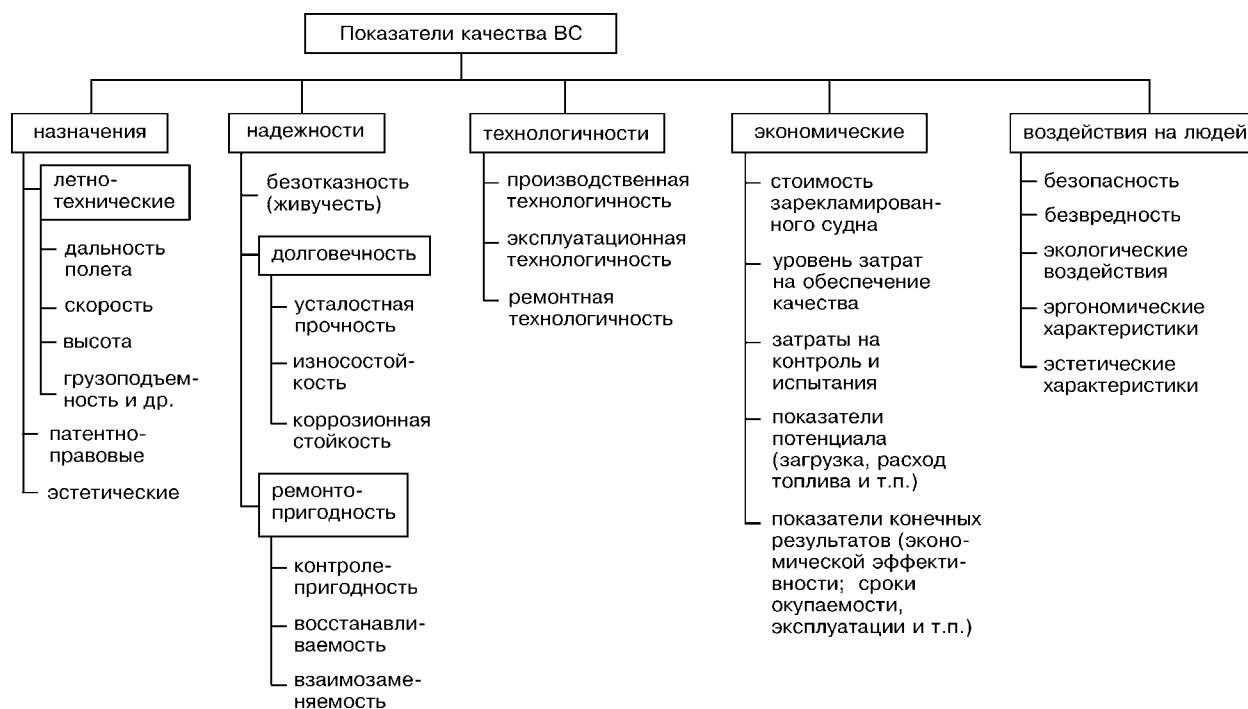


Рис. 1. Классификация показателей качества ВС

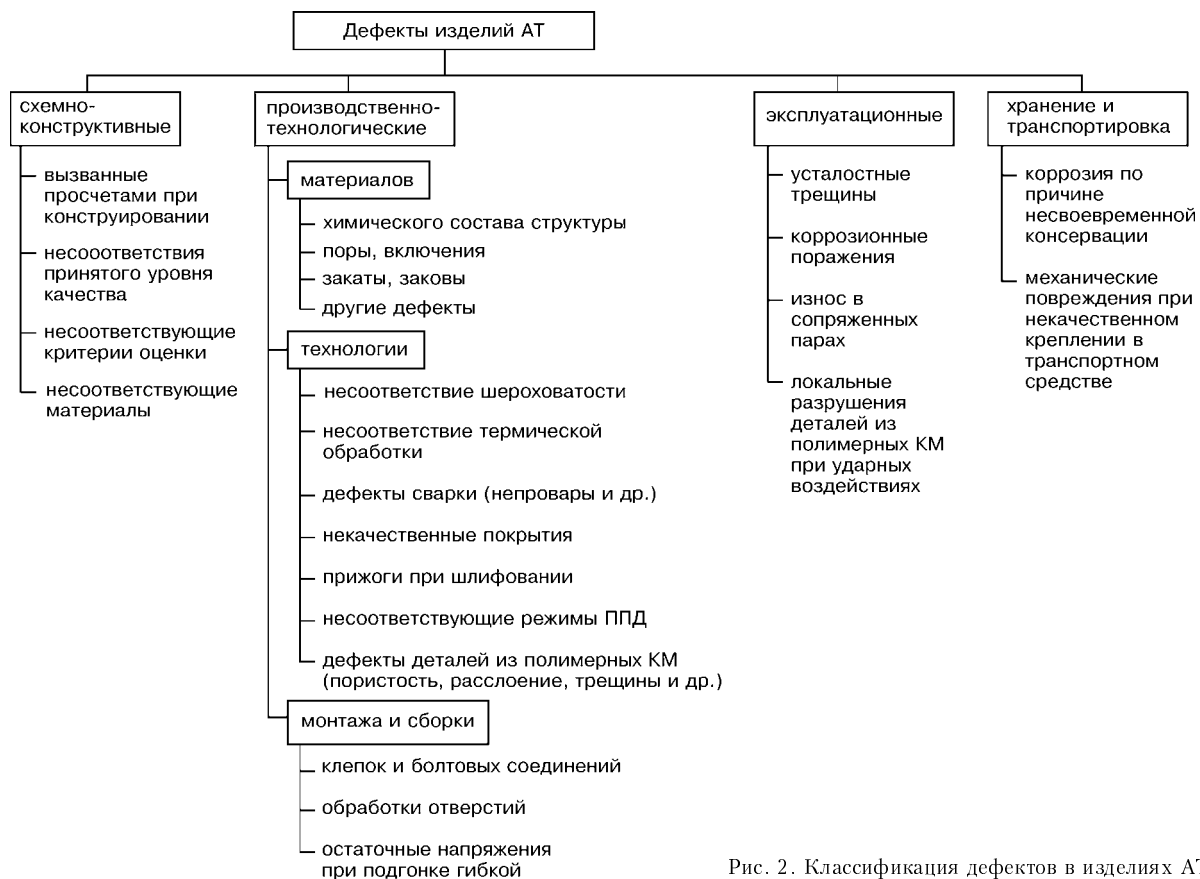


Рис. 2. Классификация дефектов в изделиях АТ

эксплуатации, но и исходя из возможности их определения методами контроля (во многих случаях только неразрушающими).

Формирование требуемых показателей качества АТ происходит с определенной последовательностью технологических операций, которые рассматриваются чаще в виде блоков: заготовительные (литье, прессование, прокатка и др.); обработка (термическая и механическая, сварка); сборочные и монтажные (обработка отверстий, подгонка гибкой, постановка болтов и заклепок). Эти операции в большей или меньшей степени формируют свойства материала изделий в объеме, поверхностном слое и в локальных зонах. Во всех случаях большое значение имеет качество исходных материалов, ассортимент которых в настоящее время значительно расширился. Например, в ответственных конструкциях ВС широко используют высокопрочные стали, алюминиевые и титановые сплавы, композиционные материалы (КМ).

Изменение показателей качества изделия в процессе эксплуатации имеет свои специфические закономерности, связанные с видом и величиной внешнего воздействия на конструкцию. Недопустимые изменения качества (несоответствие определенным требованиям) определяются термином «дефект» (ГОСТ 16504–80).

Несоответствия (дефекты) могут возникать не только по технологическим и эксплуатационным причинам, но и в результате ошибок, допущенных при проектировании (например, при неправильном подборе материалов в паре трения и т. п.). При-

чиной быстрого разрушения в процессе эксплуатации может быть также неправильное хранение изделий или их несвоевременная консервация.

Для выявления и классификации возможных дефектов различных конструкций необходимо однозначно определить, к какой группе относятся эти дефекты: производственные или эксплуатационные, поверхностные или в объеме, локальные или по всему изделию, плоскостные или объемного характера и др.

Зная особенности возникновения и развития дефектов на разных этапах жизненного цикла изделия, можно наиболее объективно решить задачу их выявления определенными методами, устанавливать параметры контроля.

С учетом этапов жизненного цикла изделий АТ предлагается вариант классификации дефектов по группам [3]: проектирования, производства, эксплуатации, хранения и транспортировки (рис. 2). Из них наиболее распространенными являются производственные и эксплуатационные, поэтому максимальный объем контроля, в частности, неразрушающего, приходится на этапы производства и эксплуатации. При этом контролю подвергаются не только готовые изделия и детали, но и полуфабрикаты после выполнения промежуточных операций. Причем, одно изделие в процессе изготовления может проверяться несколькими методами.

Оценку качества исходных материалов проводят по структуре и химическому составу, как правило, вихретоковым методом по значению удельной электрической проводимости, используя структу-

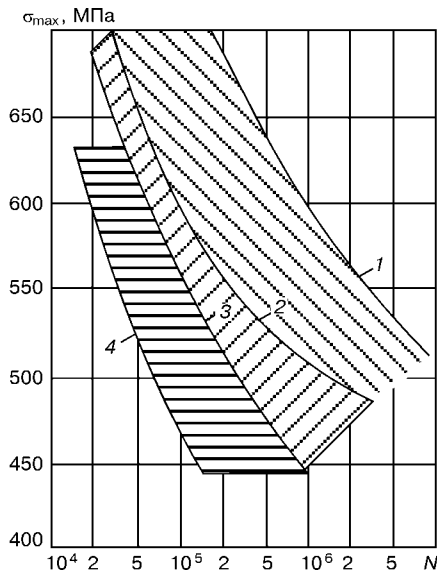


Рис. 3. Сопротивление усталости сварочных соединений из титанового сплава ВТ6 при повторном растяжении: 1-2 — для бездефектной сварки; 2-3, 3-4 — разрушения от внутренних и поверхностных пор соответственно;  $N$  — количество циклов нагружения

роскопы типа ВЭ, ИЭ и другие, работающие в низком диапазоне рабочих частот. Для выявления несплошностей типа пор и включений в заготовках и полуфабрикатах широко применяют УЗ методы.

В требованиях к авиационным конструкциям, работающим в условиях циклических нагружений, устанавливают нормы на наличие пор в детали, особенно в поверхностном слое, так как они оказывают значительное влияние на выносливость (рис. 3). На последнюю характеристику влияют также параметры поверхностного слоя (шероховатость, фазовый состав, физико-механические свойства, остаточные напряжения), которые формируются при механической и термической обработке и существенно влияют на эксплуатационные свойства конструкции. Так, шероховатость  $R_z$  снижает долговечность конструкции вследствие увеличения концентрации напряжений (рис. 4). При оценке шероховатости обычно используют оптические методы контроля, например, интерференционный или сравнение с эталонами.

С целью повышения усталостной прочности для многих авиационных конструкций используют специальные технологические способы, такие, как поверхностно-пластическое деформирование (ППД). При такой обработке создаются остаточные напряжения сжатия в тонком (порядка 0,1 мм) слое и сглаживается шероховатость поверхности. При правильном выборе режима обработки достигается повышение долговечности до 5 и более раз (рис. 5). Качество механической обработки проверяется обычно спектральным методом вихретокового НК, известным как метод высших гармоник (МВГ) [4].

Качество термической обработки контролируют или вихретоковым, или магнитным методом с использованием соответствующих структуроскопов. При этом выявляют такие дефекты, как крупнозернистость структуры, не соответствующая ТД твердость, внешние и внутренние трещины, деформации [5].

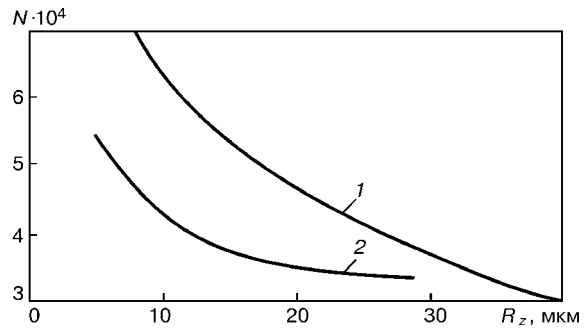


Рис. 4. Влияние на долговечность шероховатости  $R_z$  поверхности образцов из титанового сплава ВТ: 1 — отнулевой изгиб ( $\sigma_{max} = 750$  МПа); 2 — повторное растяжение ( $\sigma_{max} = 800$  МПа, коэффициент асимметрии цикла  $R = 0,1$ )

Для разработки и реализации экспертных систем контроля, предотвращения дефектов важно знать причины их появления. Так, причиной возникновения деформаций при термообработке являются внутренние напряжения в материале, которые могут быть исключены медленным охлаждением при закалке в области температур мартенситного превращения. При эксплуатации появляются усталостные повреждения (трещины), коррозия и износ при трении в сопряженных парах. Первые возникают при знакопеременных (циклических) нагрузках в разнообразных деталях авиационных конструкций при механических и температурных воздействиях. Наиболее опасны такие повреждения в силовых элементах: шпангоутах, стрингерах, лонжеронах, соединительных кронштейнах, валах, лопатках компрессоров и турбин двигателей, лопастях воздушных винтов и др. Они возникают в зонах концентрации напряжений: в области отверстий, изменения сечений деталей, в галтельных переходах и т. п.

Усталостная прочность конструкции обеспечивается в первую очередь выбором материалов, которые при циклических нагрузках на ее элементы

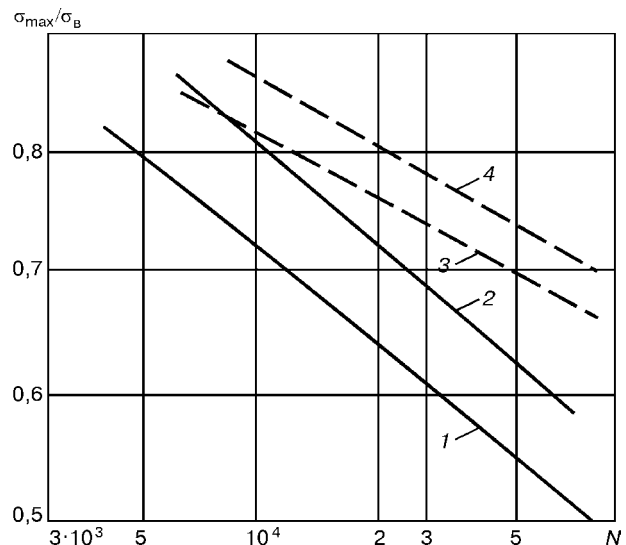


Рис. 5. Графики относительной малоциклового усталости высокопрочных сталей при отнулевом растяжении образцов из стали: 1, 3 — 40ХН2СМА ( $\sigma_B = 1900$  МПа); 2, 4 — 30ХГСН2А ( $\sigma_B = 1600$  МПа); 1, 2 — после шлифования; 3, 4 — после виброупрочнения

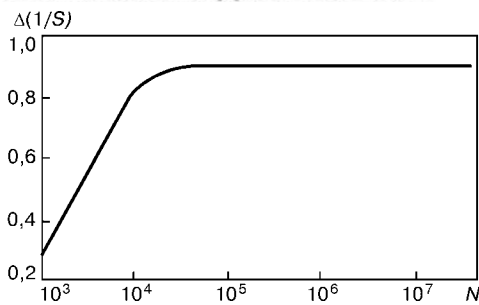


Рис. 6. Изменение удельной электропроводности  $\Delta(1/\rho)$  КМ при циклическом нагружении

должны отвечать требованию выносливости, характеризующейся коэффициентом  $K$ :

$$K = \sigma_{-1} / \sigma_B,$$

где  $\sigma_B$  — предел выносливости;  $\sigma_{-1}$  — предел прочности.

Материал приемлем для работы в конструкции на этапе до появления усталостного повреждения, если его коэффициент  $K$  будет не меньше величины, обратной расчетному коэффициенту перегрузки:  $K \geq 1/(nf)$ , где  $n$  — максимальная эксплуатационная перегрузка (для пассажирских самолетов обычно устанавливается на уровне 2,5...3,0);  $f$  — коэффициент запаса прочности (обычно принимают  $f = 1,5$ ).

В зависимости от материала детали и размеров дефектов для выявления последних используют почти все наиболее распространенные в авиационном производстве методы контроля: ультразвуковой, магнитный, вихретоковый, капиллярный, радиационный и оптический. Методики и карты контроля разрабатывают для каждой отдельной конструкции с учетом ее особенностей. Во многих случаях для обеспечения надежности и живучести конструкции в конструкторской документации задают минимальные размеры обнаруживаемых дефектов. Например, для деталей двигателя и шасси минимальное раскрытие выявляемых трещин должно быть в пределах десятых долей микрометра. Такие требования обеспечиваются не только использованием соответствующих методов, приборов и технологий, но и разработкой специального оборудования, контрольных и стандартных образцов для проверки и настройки приборов.

Значительное снижение прочности конструкции вызывает коррозионные повреждения деталей. При этом сплошная коррозия снижает прочностные характеристики вследствие уменьшения сечения детали, а локальная (например, питтинговая) увеличивает концентрацию напряжений в отдельных зонах. В алюминиевых и магниевых сплавах часто возникает межкристаллитная коррозия. Такие повреждения характерны для закрытых зон конструкции (например, в соединениях обшивка—стрингер) и требуют выполнения контроля через обшивку. Для контроля таких дефектов чаще используют вихретоковые методы с применением специальных режимов при определенных параметрах контроля, например, с использованием пониженных рабочих частот. Однако в некоторых случаях чувствительности вихретокового контроля недостаточно, и тог-

да применяют другой метод, например, капиллярный, обеспечивающий выявление межкристаллитной коррозии.

Износ деталей в сопряженных парах — один из самых распространенных дефектов конструкций АТ — связан не только с изменением размеров деталей, но и с уменьшением толщины поверхностного слоя, который может быть или модифицированным (азотированным, алитированным, оксидированным и т. п.) или представлять собой покрытие типа хромирования, кадмирования и др. В таких случаях для оценки работоспособности деталей и использования их ремонтных размеров важно знать толщину такого поверхностного слоя. С этой целью используют магнитные (индукционные) толщинометры, а также различные вихретоковые методы, например, спектральные типа МВГ. Иногда такому контролю должны предшествовать теоретические и экспериментальные исследования.

К особой группе могут быть отнесены дефекты деталей и конструкций из КМ, обладающих по сравнению со сплавами значительно большей неоднородностью в микромасштабе из-за различия в свойствах составляющих компонентов. По виду структурных составляющих КМ разделяют на волокнистые (состоящие из волокон и матрицы); слоистые (из слоев различных материалов); дисперсно-упрочненные (состоящие из матрицы, наполненной частицами); псевдосплавы (состоят из матрицы или каркаса, наполненных легкоплавким порошковым материалом); эвтектические (получаемые путем направленной кристаллизации эвтектических сплавов).

В качестве матрицы в материалах для авиационных конструкций чаще используют полимерные материалы, а в качестве наполнителя — угле- и стекловолокна. В современных ВС массовая доля элементов из таких материалов может достигать 25 %.

Возникновение дефектов в деталях из КМ в значительной степени связано с нарушениями технологии производства. К таким дефектам относятся поры, микротрещины, зоны неравномерного отверждения матрицы, разрывы волокон и др. В эксплуатации разрушение КМ происходит ступенчато: вначале происходит разрыв волокон с передачей нагрузки матрице, а затем при определенном их накоплении разрушается деталь. Постепенное снижение жесткости материала обеспечивает живучесть конструкции и позволяет обнаруживать повреждение на безопасном этапе [6].

Выявление дефектов КМ в процессе производства и эксплуатации конструкций связано с косвенным определением изменяющихся при этом их физических свойств (электрических, тепловых, акустических). Необходимо учитывать, что изменения свойств КМ в целом связаны с изменением свойств волокон и матрицы [3]. Так, для углепластика типа КМУ-3Л в процессе его циклического нагружения наблюдается увеличение удельной электропроводности  $1/\rho$  до определенного уровня, который далее остается постоянным до разрушения образца (рис. 6). Электропроводность материала детали определяется только электропроводящими

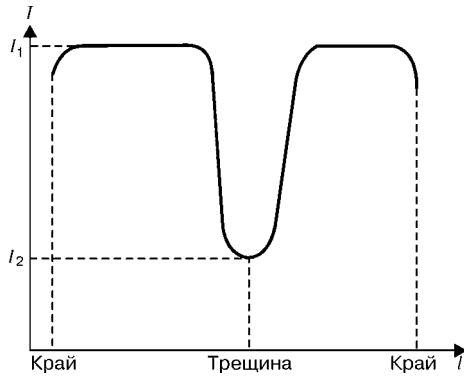


Рис. 7. Изменение потерь на вихревые токи  $I$  в КМ:  $I_1, I_2$  — показания индикатора в зависимости от потерь;  $l$  — длина сканирования образца

свойствами волокон. Момент разрушения угольных волокон может быть выявлен по резкому увеличению потерь на вихревые токи (рис. 7).

Изменение механических характеристик полимерной матрицы углепластика, обладающей свойствами диэлектрика, связано с возникновением в ней пустот, трещин, пористости, влагонасыщения. Наиболее эффективно состояние матрицы оценивают по изменению диэлектрической проницаемости, определяемой электрическим методом, при помещении КМ в конденсаторный преобразователь:

$$\epsilon = 10^5 C d / (89 S),$$

где  $C$  — емкость конденсатора, пФ;  $d$  — расстояние между обкладками конденсатора, м;  $S$  — площадь обкладки, м<sup>2</sup>.

Для различных уровней воздействий получают зависимости диэлектрических свойств матрицы от степени деструкции. Так, циклическое нагружение снижает емкость  $C$  преобразователя, в который помещают материал после разного количества циклов нагружения  $N$  (рис. 8).

Появление зон концентрации напряжений в КМ можно обнаружить по изменению амплитуды прошедших УЗ колебаний.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, проблемы дефектоскопии конструкций современных ВС связаны с широким спектром дефектов, возникающих на различных этапах существования изделий при разных видах воздействий и в разных условиях. Выбор наиболее подходящих средств и методов контроля должен проводиться с учетом природы дефектов изделий из различных материалов, а также исследований вза-

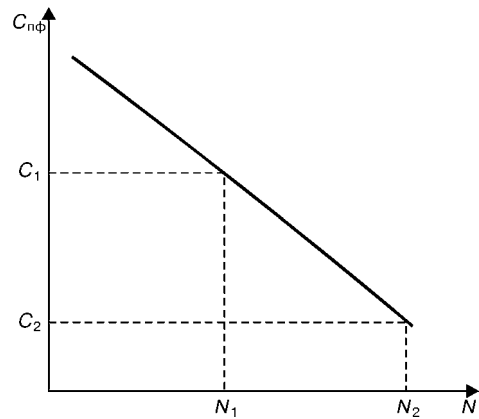


Рис. 8. Изменение диэлектрических свойств КМ при циклическом нагружении

имосвязи свойств материалов с параметрами применяемого физического поля.

Выбор методов и средств контроля проводится с учетом требований к каждой конкретной детали или всего изделия. Чувствительность и периодичность контроля устанавливается с учетом обеспечения живучести конструкций на основе оценки ее технического состояния.

Для исключения снижения ранее запланированного ресурса изделия выявляются причины появления дефектов и строятся причинно-следственные связи, на основании которых разрабатывают предложения по предотвращению дефектов в элементах конструкции.

В основе корректировки системы контроля на каждом этапе жизненного цикла изделия лежит анализ его особенностей, видов повреждений и статистика их появления, а также возможностей методов контроля.

1. Белокур И. П. Дефектология и неразрушающий контроль. — Киев: Вища шк., 1990. — 207 с.
2. Брондз Л. Д. Технология и обеспечение ресурса самолетов. — М.: Машиностроение, 1986. — 184 с.
3. Дефектология и обеспечение качества в производстве и эксплуатации авиационной техники / А. М. Овсянкин, И. П. Белокур, В. В. Лубяный и др. — Киев: Нац. авиац. ин-т, 2001. — 148 с.
4. Черняк В. В. Исследование и разработка многопараметрового электромагнитного контроля стальных изделий: Автореф. дисс. канд. техн. наук ... Киев: Киев. политехн. ин-т, 1968. — 16 с.
5. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. — Справочник: В 2-х т / Под ред. В. В. Клюева. — 2-е изд. — М.: Машиностроение, 1986.
6. Фудзи Т., Язако М. Механика разрушения композиционных материалов / Пер. с япон. — М.: Мир, 1982. — 232 с.

Нац. авиац. ун-т,  
Киев

Поступила в редакцию  
15.10.2002



## КОМПЬЮТЕРИЗОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ОТБОРА И ОБРАБОТКИ СИГНАЛА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ АЕ-2Л

О. П. БУХАЛО, Б. П. КЛИМ, Г. В. МИКИТИН, Е. П. ПОЧАПСКИЙ, Р. Ф. ФЕДОРОВ

*Представлены результаты разработки компьютеризированной информационно-вычислительной системы (ИВС) отбора и обработки сигнала акустической эмиссии АЕ-2Л. Приведены технические характеристики, рассмотрен вопрос метрологического обеспечения системы.*

*Results are presented of development of a computerized information-computation system (ICS) of selection and processing of acoustic emission signal AES AE-2L. System specification is given and the issue of metrological support of the system is considered.*

**Назначение и структура ИВС.** Информационно-вычислительная система отбора и обработки сигнала акустической эмиссии (САЭ) предназначена для отбора и обработки измерительной информации при экспериментальных исследованиях материалов, контроля прочности и долговечности элементов конструкций с использованием метода АЭ, в основе которого лежит регистрация пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП) упругих волн, излучаемых объектами исследования.

Многopараметричность САЭ предусматривает для его эффективного использования наличие комплекса специализированных аппаратных средств [1–2]. С целью обеспечения полного использования САЭ в системе реализован отбор сигнала, включающий его предварительную дискретизацию, оперативное запоминание и ввод в персональный компьютер с дальнейшей обработкой по соответствующим алгоритмам. В основе такого подхода лежит выделение по амплитудному признаку момента появления импульсов АЭ, дискретизация только выборочной части импульса с последующим его отслеживанием по определенному алгоритму до полного прохождения импульса. Это позволяет уменьшить вероятность регистрации ложных импульсов, что повышает достоверность результатов эксперимента, а также оптимизировать время измерения, существенно уменьшив при этом объем запоминаемых данных [3].

В состав ИВС входят: аппаратный блок, персональный компьютер, тензорные и ПЭП. Система функционирует в следующих режимах:

- задания начальных условий;
- контроля правильности функционирования системы в целом;
- записи САЭ в реальном масштабе времени;
- обработки измерительной информации по определенным программам, по результатам которой можно оценить амплитудное распределение и распределение интервалов между смежными импульсами, определить частотный спектр сигнала и т. д.;
- индикации зарегистрированного сигнала и результатов обработки.

Она обеспечена различными средствами программного и ручного управления, которые позволяют устанавливать:

- частоту квантования аналого-цифрового преобразователя (АЦП) (программно);
- коэффициент усиления основного усилителя (вручную и программно);

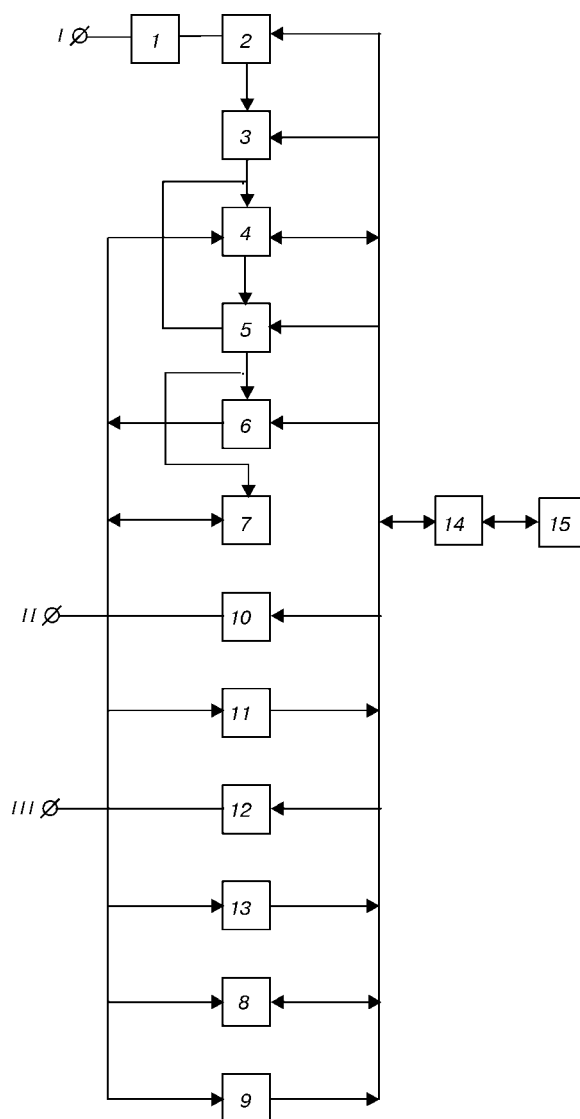


Рис. 1. Структурная схема компьютеризированной ИВС отбора и обработки САЭ АЕ-2Л





«рабочий» объем буферной памяти (программно);

полосу частот фильтра (программно);

режимы работы системы.

Структурная схема ИВС представлена на рис. 1. Предварительный усилитель 1 обеспечивает усиление и передачу САЭ с выхода ПЭП к аппаратному блоку без уменьшения уровня сигнал/шум. С выхода предварительного усилителя 1 усиленный сигнал поступает на вход полосового фильтра 2, а затем через усилитель 3 с управляемым коэффициентом передачи — на входы АЦП акустического канала 4 и аналогового компаратора 5. Необходимый коэффициент усиления усилителя 3 задается программно или вручную, а полоса рабочих частот фильтра — программно. Аналого-цифровой преобразователь обеспечивает превращение аналогового сигнала в реальном масштабе времени с минимальным искажением в цифровой код, запоминаемый в буферной памяти 8. Компаратор 5 осуществляет сравнение амплитуды сигнала с порогом, уровень которого задается программно или вручную, причем таким образом, чтобы отсечь акустические шумы.

В момент превышения САЭ порога дискриминации соответственно срабатывает компаратор, и появляющийся на его выходе импульс поступает на блок управления 6 и формирователь «мертвого» времени 7. Блок 6 формирует управляющие сигналы для управления работой аппаратного блока. Формирователь 7 вырабатывает временные интервалы, на протяжении которых система заблокирована для отбора и регистрации сигнала, — тем самым обеспечивается рациональный метод формирования массивов данных о САЭ [3]. Момент срабатывания компаратора фиксируется таймером 9.

На входы усилителей каналов нагрузки 10 и раскрытия трещины 12 поступает сигнал с тензометрических преобразователей нагрузки и раскрытия трещины. Усиленные сигналы подаются на входы АЦП 11 и 13. Интерфейс 14 предназначен для управления аппаратным блоком со стороны персонального компьютера 15, а также для ввода массивов данных из буферной памяти.

**Системное и программно-информационное обеспечение.** Можно выделить два подхода к разработке системного программного обеспечения ИВС для отбора и обработки САЭ [2–8].

Первый имеет место, когда аппаратная часть системы реализована в переносном варианте. В этом случае сигнал отбирается, компрессируется и записывается в оперативную память аппаратного блока. В лабораторных условиях происходит ввод данных в оперативную память компьютера с последующей записью на жесткий диск. Поскольку время для ввода практических неограничено, то его можно реализовать через порты компьютера в стандартах Centronics или RS-232.

Второй подход реализуется, когда разрабатывается лабораторный вариант аппаратуры. Обмен между аппаратной частью и персональным компьютером происходит в процессе отбора сигнала в режиме диалога. Этим обусловлена необходимость разработки алгоритмов быстрого обмена между ап-

паратной частью и персональным компьютером через системную магистраль, создание соответствующего интерфейса, обоснование и реализация алгоритма функционирования и управления системы в целом исходя из оптимального соотношения между аппаратной и программной частями системы при условии обеспечения необходимого быстродействия обмена. Возникает также потребность в разработке интерфейса между оператором и вычислительной машиной во время пребывания в системной программной среде, удобного для оперативной визуализации получаемых в процессе эксперимента результатов, обеспечения быстрого поиска и визуализации необходимого участка среди большого массива накопленных в результате эксперимента данных, оперативного вызова необходимой программы обработки. Блок-схема разработанного системного программного обеспечения компьютеризированной ИВС отбора и обработки САЭ представлена на рис. 2.

Блок 1 обеспечивает выбор одного из двух основных направлений функционирования программного обеспечения:

а) обзора накопленных в результате эксперимента данных в цифровой и графической формах (блоки 5, 6);

б) режима «Работа» — обеспечивает функционирование системы в целом во время проведения эксперимента, направленного на отбор, накопление и сохранение представленной САЭ измерительной информации.

В блоках 2, 3 задается имя файла, в котором будут храниться данные эксперимента и значения основных параметров функционирования системы:

объема выборки САЭ  $N_b$ ;

мертвого времени системы  $T_m$ ;

коэффициента усиления САЭ  $k$ ;

полосы пропускания полосового фильтра (верхней  $f_v$  и нижней  $f_n$  границ полосы пропускания);

порога дискриминации  $U_p$ .

После окончания процедуры инициализации параметров системы блок 4 программно осуществляет запуск работы системы.

Блок 7 проводит анализ состояния триггеров  $T_{as}$  и  $T_s$ , каналов отбора САЭ, контроля раскрытия трещины и нагрузки на экспериментальный образец. Установление триггера  $T_{as}$  в единичное состояние является признаком того, что появился и дискретизирован импульс АЭ. Блоком 7 при этом осуществляется передача управления на блоки 8–10. Последние организуют последовательный ввод в оперативную память компьютера через его системную магистраль значений  $N_b$  САЭ, взятых через период дискретизации  $T_d$ , и ввод данных о значении раскрытия и нагрузки на момент появления импульса АЭ, а также ввод времени его появления. Этот режим ввода данных называется асинхронным. Параллельно реализуется режим синхронного ввода, во время которого периодически осуществляется ввод информации о раскрытии трещины и нагрузке на образец, при этом триггер  $T_s$  устанавливается в единичное состояние. Синхронный ввод обеспечивается блоком 12. Блоки 11 и 13 отвечают за подсчет соответственно числа зарегистрирован-

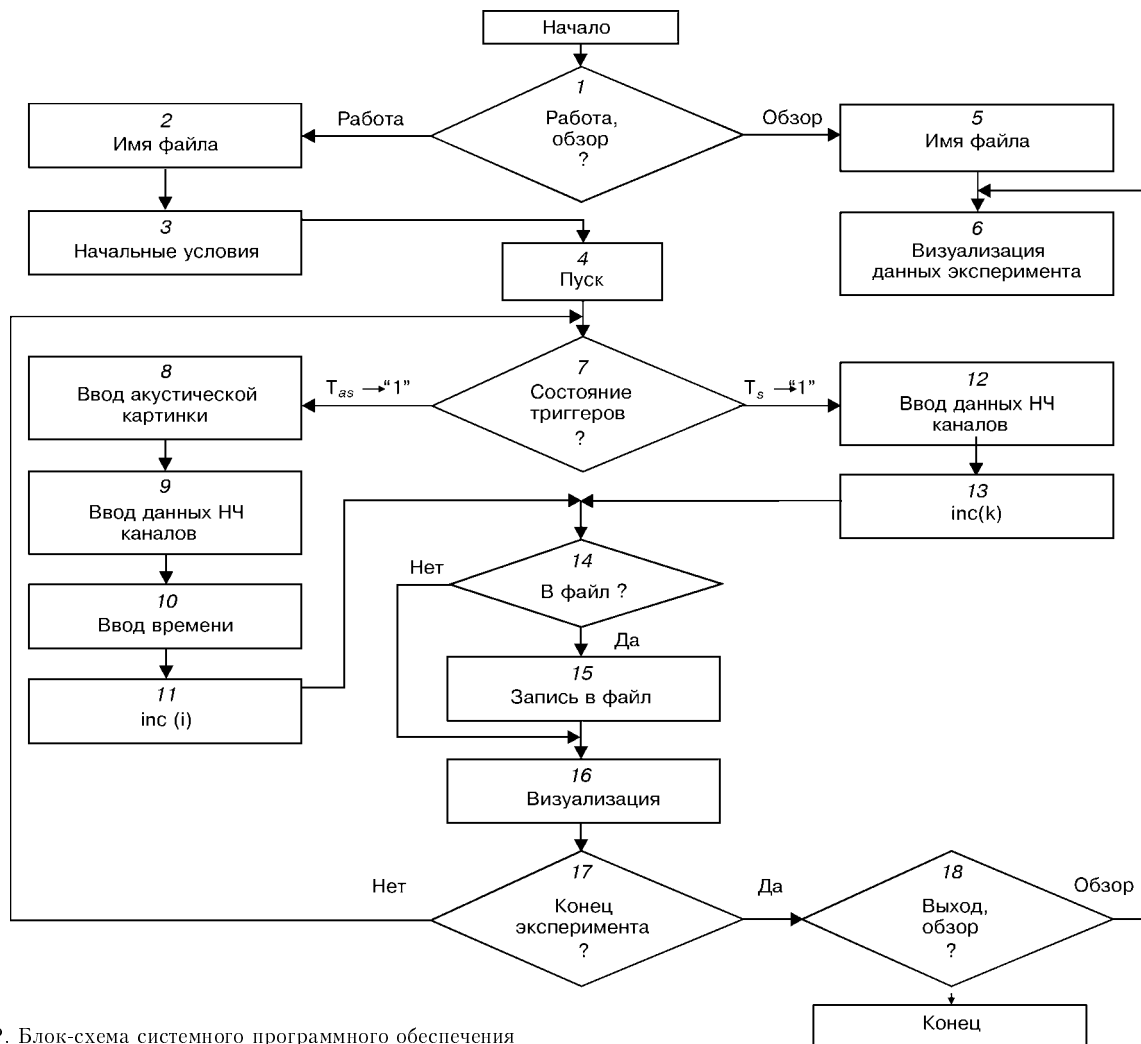


Рис. 2. Блок-схема системного программного обеспечения

ных импульсов АЭ и количества вводов информации в синхронном режиме.

Блоки 14–16 организуют и принимают решение о записи данных в файл и их визуализации на мониторе. Визуализация блоком 16 осуществляется в виде четырех окон, отражающих АЭ-картину, диаграмму «нагрузка–раскрытие», часовое распределение импульсов, суммарный счет, а также количество зарегистрированных импульсов и длительность эксперимента.

Блок 17 осуществляет контроль оставшейся в распоряжении оперативной памяти компьютера и при ее наличии передает управление на блок 7 или, в противном случае, на блок 18. В последнем принимается решение о выходе из программы или переходе в режим осмотра накопленных данных с передачей управления на программный блок 6.

К информационному программному обеспечению системы относятся алгоритмы и программы декомпрессирования и восстановления сигнала, оценки его интенсивности и средней амплитуды САЭ, построения гистограмм амплитудного распределения и распределения интервалов между смежными импульсами АЭ, оценки параметров амплитудных распределений и затухания интенсивности САЭ, реализация алгоритмов корреляционно-спектрального анализа и т. д.

Для апробации алгоритмов обработки САЭ, оценки их эффективности разработаны алгоритмы, моделирующие на машинном уровне САЭ на выходе ПЭП с экспоненциальным законом распределения интервалов между смежными импульсами и гауссовым, экспоненциальным или степенным законами распределения амплитуд импульсов.

**Метрологическое обеспечение ИВС.** Единство измерений физических величин обеспечивают такие составные метрологического обеспечения: методики выполнения измерений; государственные эталоны и эталонные средства измерений; методы, средства, методики поверки, калибрования, испытаний и метрологической аттестации средств измерительной техники; комплекс нормируемых метрологических характеристик (МХ) средств измерений; методики определения характеристик погрешности измерительных каналов (ИК).

Метод и методика выполнения измерения является основой методологии измерения физических величин. Согласно процедуре измерения авторами разработана методология измерения параметров САЭ [9, 10].

Метрологическое обеспечение компьютеризованной ИВС АЕ-2Л функционирует согласно разработанному концептуальному подходу к созданию



структуры метрологического обеспечения измерений [11].

В метрологическом обеспечении нестандартизованной ИВС отбора и обработки САЭ существенно обоснование выбора образцового сигнала, поскольку образование САЭ является по своему существу нестационарным случайным импульсным процессом; соответственно становится актуальной разработка образцового средства измерения. Генератор стохастического импульсного сигнала с нормируемыми стохастическими характеристиками представляет собой образцовую стохастическую меру [12]. Он моделирует образцовый стохастический электрический сигнал с заданными с высокой точностью значениями его информативных параметров и стохастических характеристик. Генератор псевдослучайного импульсного сигнала имеет следующие технические характеристики:

интенсивность стационарного импульсного потока и начальная интенсивность следования импульсов в пакете  $(1, 2, 5) \cdot 10^n \text{ с}^{-1}$ ,  $n = -2; -1; 0; 1$ ;

постоянная времени спада интенсивности потока в пакете  $0,8 \cdot 2^m$ ,  $m = 0, 1, \dots, 6$ ;

погрешность установления заданных значений интенсивности и постоянной времени не более 0,3 %;

относительное отличие дисперсий числа отсчетов для генерируемого и «чисто» пуассонового потоков при их одинаковой интенсивности не более 6 %;

мертвое время 0; 1, ..., 63 мкс;

емкость счетчиков  $10^6$ ;

минимальная длительность выходных импульсов 60 нс;

амплитуда импульсов 0,2... 2,0 В.

Метрологическое обеспечение измерительных информационных систем (ИИС) регламентируют: отраслевые, государственные, межгосударственные стандарты; методические указания; программы государственных испытаний и метрологической аттестации средств измерений; методики поверки ИИС; методики на организацию и порядок проведения работ по метрологическому обеспечению; методы нормирования, оценивания и контроля МХ ИИС. Метрологическое обеспечение ИИС включает: метрологическую экспертизу технических заданий на разработку ИИС (общего назначения, нестандартизованные); их государственные испытания и метрологическую аттестацию; анализ состояния метрологического обеспечения; государственный метрологический надзор за разработкой, изготовлением, внедрением и эксплуатацией ИИС; разработки государственных стандартов, методических указаний, типовых программ по метрологическому обеспечению ИИС [11]. Метрологическая аттестация измерительных систем (в частности, нестандартизованных единичного изготовления) осуществляется по программе, устанавливающей основные требования к ее построению и содержанию согласно рекомендаций [13].

Цель метрологической аттестации ИВС отбора и обработки САЭ — экспериментальное исследование ИК, направленное на определение обобщен-

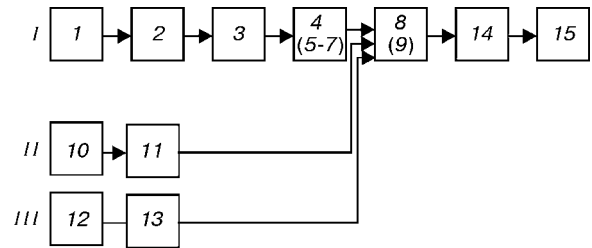


Рис. 3. Структура ИК системы АЕ-2Л

ной оценки МХ данного типа системы, в нормальных условиях эксплуатации, и выдача документа, удостоверяющего установленные в процессе аттестации МХ. Аттестацию проводят в четыре этапа:

1) представление и рассмотрение технической документации;

2) согласование и утверждение программы аттестации системы;

3) экспериментальные исследования ИК системы;

4) рассмотрение результатов аттестации, составление отчета или протокола аттестации.

Для компьютеризированной ИВС отбора и обработки САЭ проведена комплексная метрологическая аттестация ИК, являющихся основой системы. В таком случае их МХ устанавливаются экспериментально. Характеристики погрешностей ИК определяют методом образцовых сигналов (приборов), которые точнее рабочих сигналов (приборов) в 3–5 раз [14].

Метрологической аттестации нестандартизованной системы подлежат высокочастотный канал отбора и предварительной обработки САЭ и низкочастотные — контроля нагрузки образца и контроля раскрытия трещины образца.

Согласно структурной схеме ИВС АЕ-2Л (см. рис. 1) структура ИК представлена на рис. 3.

Акустический канал измерения параметров САЭ I в функциональной связи охватывает: предварительный усилитель 1; управляемый полосовой фильтр 2; управляемый усилитель акустического канала 3; АЦП акустического канала 4; аналоговый компаратор 5, блок управления 6, формирователь мертвого времени 7; буферную память 9; таймер 8; интерфейс 14; персональный компьютер 15.

Подготовка ИК к эксперименту включает:

разработки моделей измерительного канала системы и погрешности измерительного канала;

установление комплекса нормируемых МХ ИВС АЕ-2Л и критериев рациональности комплекса нормируемых МХ, условий их существенности;

установление числа исследуемых точек в диапазоне измерений параметров САЭ.

Теоретической основой проведения метрологической аттестации измерительных систем является разработка математической модели ИК.

Разработка математической модели ИК ИВС учитывает такие аспекты: ИК состоит из линейных и аналого-цифровых компонентов; изменением величин влияния можно пренебречь.

Динамическая модель ИК в нормальных условиях эксплуатации системы АЕ-2Л, учитывая статический характер величин влияния [13], описывается выражением

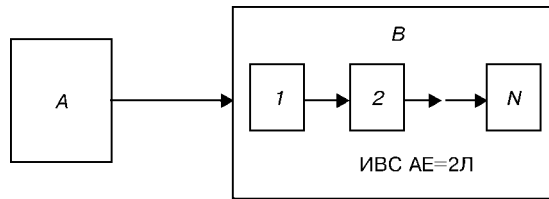


Рис. 4. Схема эксперимента: А — образцовое измерительное средство, с выхода которого на входы системы В подается образцовый сигнал; 1, 2, ..., 15 — компоненты ИК системы (рис. 3)

$$y(t) = K_n \int_{-\infty}^{\infty} g_n(t - \tau) x(\tau) d\tau. \quad (1)$$

Здесь  $x(t)$ ,  $y(t)$  — входной и выходной сигналы ИК;  $g_n(t)$  — его номинальная импульсная передаточная характеристика (динамическая):

$$g_n(t) = \left( \frac{K_n}{T} \right) \exp \left( - \frac{t}{T} \right), \quad (2)$$

где  $K_n$  — номинальный статический коэффициент преобразования ИК;  $T$  — постоянная времени.

Для статического режима в нормальных условиях эксплуатации модель ИК имеет вид

$$y = K_n x. \quad (3)$$

В нормальных условиях, не приводящих к дополнительной погрешности за счет отклонений одной из величин влияния от нормального значения или выхода ее за границы диапазона нормальных значений функционирования системы (динамический режим), модель погрешности основного ИК (акустического) [14] описывается выражением

$$\Delta_k = \Delta_0 * \sum_{i=1}^l \Delta_{\text{доп } i} * \Delta_{\text{дин}}, \quad (4)$$

где  $\Delta_k$  — погрешность канала;  $\Delta_0$  — основная погрешность измерительного средства (охватывает систематическую составляющую  $\Delta_s$  и случайную составляющую  $\Delta_{\text{осн}}$  основной погрешности);  $\sum_{i=1}^l \Delta_{\text{доп } i}$  — сумма дополнительных погрешностей  $\Delta_{\text{доп } i}$  измерительного средства, обусловленных действием величин влияния и неинформативных параметров входного сигнала измерительных средств;  $l$  — количество дополнительных погрешностей;  $\Delta_{\text{дин}}$  — динамическая погрешность измерительных средств, обусловленная влиянием скорости (частоты) изменения входного сигнала; \* — свертка.

Модель погрешности ИК системы (нагрузка, раскрытие трещины)

$$\Delta_k = \Delta_0 * \sum_{i=1}^l \Delta_{\text{доп } i}. \quad (5)$$

Установление комплекса нормируемых МХ основывается на выборе модели погрешности ИК. При оценивании МХ измерительных средств их погрешность состоит из погрешности за счет вариации, дрейфа; систематической и случайной составляющих погрешности; дополнительной и динамической погрешности. Соответственно учтены требования к выбору способа и формам предоставления МХ согласно [14].

Рациональный комплекс МХ ИК должен охватывать характеристики всех составляющих модели погрешности с учетом критериев их существенности для средств с цифровым принципом измерения [15].

Экспериментальные исследования ИК системы отбора и обработки САЭ отражают этапы и последовательность выполнения работ согласно рекомендации [14], а именно: установление объема выборки ИК с учетом структурных особенностей системы, числа исследуемых точек в диапазоне измерений, числа наблюдений в исследуемых точках диапазона измерения, требований к режиму измерений и к их последовательности во времени, выходных данных и условий для определения погрешности ИК, а также аналитическое представление погрешности ИК в нормальных условиях, определение погрешности ИК в нормальных условиях, обработку результатов исследований; установление межповторных интервалов ИК системы, анализ метрологического обеспечения системы АЕ-2Л по результатам аттестации.

Особым этапом метрологического обеспечения является разработанная авторами методика проведения аттестации нестандартизованной системы отбора и обработки САЭ с учетом процедуры экспериментальных исследований и обработки результатов согласно [14].

Для экспериментальных исследований использована схема эксперимента (рис. 4) согласно структурам ИК системы, режиму ее работы, типу входного сигнала, измеряемым величинам, используемым средствам.

В основе обработки результатов эксперимента лежит выбор методики оценивания и алгоритма обработки информации. По результатам метрологических исследований акустического ИК системы и методике оценивания и контроля систематической и случайной составляющих без учета вариации при измерении амплитуды САЭ осуществляется их обработка по соответствующим алгоритмам [16, 17].

При проведении метрологической аттестации агрегатизированной системы АЕ-2Л (ИК) методом образцовых приборов критерием научной, нормативной и технической основы метрологического обеспечения является точность образцовых приборов, которая в 3–5 раз выше точности рабочих средств измерения [13].

#### Технические характеристики системы АЕ-2Л

Рабочая полоса частот, кГц	10...1000
Максимальный коэффициент усиления канала, дБ	80
Приведенный ко входу АЦП порог дискриминации, мВ	10... 1000
Частоты квантования АЦП, МГц	1; 2; 4
Количество двоичных разрядов преобразования	8
Время преобразования аналогового сигнала в двоичный код, не более, мкс	0,1
Потребляемая мощность, не более, В·А	40
Питание системы — от сети переменного тока:	
напряжение, В	220 ± 10 %
частота, Гц	50 ± 1.



Компьютеризованная ИВС АЕ-2Л осуществляет регистрацию САЭ в реальном масштабе времени, динамики нагрузки и раскрытия трещины исследуемого образца, времени регистрации, а также дальнейшую обработку накопленных данных по соответствующим алгоритмам. Она состоит из трех каналов (акустического, нагрузки, раскрытия трещины) и работает с тензорными и ПЭП.

1. *Скальский В. Р.* Прибор для регистрации сигналов акустической эмиссии СВР-4 // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1995. — № 1. — С. 71–79.
2. *Скальский В. Р., Пустовой В. М., Бархан А.* Портативный накопитель выборок сигналов акустической эмиссии SVR-6 // Там же. — 1999. — № 3. — С. 24–31.
3. *Аспекты отбора сигнала акустической эмиссии / О. П. Бухало, Б. П. Клим, Г. В. Микитин и др.* // Там же. — 2000. — № 3. — С. 17–23.
4. *Вакар К. Б.* Приборы и информационные системы регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии материалов и конструкций 4.1 // Матер. 1-й Всесоюз. конф. — Ростов-на-Дону: Ростов. ун-т. — 1980. — С. 108–114.
5. *Петерсен Т. Б.* Разработка и использование автоматической системы классификации для идентификации сигналов акустической эмиссии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1993. — № 3. — С. 3–9.
6. *Акустико-эмиссионная система диагностики состояния ответственных металлоизделий / В. В. Шип, Г. А. Бигус, Е. Г. Дорохова и др.* // Там же. — 1997. — № 3. — С. 56–59.
7. *Коротеев В. А., Маслов Я. Я.* Программы обработки информации акустико-эмиссионного прибора // Там же. — 1998. — № 3. — С. 32–37.
8. *А. с. 991290 СССР, МКН<sup>1</sup> G 01 N 29/04.* Устройство для регистрации сигналов акустической эмиссии / С. И. Буйло, А. С. Трипалин, В. И. Холодный, В. Л. Поджидаев. — Опубл. 23.06.1983, Бюл. № 3.
9. *Буйло С. И.* Об интерпретации максимумов и достоверности оценки вида амплитудного распределения АЭ // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1995. — № 1. — С. 31–38.
10. *Аспекты измерения параметров сигнала акустической эмиссии / О. П. Бухало, Я. П. Драган, Б. П. Клим и др.* // Компьютерні технології друкарства. — 1999. — № 6. — С. 168–183.
11. *Методологические основы измерения физических величин / Я. П. Драган, Г. В. Микитин, О. П. Бухало и др.* // Там же. — 2000. — № 5. — С. 303–309.
12. *Концептуальный подход к созданию метрологического обеспечения измерений / Г. В. Микитин, О. П. Бухало, Е. П. Почапский и др.* // Укр. метролог. журн. — 2001. — № 4. — С. 5–9.
13. *Бухало О. П.* Образцовый импульсный стохастический сигнал — применение, воспроизведение, аттестация // Измерит. техника. — 1997. — № 6. — С. 24–33.
14. *Вопросы экспериментального определения метрологических характеристик измерительных каналов ИИС / А. Л. Семнюк, А. Д. Пинчевский, А. В. Шишкин, Л. Н. Отко* // Метрологическое обеспечение динамических измерений в ИИС: Сб. науч. тр. — Львов: ВНИИМИУС, 1984. — С. 92.
15. *МИ 2002–89.* Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Системы информационно-измерительные. Организация и порядок проведения метрологической аттестации. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — 35 с.
16. *ГОСТ 8.009–84.* Государственная система обеспечения единства измерений. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 150 с.
17. *ГОСТ 8.508–84.* Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологические характеристики средств измерений и точности характеристики средств автоматизации ГСП. Общие методы оценки и контроля. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 263 с.

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

Поступила в редакцию  
02.11.2002

## УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Приглашаем Вас разместить рекламную информацию (ч/б или в цвете) в № 2 журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», 2003 г. Этот выпуск будет приурочен 4-й Национальной научно-технической конференции и выставке

### «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА» 19–23 мая 2003 г. в г. Киеве, Украина

**Организатор** — Украинское общество ТД и НК  
тел. (38044) 227-26-66, факс: 220-94-82; E-mail: usndt@ukr.net

Дополнительный тираж журнала будет распространен среди участников и посетителей конференции-выставки.

Опыт участия нашего журнала в специализированных выставках в виде отдельного экспонента и его распространение на выставках свидетельствуют о высокой эффективности этой акции для рекламодателей.

Надеемся также, что Вы являетесь подписчиком журнала и проявите интерес к расширению сотрудничества.

### Ждем Ваших предложений.

Дополнительную информацию можно получить  
по тел.: (38044) 261-58-81, 269-26-23; E-mail: journal@paton.kiev.ua



## ДИАГНОСТИКА РАЗРУШЕНИЯ

А. А. КОМАРОВСКИЙ

*Показано, что достоверную информацию о процессах разрушения кристаллической решетки можно получить только методами акустической эмиссии и тепловыми, которые позволяют решать многие актуальные задачи диагностики и прогнозирования.*

*It is shown that valid information on the processes of fracture of the crystalline lattice may be obtained only by the methods of acoustic emission and thermal methods, which allows solving many urgent diagnostic and prognostic problems.*

В работах [1, 2] показано, что в основание обобщенной теории диагностики и прогнозирования может быть положено термодинамическое уравнение состояния твердого тела

$$PV = sT, \quad (1)$$

где  $P$  — внутреннее давление, поддерживающее в объеме  $V$  при температуре  $T$  динамическое равновесие, которое характеризуется постоянством энтропии  $s$ .

Энтропия служит обобщенной характеристикой добротности кристаллической решетки (рис. 1) и зависит от количества атомно-молекулярных (АМ) связей 1, 2, 3, ...,  $N$  и их индивидуальной энергии  $\delta$  [3]:

$$s = kN\delta, \quad (2)$$

$$\delta = -\frac{9}{8} \frac{\theta}{t} + 1 - 3 \ln \frac{\theta}{t} + \frac{\pi^4}{5} \left( \frac{t}{\theta} \right)^3, \quad (3)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  $t$ ,  $\theta$  — локальная и характеристическая температуры соответственно.

В формуле (1)  $s$  может изменяться как макроскопически —  $\Delta s$  (трещины, пористость, вмятины, царапины, риски, резкие переходы от одной геометрической формы к другой и т. д.), так и микроскопически —  $ds$  (характеризует способность АМ структуры к фазовым переходам и служит показателем степени ее совершенства). В арсенале

разработанных методов дефектоскопии [4], насчитывающем более сотни физических методов и тысячи используемых при этом типов приборов [5], всегда найдется такой, с помощью которого можно достоверно оценить макро- или мезоскопическую  $\Delta s$  степень несовершенства структуры. Этого пока нельзя сказать о процессах, протекающих на микроскопическом уровне  $ds$  при распаде кристаллической решетки (рис. 1) под влиянием внешних факторов.

На рис. 2 представлена диаграмма состояния любой из  $N$  АМ связи (кривая  $afcbe$ ). Она состоит из разгонной ямы  $afc$  и тормозного барьера  $cbe$  [3]. Внутри первой из них группируются дилатонные (рис. 3,  $a$ ), а в пределах второго — компрессионные (рис. 3,  $b$ ) типы связей. Они отличаются различным направлением собственного (спинового) вращения ядер связанных атомов в узле кристаллической решетки (показано стрелкой  $s$  на рис. 3). У дилатонов параллельные спины приводят к появлению электростатических сил отталкивания  $F$ , а антипараллельные спины у компрессионов — сил притяжения. Поэтому связанные электродинамическими силами компрессионы испытывают дополнительно силу обжатия, а дилатоны — растяжения (на рис. 2 зоны растяжения и сжатия обозначены соответственно знаками «+» и «-»). У металлов и сплавов преобладающая часть связей принадлежит к компрессионному типу (кривые 1–5 на рис. 2), а у естественных и искусственных камней — к дилатонному типу (кривые 6–8).

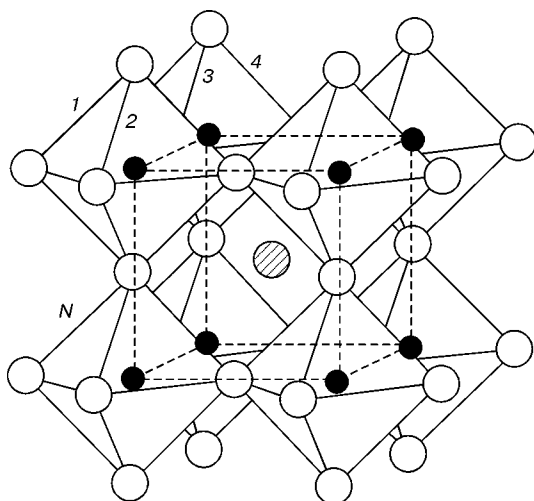


Рис. 1. Кристаллическая решетка с межатомными связями (1, 2, ...,  $N$  — номер связи)

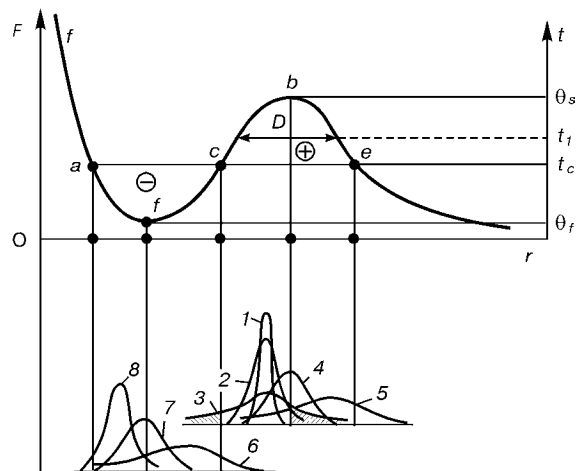


Рис. 2. Диаграмма состояния межатомной связи ( $t$  — локальная температура микрообъема)



Дилатоны располагаются в низкотемпературной, а компрессионы — в высокотемпературной области температурного спектра [6]. Излучая фононы и снижая локальную температуру, компрессионы могут оказаться в дилатонной области, а дилатоны переходить в компрессионную зону не могут. Поэтому под влиянием внешних факторов дилатоны разрушаются хрупко, а компрессионы переходят в дилатонную область в процессе пластического деформирования.

На рис. 4 изображен узел кристаллической решетки (рис. 1), который состоит из вращающихся по эллиптическим орбитам атомов 1 и 2, радиус-векторы которых равны соответственно  $\mathbf{r}_1$  и  $\mathbf{r}_2$ ; а  $D = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$ . При динамическом равновесии выполняется условие  $D = \text{const}$ , которому соответствует локальная температура  $t_1$  (рис. 2). Поглощение (уменьшение отрезка  $D$  и приближение  $t_1$  к характеристической температуре  $\theta_s$ ) и испускание фононов (увеличение  $D$  и стремление  $t_1$  к температуре фазовых переходов  $t_c$ ) выводит электромагнитный диполь  $D$  из состояния устойчивого равновесия.

Диполь  $D$  излучает электромагнитные волны, электрическая  $E$  и магнитная  $H$  компоненты которых определяются следующими формулами [3, 6]:

$$E = \frac{1}{c^2 R} [[\ddot{D} \mathbf{n}]\mathbf{n}], H = \frac{1}{c^2 R} [\ddot{D} \mathbf{n}], \quad (4)$$

где  $R$  — расстояние от центра поля  $O$  (рис. 4) до точки измерения напряженностей  $E$  и  $H$  полей;  $c$  — скорость света;  $\mathbf{n}$  — единичный вектор в направлении  $R$ ;  $\ddot{D}$  — вторая производная, характеризующая ускорение изменения размеров диполя  $D$ .

Изменения параметров локального электромагнитного поля (4) сопровождается вариацией сил связи [3, 6], управляющих процессами трансформации и распада кристаллической решетки:

$$F = eE + \frac{e}{c} [\dot{D} H], \quad (5)$$

где  $e$  — заряд взаимодействующих ядер 1 и 2 (рис. 4);  $\dot{D}$  — первая производная.

При попадании тела во внешнее (например, силовое) поле напряженностью  $\sigma$  (рис. 3) хаотически расположенные связи вначале ориентируются по полю (рис. 5, а), а затем пластически деформируются (рис. 5, б) [6]. Происходит дифференциация размеров диполей  $D$  в зависимости от их расположения по отношению к направлению внешнего поля. В плоскостях I и II (располагаются перпендикулярно  $\sigma$ ) связи излучают фононы, при этом температура  $t_1$  приближается к точке  $\theta_s$  (рис. 2). В плоскостях III–VI (расположены по полю) связи

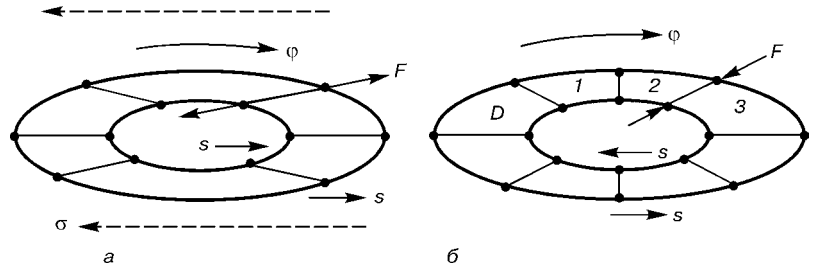


Рис. 3. Дилатонные (а) и компрессионные (б) типы связей в кристаллической решетке:  $\phi$  — орбитальная скорость вращения атомов;  $F$  — сила; 1, 2, 3, ... — последовательные положения диполя

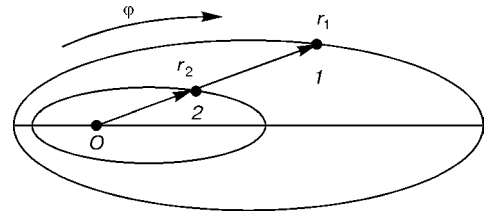


Рис. 4. Электромагнитный диполь  $D$

поглощают эти фононы и увеличивают свои размеры, а  $t_1$  стремится к  $t_c$ . В результате одна их часть оказывается в дилатонной области (левая заштрихованная зона на рис. 2), а другая распадается при температуре  $\theta_s$  (правая заштрихованная зона на рис. 2).

Действительно, полный дифференциал от (1) с учетом (2) равен

$$PV \left( \frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} \right) = kNT \delta \left( \frac{dN}{N} + \frac{dT}{T} + \frac{d\delta}{\delta} \right). \quad (6)$$

Видно, что отклонение от равновесного состояния проявляется через деформирование  $dV/V$  и изменение сопротивления  $dP/P$ , сопровождающееся уменьшением числа связей  $dN/N$ , тепловым излучением  $dT/T$  и нарушением индивидуальной энергетики связей  $d\delta/\delta$  согласно формуле (3).

Характер разрушения определяется мощностью потока отказывающихся связей. Разрушение от статического растяжения обычно вызывает сокращения площади поперечного сечения образца вблизи места разрушения, так как  $N_{\theta_s} > N_{\theta_f}$ . Это особенно

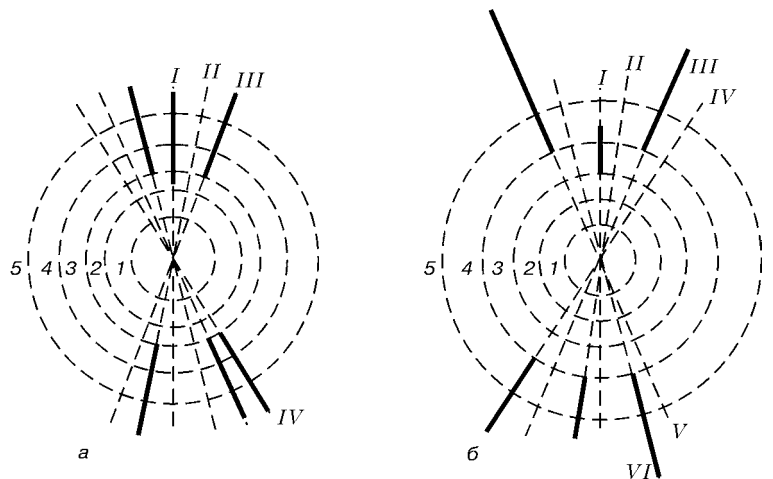


Рис. 5. Упругое (а) и пластическое (б) деформирование межатомных связей: 1–5 — номер орбиты электронов

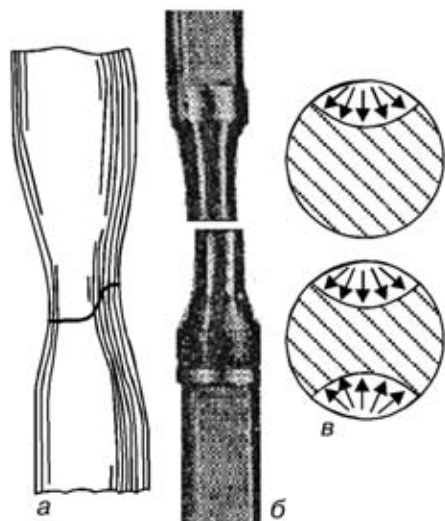


Рис. 6. Разрушение образца: а — от осевого растяжения; б — усталостное разрушение; в — схемы усталостного излома

заметно при испытании пластичных материалов (рис. 6, а). При усталостном разрушении [7] сокращение площади сечения не наблюдается (рис. 6, б), так как  $N_{\theta_s} \approx N_{\theta_f}$ . Поверхность усталостного излома, как правило, имеет две зоны: собственно усталостного разрушения, формирующегося за счет распада дилатонной фазы при температуре  $\theta_f$  и окончательного разрушения (долома) при температуре  $\theta_s$  (заштрихованная область на рис. 6, в). Внешний вид поверхности зоны усталостного излома (незаштрихованные области на рис. 6, в) обычно характеризуется мелкозернистостью металла, изменением цвета металла и наличием гладкого, как бы полированного, участка. Зона долома имеет крупнозернистую структуру. Это объясняется тем, что дифференциал  $d\delta$  энергетического члена (формула (3)) содержит слагаемые, характеризующие изменение локальной температуры  $dt/t$  и степень трансформации  $d\theta/\theta$  кристаллической решетки (рис. 1) [3].

Время устойчивого существования межатомной связи определяется термодинамическим диапазо-

ном  $\theta_f, \theta_s$  (рис. 2). При попадании электромагнитного диполя в дилатонную зону его температура почти мгновенно становится равной  $\theta_f$ , и он разрушается. В компрессионной зоне непрерывно идет процесс пластического (теплового) деформирования — вплоть до температуры  $\theta_s$ . При этом интервал  $\theta_f, \theta_s$  не превышает 15...20 % [6]. При критических температурах  $\theta_f$  или  $\theta_s$  межатомная связь распадается, высвобождая импульс кинетической

$$q_1 = k\theta \quad (7)$$

и ультразвуковой

$$q_2 = \frac{k}{h} Dm\theta^2 \quad (8)$$

энергии [1], где  $h$  — постоянная Планка;  $m$  — масса взаимодействующих атомов.

Итак, о процессах, протекающих в кристаллической решетке, можно судить только по уровню акустической эмиссии (АЭ) и изменению теплового поля (6). Если метод АЭ фиксирует конечную стадию этих процессов  $dN/N$ , то по результатам анализа теплового поля  $d\delta/\delta$  можно прогнозировать ранние стадии энергетической перестройки структуры [1].

1. Комаровский А. А. Диагностика напряженно-деформированного состояния // Контроль. Диагностика. — 2000. — № 2. — С. 22–27.
2. Комаровский А. А. Прогнозирование остаточного ресурса и долговечности // Там же. — 2000. — № 12. — С. 8–12.
3. Komarovskiy A. A. Physics of strength and fracture control: adaptation of engineering materials and structures. — Boca Raton: CRC Press, 2002. — 696 p.
4. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. В 2-х т. / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1976.
5. Клюев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика безопасности // Завед. лаб. Диагностика материалов. — 1998. — № 1. — С. 16–22.
6. Комаровский А. А. Физика деформирования и разрушения // Прикл. физика. — 2001. — № 1. — С. 88–132.
7. Комаровский А. А. Усталость: физическая природа, прогнозирование, предотвращение и снятие // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 1. — С. 35–41.

Науч.-инж. центр нетрадиц. технологий «САЛЮТА»,  
Киев

Поступила в редакцию  
02.10.2002

### Внимание разработчиков новых приборов, методов и технологий, а также подписчиков журнала!

Редколлегией журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» принято решение открыть информационную рубрику «Новые приборы и разработки». В кратком изложении мы будем публиковать сведения о новых приборах, научно-технических разработках, методиках и технологиях в области неразрушающего контроля и технической диагностики, а также технического контроля на предприятиях. Для публикации необходимо передать в редакцию описание разработки и иллюстративный материал.





## ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ СОСТОЯНИЕМ СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

И. А. ТАРАРЫЧКИН

*Предложен метод управления состоянием сварочных процессов, основанный на алгоритмах диагностики технологических систем. Метод связан с использованием двух статистических характеристик, что позволяет упростить процедуру распознавания и повышает эффективность управления состоянием многомерных сварочных процессов. Возможности предложенной методики рассмотрены на примере дуговой сварки толстолистового металла в узкий зазор.*

*A new method is proposed to control the condition of welding processes, based on the algorithms of diagnostic of technological systems. The method is related to use of two statistical characteristics, thus simplifying the procedure of recognition and improving the effectiveness of controlling the condition of multidimensional welding processes. Capabilities of the proposed procedure are considered in the case of narrow-gap arc welding of plate metal.*

Проблема обеспечения качества продукции в условиях сварочного производства тесно связана с необходимостью управления состоянием различных систем, отличающихся уровнем сложности, объектами регулирования и характером осуществляемых при этом управляющих воздействий. Последние применительно к технологическим системам могут осуществляться в виде предупреждающих или корректирующих действий.

Вид управляющих воздействий определяется по результатам выполнения контрольных операций, при этом действия, направленные на предотвращение перехода процесса в состояние с нарушенной точностью, называются предупреждающими. Если по результатам контроля установлено нарушение точности процесса, то действия, направленные на ее восстановление, называются корректирующими. Содержание корректирующих и предупреждающих действий оказывается различным в зависимости от физической природы контролируемой характеристики и характера нарушения точности. Например, это могут быть действия, связанные с корректировкой параметров режима, изменением пространственного положения горелки, приложением дополнительных прижимных усилий и т. п. В результате выполнения таких действий должно происходить восстановление положения контролируемой характеристики точности относительно середины поля допуска или уменьшение ее рассеяния.

Традиционная схема управления процессом (системой) осуществляется в следующей последовательности:

- 1) определение (распознавание) текущего состояния с использованием соответствующих методик;
- 2) выполнение предупреждающих действий, если по результатам диагностирования установлено приближение процесса к границе предельного состояния;
- 3) выполнение корректирующих действий, если установлено, что процесс перешел в недопустимое состояние;

4) повторная диагностика (оценка) состояния процесса после выполнения всех необходимых мероприятий;

5) прекращение корректировки состояния процесса после установления эффективности выполненных действий [1].

Таким образом, известные алгоритмы управления можно рассматривать с точки зрения применимости методов диагностики состояния технологических систем. Для решения задач распознавания здесь могут быть использованы сформулированные в работе [2] статистики  $g_{si}$ , представляющие собой комплексные критерии точности для каждого из контролируемых параметров процесса. Применение этих характеристик при документировании, оценке и прогнозировании состояния системы позволяет эффективно управлять качеством продукции. При этом документирование состояния многомерного сварочного процесса связано с необходимостью построения нескольких карт контроля в зависимости от установленного числа контролируемых характеристик точности [2].

Однако при управлении состоянием реальных технологических систем требования в отношении документирования могут отсутствовать, а оценивать их состояние и прогнозировать поведение в отдельных случаях допускается с использованием упрощенных процедур. При такой постановке

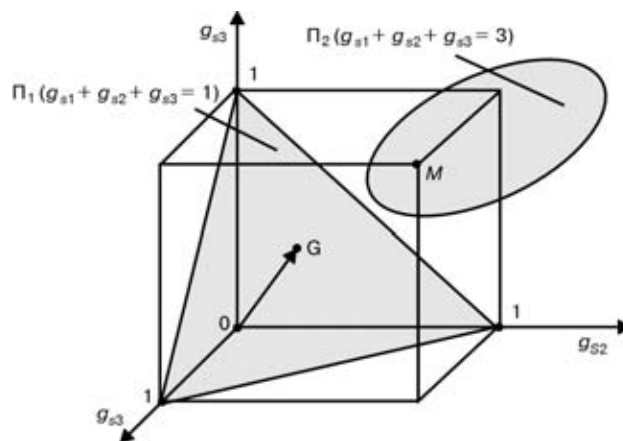


Рис. 1. Схема расположения единичного куба в трехмерном пространстве признаков



$g_{s \max}$

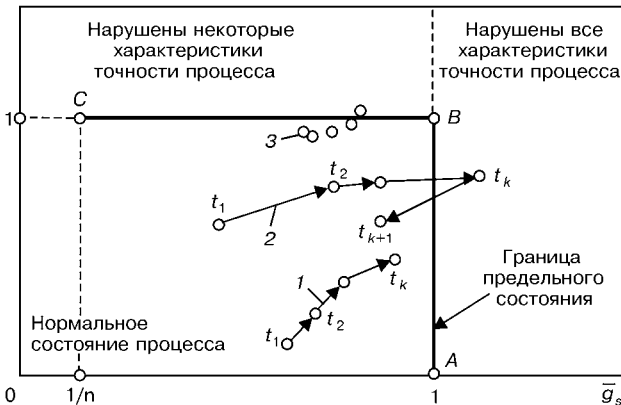


Рис. 2. Положение границы предельного состояния ABC и различные схемы протекания технологических процессов (обозначения см. в тексте)

целесообразно использование диагностических подходов к управлению состоянием многомерных систем.

Комплексные критерии точности  $g_{si}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) можно рассматривать как координаты вектора  $\mathbf{G}$  в  $n$ -мерном пространстве признаков [3]. Это позволяет определить область возможных диагнозов, рассматривая границу предельного состояния процесса как поверхность единичного гиперкуба, одна из вершин которого совпадает с началом координат. Так, для трехмерной технологической системы ( $n = 3$ ) положение единичного куба в системе координат  $g_{s1}g_{s2}g_{s3}$  показано на рис. 1. Попадание точки  $G$  в ту или иную область диагнозов определяется в зависимости от ее положения относительно плоскостей  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ . Если точка  $G$  и начало координат находятся по одну сторону от разделяющей плоскости  $\Pi_1$ , то процесс характеризуется приемлемым состоянием по всем контролируемым характеристикам точности. Если точка  $G$  и начало координат находятся по разные стороны от разделяющей плоскости  $\Pi_2$ , расположенной параллельно  $\Pi_1$  и проходящей через вершину куба  $M$ , то процесс характеризуется нарушением точности по всем контролируемым характеристикам. Если же точка  $G$  находится между плоскостями  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , то однозначное заключение о состоянии процесса сделать невозможно, и для уточнения диагноза требуется получение дополнительной информации.

Обобщая рассмотренный случай на  $n$ -мерное пространство признаков ( $n > 3$ ), можно составить уравнение гиперплоскости [4]  $\Pi_1$

$$\sum_{i=1}^n g_{si} = 1 \quad (1)$$

и соответственно  $\Pi_2$

$$\sum_{i=1}^n g_{si} = n. \quad (2)$$

Если обозначить среднее значение комплексного критерия точности для всех контролируемых характеристик через

$$\bar{g}_s = \frac{\sum_{i=1}^n g_{si}}{n}, \quad (3)$$

то этот диагностический признак может быть использован в задачах распознавания следующим образом. Если  $\bar{g}_s < 1/n$ , то процесс характеризуется удовлетворительным состоянием и обеспечивает точность по всем контролируемым характеристикам. При  $\bar{g}_s > 1$  имеет место нарушение точности по всем характеристикам. Если  $1/n < \bar{g}_s < 1$ , то информативность признака оказывается недостаточной, а для принятия окончательного решения требуется дополнительная информация, которая может быть получена с использованием комплексного критерия точности  $g_{s \max}$ , представляющего собой максимальное значение из имеющегося массива значений  $g_{s1}, g_{s2}, \dots, g_{sn}$ . Совместное использование  $\bar{g}_s$  и  $g_{s \max}$  позволяет однозначно решать задачу распознавания состояния  $n$ -мерной технологической системы в соответствии со следующим подходом.

1. При  $\bar{g}_s < 1/n$  наблюдается удовлетворительное состояние процесса.
2. Если  $1/n < \bar{g}_s < 1$  и  $g_{s \max} < 1$ , то состояние процесса удовлетворительное по всем характеристикам.
3. При  $1/n < \bar{g}_s < 1$  и  $g_{s \max} > 1$  точность процесса нарушена как минимум по одной из характеристик.
4. Если  $\bar{g}_s > 1 > 2$ , то точность процесса нарушена по всем контролируемым характеристикам.

Графическая интерпретация сформулированного метода распознавания показана на рис. 2. Состояние процесса характеризуется точкой на плоскости в системе координат  $\bar{g}_s, g_{s \max}$ . Граница предельного состояния представляет собой ломаную линию ABC, относительно которой и следует оценивать положение точки с координатами  $\{\bar{g}_s, g_{s \max}\}$ .

Если состояние процесса оценивается периодически для моментов времени  $t_1, t_2, \dots, t_k$ , то на графике появляется последовательность точек, по характеру расположения которых можно оценивать тенденцию развития процесса. Если изменение состояния многомерного процесса соответствует схеме 1 (рис. 2), то необходимость выполнения управляющих воздействий отсутствует. Если ход процесса соответствует схеме 2, то после  $k$ -го момента времени требуется выполнение корректирующих действий, эффективность которых оценивается по расположению соответствующей точки для момента времени  $t_{k+1}$  относительно границы ABC. Отметим, что предложенный метод графического представления результатов анализа основан на использовании двух статистических характеристик  $\bar{g}_s$  и  $g_{s \max}$  вместо исходного набора значений  $g_{s1}, g_{s2}, \dots, g_{sn}$ , что позволяет упростить процедуру оценки состояния многомерных систем и свидетельствует о диагностической ценности признаков  $\bar{g}_s$  и  $g_{s \max}$  [3].



**Характеристики точности технологического процесса дуговой сварки в узкий зазор**

Контрольный момент времени	$g_{s1}$	$g_{s2}$	$g_{s3}$	$g_{s4}$	$g_{s5}$	$g_{s6}$	$\bar{g}_s$	$g_{s \max}$
$t_1$	0,62	0,77	0,42	0,93	0,80	0,82	0,727	0,93
$t_2$	0,60	0,75	0,44	0,96	0,82	0,86	0,738	0,96
$t_3$	0,62	0,75	0,42	0,99	0,82	0,86	0,743	0,99
$t_4$	0,63	0,73	0,43	1,05	0,80	0,85	0,748	1,05
$t_5$	0,61	0,74	0,40	0,92	0,80	0,82	0,715	0,92

Алгоритм реализации предложенного метода сводится к следующей последовательности действий.

1). По результатам предварительного анализа устанавливается перечень характеристик процесса, которые влияют на качество продукции и должны контролироваться для оценки текущего состояния системы.

2). Для установленных  $n$  характеристик точности в процессе производства периодически определяются статистические характеристики смещения и рассеяния, а также комплексные критерии точности  $g_{si}$  в соответствии с методикой, изложенной в [2].

3). Если установлено, что  $\bar{g}_s < 1/n$ , то процесс удовлетворяет всем требованиям в отношении точности, и необходимость вмешательства извне отсутствует. При  $\bar{g}_s > 1/n$  состояние системы уточняется путем определения  $g_{s \max}$ . В случае  $g_{s \max} \geq 1$  следует выполнить мероприятия, направленные на восстановление точности по соответствующему параметру.

4). После выполнения управляющих воздействий их эффективность проверяется путем повторного определения диагностических признаков  $\bar{g}_s, g_{s \max}$ .

Отметим, что случай нарушения точности многомерной системы одновременно по всем характеристикам может наблюдаться на этапе отработки технологии, если квалификационные характеристики оборудования по всем параметрам точности не соответствуют требованиям к процессу [5]. В этом случае следует на этапе подготовки производства привести в соответствие квалификации оборудования и процессов.

Возможности практической реализации предложенного метода рассматриваются на примере управления состоянием процесса многопроходной сварки в узкий зазор металла толщиной 60 мм [2]. Важнейшими характеристиками, от которых зависит формирование слоев в узком зазоре, являются: центральное положение электрода в зазоре, ширина зазора, вылет электрода, скорость сварки, сварочный ток, напряжение на дуге. Отклонения перечисленных параметров в процессе сварки могут привести к образованию дефектов в виде подрезов или несплавлений.

Для эффективного управления процессом должны быть предварительно установлены номинальные значения указанных характеристик и допустимый диапазон их изменения. Измерения конт-

ролируемых характеристик следует выполнять периодически для установленных моментов времени  $t_1, t_2, \dots$ . Статистическая обработка результатов контрольных операций связана с определением комплексных критериев точности по положению электрода в зазоре  $g_{s1}$ , ширине зазора в стыке  $g_{s2}$ , вылету электрода  $g_{s3}$ , скорости сварки  $g_{s4}$ , сварочному току  $g_{s5}$  и напряжению на дуге  $g_{s6}$  [2]. Значения соответствующих характеристик точности для моментов времени  $t_1, t_2, \dots, t_5$  приведены в таблице.

Видно, что нарушение точности процесса по скорости сварки наблюдалось в момент времени  $t_4$ . Эффективность корректирующих действий, связанных с восстановлением номинального значения скорости сварки, установлена при выполнении контрольных операций в момент времени  $t_5$ . Графическое представление результатов выполненного анализа показано на рис. 2 в виде схемы 3, что позволяет сделать заключение об эффективности выполненных после момента времени  $t_4$  корректирующих действий.

В наибольшей мере преимущества предложенного подхода проявляются при анализе состояния систем с переменной размерностью. Задачи подобного рода возникают, например, при заполнении комбинированной разделки, состоящей из нижней U- и верхней V-образной частей [6]. При этом нижняя часть может заполняться сваркой в защитных газах по схеме один слой за проход, а верхняя часть — под флюсом с раскладкой валиков. Тогда контроль шестимерной системы при заполнении нижней части разделки приводит к построению шести карт контроля состояния. При заполнении верхней части необходимость направления электрода строго по центру разделки отсутствует, поэтому контролировать следует пятимерную систему с дополнительным построением пяти карт контроля.

Использование сформулированных диагностических подходов позволяет существенно упростить процедуру анализа, ограничиваясь при этом применением двух статистических характеристик.

1. «Семь инструментов качества» в японской экономике. — М.: Изд-во стандартов. — 1990. — 88 с.
2. Тарарычкин И. А. Статистическое регулирование сварочных технологических процессов с использованием метода построения карт контроля состояния // Автомат. сварка. — 2001. — № 10. — С. 33–36.
3. Биргер И. А. Техническая диагностика. — М.: Машиностроение, 1978. — 240 с.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы. — М.: Наука, 1973. — 832 с.
5. Тарарычкин И. А. Оптимизация технологии сварочных процессов при решении задач обеспечения качества продукции // Свароч. пр-во. — № 1. — 2001. — С. 48–50.
6. Тарарычкин И. А., Ткаченко А. Н. Исправление дефектов в металле большой толщины с использованием технологии дуговой сварки в узкий зазор // Автомат. сварка. — 2002. — № 4. — С. 52–53.

# МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ

А. Ю. БОНДАРЕНКО

*Рассмотрены проблемы мониторинга сварных соединений магистральных нефтегазопроводов (МНГП). Показана возможность прогнозирования остаточного ресурса особо ответственных сварных конструкций коэрцитометрическим магнитным методом совместно с традиционными методами НК.*

*The paper deals with the problems of monitoring the welded joints in line oil and gas pipelines (LOGP). Possibility is demonstrated of forecasting the residual life of super critical welded structures by the coercimetric magnetic method in combination with the traditional NDT methods.*

Важной проблемой при эксплуатации МНГП является оценка процессов старения (деградации) металла и сварных соединений. Недостаточный учет этого фактора ведет к большим материальным и финансовым потерям, а также непоправимым последствиям для окружающей среды. При развитой сети магистрального транспорта нефти и газа аварийность эксплуатируемых трубопроводов может вызвать серьезные кризисные явления в экономике.

Современный и перспективный способ оценки состояния сварных соединений МНГП по их фактическому техническому состоянию на практике реализуется путем создания системы мониторинга. Мониторинг — это сбор и анализ данных испытаний, выполненных путем контроля (измерений) по определенному методу или плану (регламентирующих правил) с целью управления системой и

получения свидетельств о качестве работы (эксплуатации) сварных конструкций.

Определение процессов старения дорогостоящих газонефтеперевозочных систем, обеспечение их безопасности требует применения существующих методов и оборудования, а также разработки качественно нового подхода — использования технологий и методов системного анализа, процедур принятия решений для эффективного планирования технического обслуживания с целью выявления неисправностей и дефектов при эксплуатации конструкций и планомерной организации замены составных элементов МНГП (рис. 1).

Недостаток материальных и финансовых ресурсов приводит к необходимости проведения анализа проблемы определения остаточного технического ресурса, обеспечения безопасности систем с целью выявления возможных резервов технического и ор-



Рис. 1. Схема взаимосвязей различных функциональных задач, вносящих наибольший вклад в обеспечение безопасности МНГП

ганизационного плана, анализа и совершенствования подходов и планирования при продлении ресурсов элементов систем МНГП.

Основная идея использования существующих резервов состоит в том, чтобы при оценке технического состояния нефтегазотранспортных систем, планировании восстановления и ремонта элементов системы использовать дополнительную оценку состояния отдельных элементов сварного узла системы способом структуроскопии сварных швов и металла нефтегазопроводов.

Для принятия решений важно, чтобы при анализе использовать не только результат наблюдения и оценки текущего технического состояния, но и прогнозировать, как это состояние изменится в будущем. Выполнение указанных задач можно объединить в рамках понятия технического сопровождения эксплуатации сварных конструкций МНГП.

Проблема продления ресурса стареющих систем с учетом критерия безопасности является комплексной и состоит в проведении ряда этапов. На рис. 1 представлена схема взаимосвязей различных функциональных задач, которые вносят наибольший вклад в обеспечение безопасности сложных объектов.

Прогнозирование индивидуального остаточного ресурса относится к находящемуся в эксплуатации техническому объекту — сварным газопроводам. Основой для прогнозирования служит информация, которую условно можно разделить на три части [1].

1. *Данные текущего (оперативного) контроля в процессе эксплуатации.* Контроль может быть непрерывным или дискретным (например, приуроченным к плановым профилактическим мероприятиям). Для поиска дефектов используются встроенные и внешние приборы, системы для хранения и переработки диагностической информации, алгоритмы и программы для принятия решений [2].

2. *Данные о нагрузках и других условиях взаимодействия объекта с окружающей средой* [3–5].

3. *Данные о материалах, элементах, узлах, нагрузках и т. п.*, то есть информация, лежащая в основе прогнозирования ресурса и оценки пока-

зателей надежности на стадии проектирования сварной конструкции.

Таким образом, три источника информации — диагностические данные о состоянии объекта, данные о старении материала и истории нагружения объекта — оказываются тесно связанными, взаимозависимыми и являются основой оценки качества работы МНГП.

В реальной практике оценка состояния трубопроводов базируется преимущественно на информации о дефектности используемого в них металла и сварных соединений. При этом данные о структурном состоянии конструкции по ряду причин не учитываются. Однако при эксплуатации нефтегазопроводов материаловедческие аспекты состояния металла должны быть преобладающими, так как дефекты, возникающие на почве структурной дегенерации, невозможно выявить из-за их лавинообразного роста и следующего за этим практически мгновенного разрушения трубопроводов.

Так, например, изменение свойств в процессе деформационного старения сварных трубопроводов после длительной эксплуатации характеризуется не только временем, а и величиной предварительной пластической деформации [6] при производстве и монтаже трубопроводов.

Максимальные искажения формы поперечного сечения трубной заготовки наблюдаются (рис. 2) на концевых участках (так называемый концевой эффект). Характерно, что значительное количество разрушений при испытаниях и эксплуатации трубопроводов зарождается именно в этих местах. Наименее контролируемы значения возможных пластических деформаций в монтажных условиях. При эксплуатации трубопроводов пластические деформации (их уровень зависит от ряда факторов) могут возникать также в зоне механических повреждений и коррозионных дефектов, в гibaх и на других участках деформирования металла трубопровода [7].

В металле швов сварных соединений могут быть технологические макродефекты сварки (несплошности, газовые поры, шлаковые включения, непровары), размеры и количество которых регламентированы НД. Наличие технологических дефектов

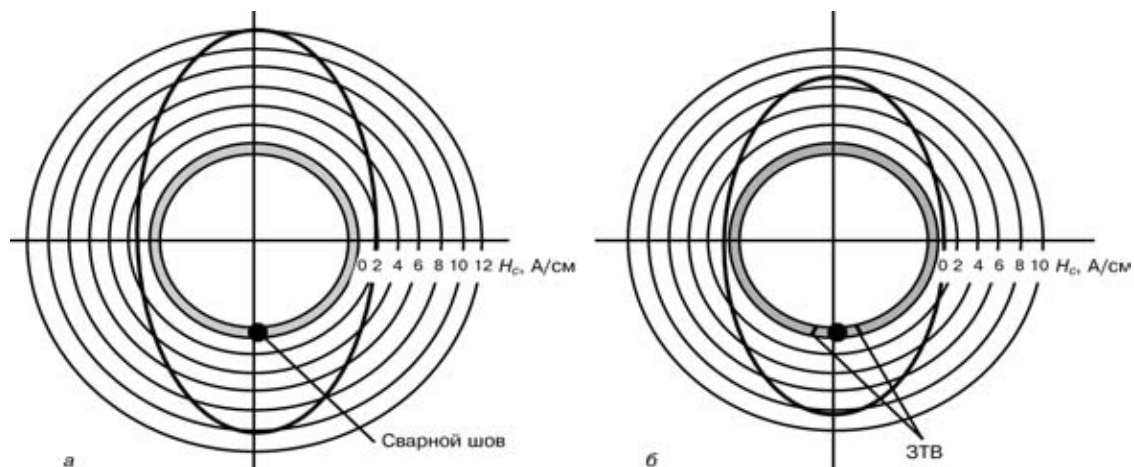


Рис. 2. Характер распределения коэффциентной силы  $H_c$  на расстоянии 20 мм от торца эталонной одношовной сварной трубы (производства фирмы «Маннесман»), измеренной по окружности трубы (а) и вдоль образующей трубы (б) (ЗТВ — зона термического влияния)

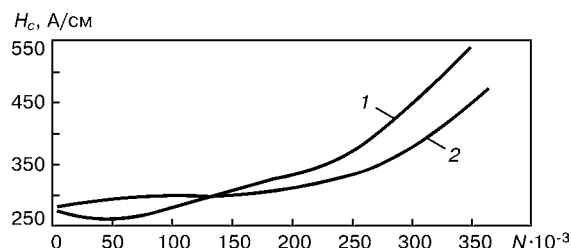


Рис. 3. Зависимость коэрцитивной силы  $H_c$  от количества циклов нагружения  $N$  для образцов из стали 09Г2С при многоциклового усталости: 1 — при измерении в направлении  $90^\circ$ , 2 — в направлении  $0^\circ$

создает условия для появления дополнительных локальных концентраций напряжений в сварных соединениях. Поэтому при прогнозировании остаточного ресурса сварных соединений МНГП целесообразно в рамках системы мониторинга использовать данные о структурном состоянии и макродефектах сварки.

С учетом сказанного выше проведены исследования с целью разработки методики оценки изменений служебных характеристик трубных сталей и сварных соединений в процессе эксплуатации для прогнозирования остаточного ресурса.

Для испытаний напряженно-деформированного состояния и усталости материала исследуемых сварных металлоконструкций был применен магнитный метод [8–11]. Исследования выполнены на образцах из трубной стали 09Г2С с использованием коэрцитиметрического метода.

Применение накладного датчика позволило оперативно измерять коэрцитивную силу  $H_c$  в различных направлениях по отношению к сварному соединению и направлению приложения нагрузки. Измерение коэрцитивной силы  $H_c$  образцов было проведено в направлениях  $0^\circ$  и  $90^\circ$  по отношению к направлению прикладываемой нагрузки. Одновременно записывали диаграмму нагружения и фиксировали начало пластического течения материала сварного образца [5, 10, 11].

Анализ полученных результатов исследований показал, что в области упругих деформаций наибольшей чувствительностью при определении растягивающих напряжений обладает способ, при котором коэрцитивная сила измеряется в направлении  $90^\circ$ . В направлении приложения нагрузки ( $0^\circ$ ) для всех образцов наблюдается минимум зависимости  $H_c(\sigma)$ , где  $\sigma$  — напряжение внешнего воздействия.

При этом отмечено, что увеличение  $\sigma$  в зоне временного упрочнения металла приводит к росту  $H_c$  по обоим направлениям. Скачок значения  $H_c$ , наблюдаемый на графических зависимостях [5], соответствует состоянию текучести металла образца, т. е. достижению предела текучести  $\sigma_T$  стали сварной трубы [5].

Моделирование процесса накопления повреждений и пластической деформации материала при циклическом нагружении проводили на аналогичных образцах из стали 09Г2С. Испытания выполняли при отнулевом цикле нагружения с частотой 5 Гц в режиме многоциклового усталости [5]. Характерная зависимость коэрцитивной силы  $H_c$  от

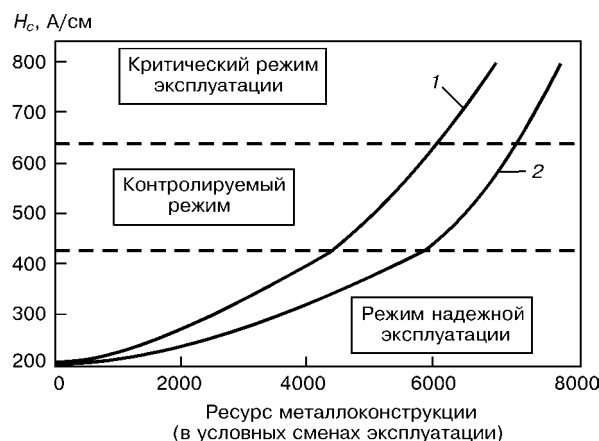


Рис. 4. Форма номограммы для оценки остаточного ресурса магистрального трубопровода по результатам мониторинга при разных режимах (1, 2) нагружений

количества циклов  $N$  при усталостном нагружении представлена на рис. 3.

Таким образом, выявлена зависимость коэрцитивной силы при статическом и циклическом нагружении от параметров нагружения образцов сварных соединений из стали, применяемых для производства труб МНГП [5, 11].

При этом были определены пороговые значения  $H_c$  для зоны сварного шва [11], а также области основного металла, по достижении которых в металле начинают накапливаться необратимые изменения [11]. Эта информация является основой при прогнозировании эксплуатационного ресурса сварных конструкций с позиций анализа структурного состояния, а в комплексе с данными НК существенно улучшает качество и достоверность оценки состояния и остаточного ресурса трубопроводов. Такой подход необходим в связи с тем, что сварные соединения в процессе эксплуатации подвергаются воздействию сложных статических и циклических нагрузок: весовых, компенсационных от тепловых расширений, нагрузок от внутреннего давления, цикличности рабочих параметров (давления, температуры) и воздействия коррозионной среды. При этом дополнительными и неучтенными могут быть нагрузки, вызванные нарушением расчетного состояния опорно-подвесной системы, заземлением отдельных участков трубопровода, неудовлетворительной работой дренажных систем участков и запорно-регулирующей арматуры со сроком службы более 20–25 лет.

В местах измерения величины  $H_c$  необходимо также дополнительно контролировать степень коррозии и эрозии металла с помощью толщиномеров, так как толщина стенки трубы также влияет на остаточный ресурс.

При проведении мониторинга состояния трубопроводов, включающего определение накопления повреждений и остаточных деформаций в местах с повышенными уровнями напряжений в процессе эксплуатации, используют статистический сравнительный анализ роста значения коэрцитивной силы  $H_c$  (по сравнению с исходным состоянием) в зонах наибольшей концентрации напряжений.

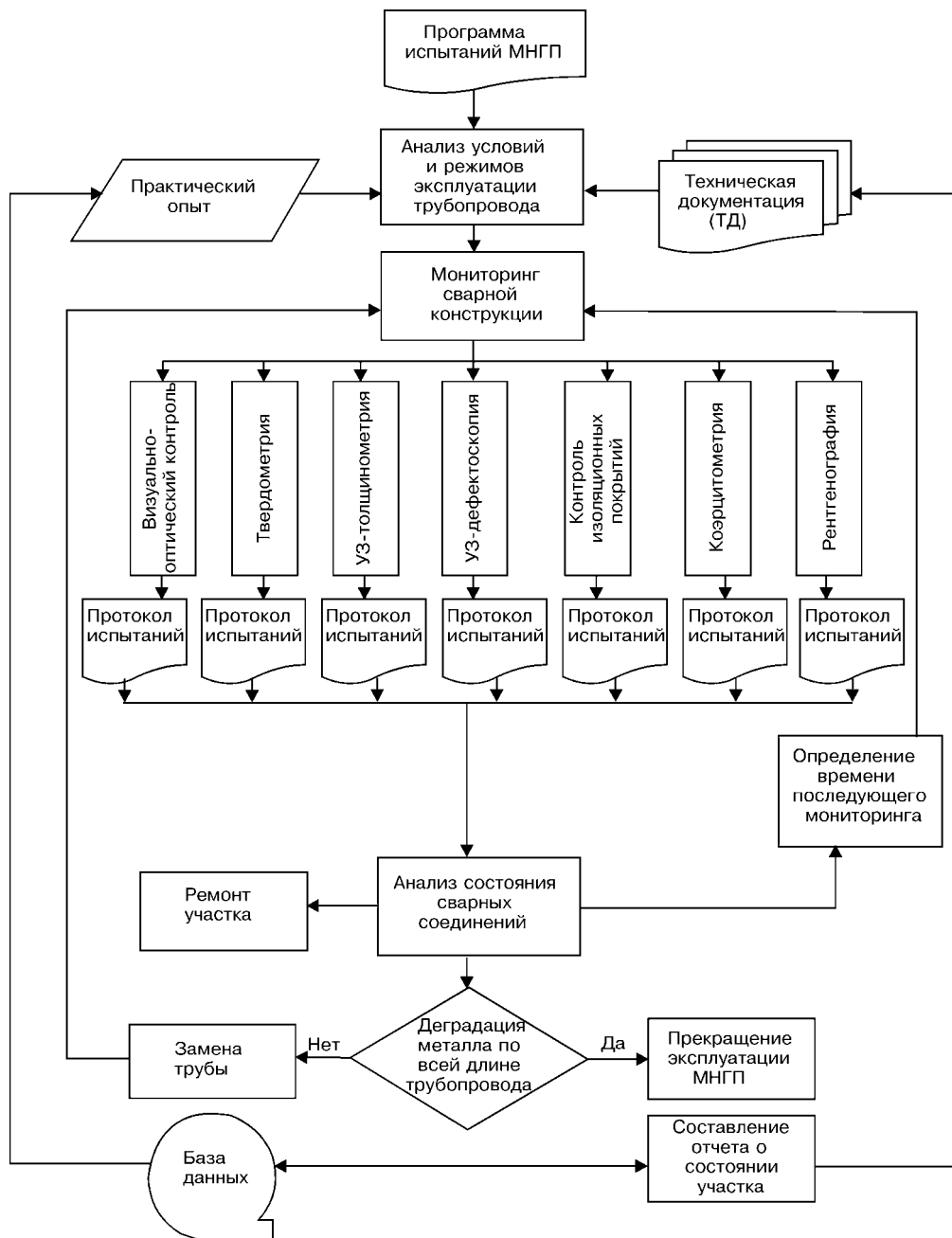


Рис. 5. Последовательность выполнения мониторинга при определении технического состояния сварных соединений МНПП

Статистический анализ на основе *генерального* распределения  $H_c(L)$  в сечениях позволяет устанавливать средние напряжения по длине  $L$  трубы в долевом и поперечном направлениях. Сравнительный анализ средних значений  $H_{cx}$  и  $H_{cy}$  с исходными  $H_{cx_0}$  и  $H_{cy_0}$  позволяет выявить изменения  $\Delta H_{c_1} = H_{cx} - H_{cx_0}$  и  $\Delta H_{c_2} = H_{cy} - H_{cy_0}$ . Они определяют *средние напряжения* в трубопроводе и общий уровень накопления повреждений и деформаций.

На основании полученных данных и анализа степени коррозии металла можно дополнительно к стандартным методам контроля дать общую оценку состояния трубопровода (рис. 4). Статистический анализ по схеме малых выборок (с помощью критерия Стьюдента), проведенный в зонах вблизи

сварных швов, дает оценку напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженных участков трубопровода, а в сочетании с НК (рис. 5) позволяет сделать заключение об остаточном ресурсе трубопровода.

## ВЫВОДЫ

1. Стендовые разрушающие статические и циклические исследования образцов сварных соединений трубной стали, проведенные совместно с параллельным коэрцитиметрическим методом, подтвердили эффективность разработанной методики. Информационный параметр – коэрцитивная сила – в процессе «продвижения» металла от исходного состояния поставки до момента разрушения изменяется в зависимости от особенностей этого состояния. Установлены характерные значения величин

ны  $H_c$  при нагрузках, соответствующих пределам текучести и прочности.

2. Процессами, предшествующими эксплуатационному повреждению сварных соединений, являются изменения свойств и микроструктуры металла в зонах концентрации напряжений (металла шва, зоны термического влияния, основного металла). Соответственно происходит изменение намагниченности металла, отражающей напряженно-деформированное состояние сварных соединений.

3. Три источника информации — диагностические данные о состоянии объекта, данные о старении материала, полученные магнитным методом, и об истории нагружения объекта — необходимы для достоверного определения остаточного ресурса сварных соединений МНПП.

4. Используя предложенный подход, можно прогнозировать остаточный ресурс непосредственно по результатам контроля магнитным методом значений коэрцитивной силы. Это позволяет рекомендовать данный метод как дополнительный к применяемым неразрушающим методам обнаружения макродефектов при анализе, прогнозировании и принятии решения об остаточном ресурсе сварных соединений при мониторинге, проводимом для обеспечения качества эксплуатации МНПП.

5. В качестве одного из путей решения проблемы информационной поддержки жизненного цикла сварных газопроводов на всех его стадиях может быть рекомендовано применение CALS-технологий (информационная поддержка процессов жизненного цикла изделий).

1. *Болотин В. В.* Ресурс машин и конструкций. — М.: Машиностроение, 1990. — 448 с.
2. *Бондаренко А. Ю.* Прогнозирование ресурса ответственных сварных конструкций на стадии эксплуатации // Тез.

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

стэнд. докл. Междунар. конф. «Сварные конструкции» (Киев, октябрь 2000 г.) / НАН Украины. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. — Киев, 2000. — С. 71.

3. *О старении* и оценке состояния металла эксплуатируемых магистральных трубопроводов / Б. Е. Патон, С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 7. — С. 3–12.
4. *Стеклов О. И.* Мониторинг и прогноз ресурса сварных конструкций с учетом их старения и коррозии // Сварка и родственные технологии — в XXI век: Сб. тр. Междунар. конф. (Киев, ноябрь 1998 г.). — Киев: Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, 1998. — С. 257–261.
5. *Бондаренко А. Ю.* Об оценке усталостного состояния и остаточного ресурса сварных соединений неразрушающим магнитным методом для обеспечения качества сварных конструкций, изделий и материалов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2002. — № 2. — С. 42–45.
6. *Гиренко В. С., Семенов С. Е., Гончаренко Л. В.* Деформационное старение трубных сталей // Там же. — 2001. — № 3. — С. 32–35.
7. *Иванцов О. М.* Надежность и экологическая безопасность магистральных трубопроводов России // Сварка и родственные технологии — в XXI век: Сб. тр. Междунар. конф. (Киев, ноябрь 1998 г.). — Киев: Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, 1998. — С. 99–109.
8. *Клюев В. В.* Неразрушающий контроль и диагностика безопасности // Зав. лаборатория. Диагностика материалов. — 1996. — № 1. — С. 16.
9. *Boeing Kn. G.* NDE handbook. NDT examination methods for condition monitoring. Teknisk Forland A/S. — Danish Technical Press, 1987–1989. — 418 p.
10. *Лобанов Л. М., Бондаренко А. Ю., Бондаренко Ю. К.* Оценка остаточного ресурса сварных соединений магнитным методом для мониторинга сварных конструкций // Материалы МИС. Дос. V-1225-2002.
11. *Об оценке* усталостного состояния и остаточного ресурса сварных соединений неразрушающим магнитным методом. Материаловедческие аспекты / В. Ф. Мужикский, Ю. К. Бондаренко, А. Ю. Бондаренко, Г. Я. Безлюдько // Матер. 3-й Междунар. конф. «Диагностика трубопроводов», Москва, 21–26 мая 2001 г. — М., 2001. — С. 11.

*Поступила в редакцию 26.11.2002*



## ПЬЕЗОПРИЕМНИКИ ТЕПЛООВОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЪЕКТОВ

С. А. НАЙДА

Обнаружен неизвестный ранее эффект пространственной фильтрации четвертьволновыми слоями диффузного теплового акустического излучения. Показано, что этот эффект является причиной неудачи семнадцатилетних попыток осуществления многоспектрального акустотермометра для измерения внутренней температуры тела с точностью  $\approx 0,2$  К. Эффект способствует получению указанной точности при использовании предложенного автором фокусируемого акустотермометра с плосковогнутой эллиптической линзой при большом фокусном расстоянии и в реальном масштабе времени. Обсуждена возможность измерения внутренней температуры твердых тел с помощью пьезоприемников (ПП) без слоев.

An earlier unknown effect of spatial filtration by quarter-wave layers of diffuse thermal acoustic radiation has been found. It is shown that this effect is the cause for failure of seventeen year attempts of developing a multispectral acoustothermometer for measurement of the inner temperature of a body with the accuracy of  $\sim 0.2$  K. It promotes ensuring the above accuracy, when using the proposed by the authors focused acoustothermometer with a plano-concave elliptical lens at a large focal distance and in real time. A possibility is discussed of measuring the inner temperature of solids, using piezoreceivers (PP) without layers.

Причиной акустического излучения из объекта является тепловое хаотическое движение его атомов и молекул. Выражение для квадрата акустического давления  $p^2$  можно получить непосредственно из закона излучения безграничной среды Рэлея – Джинса как частного случая закона Планка излучения абсолютно черного тела при  $hf \ll kT$ :

$$\epsilon(f, T) = dI / df = (2\pi f^2 / c^2) kT,$$

где  $h$  — постоянная Планка;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура;  $\epsilon$  — спектральная плотность;  $I$  — интенсивность излучения объекта;  $f_0$  — рабочая частота ПП;  $c$  — скорость акустических волн.

После подстановки соответствующих выражений для  $I$  получаем

$$p^2 = (4\pi f^2 / c) \rho k T \Delta f, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность среды;  $\Delta f \ll f$  — полоса частот, выделяемая приемником или усилителем высокой частоты (УВЧ) из спектра шума.

Соотношение (1) служит для измерения температуры объекта.

Для измерения распределения температуры по глубине зондирования в работе [1] выбран метод многоспектрального зондирования, требующий широкой полосы частот ( $\Delta f / f_0 \sim 1$ , где  $f_0$  — частота механического резонанса пьезопластины) и наличия поглощения в этой полосе, т. е. достаточно большой частоты  $f_0$ , и априорного знания частотно-зависимого коэффициента поглощения. Если в однородной среде с известной температурой  $T_0$  на глубине  $z$  имеется участок, температура которого больше температуры среды на величину  $\Delta T$ , то измеряемая температура  $T = T_0 + \Delta T \exp(-z/\delta)$  и для определения  $z$  и  $\Delta T$  необходимо двухспектральное (двухчастотное) зондирование на частотах  $f_1$  и  $f_2$ . Тогда

$$\begin{aligned} T_1 &= T_0 + \Delta T \exp(-z/\delta_1), \\ T_2 &= T_0 + \Delta T \exp(-z/\delta_2), \end{aligned}$$

где  $\delta_1, \delta_2$  — длины затухания на соответствующих частотах.

Решая эту систему уравнений относительно  $\Delta T$  и  $z$ , получаем

$$\Delta T = \left[ \frac{(T_1 - T_0) \delta_1}{(T_2 - T_0) \delta_2} \right]^{1/(\delta_2 - \delta_1)}, \quad (2)$$

$$z = \ln \left( \frac{T_1 - T_0}{T_2 - T_0} \right) \frac{\delta_1 \delta_2}{\delta_1 - \delta_2}. \quad (3)$$

Блок-схема акустотермометра из работ [2, 3], приведена на рис. 1. Через заполненный водой блок модулятора 1 с акустически прозрачным окном 2 акустотермометр вводится в соприкосновение с объектом. Шумовой акустический сигнал объекта модулируется обтюратором 3, который вращается электродвигателем, и поступает на ПП 4. Сигнал с выхода ПП через трансформатор 5 подается на широкополосный УВЧ 6, детектируется квадратичным детектором (КД) 7 и направляется на синхронный детектор (СД) 8, на который поступает опорное напряжение с модулятора 1. С выхода СД 8 сигнал подается для усреднения на фильтр нижних частот (ФНЧ) 9. Постоянную составляющую сигнала регистрируют самописцем 10, а температуру модулятора измеряют с помощью схемы 11.

После ФНЧ в случае полосового «белого» шума пороговая точность измерения температуры

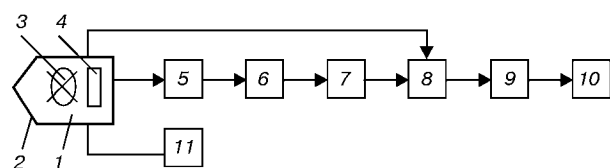


Рис. 1. Блок-схема акустотермометра

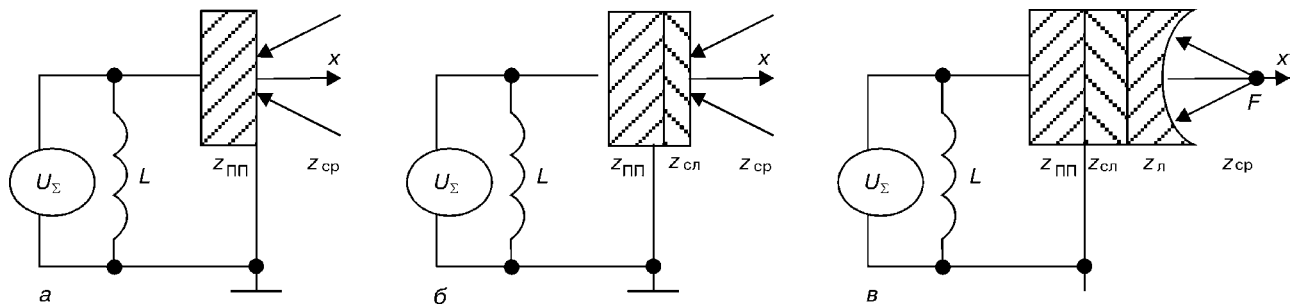


Рис. 2. Схематическое изображение ПП теплового акустического излучения:  $z_{пп}$ ,  $z_{сл}$ ,  $z_л$ ,  $z_{ср}$  — удельные акустические импедансы соответственно ПП, слоя, линзы и среды;  $L$  — индуктивность;  $U_{\Sigma}$  — суммарное напряжение на выходе ПП

$$(\theta/T)_{пор} = 2\sqrt{2\Delta\Omega/\Delta\omega} = 2\sqrt{2/(\tau\Delta\omega)}, \quad (4)$$

где  $\Delta f$  — полоса частот ПП;  $\Delta\Omega = 1/\tau$  — полоса частот ФНЧ (обычно RC-фильтра,  $\tau = RC$ ); множитель 2 перед корнем учитывает вычитание двух постоянных уровней при модуляционном методе измерения.

При открытом модуляторе на ПП поступает излучение из исследуемого объекта, при закрытом — из воды, заполняющей модулятор (этот сигнал является эталонным). Когда температуры тела и модулятора совпадают, самописец устанавливается на нулевой отметке, отсюда и название метода — нулевой модуляционный.

Первая попытка зондирования внутренней температуры объектов по их тепловому акустическому излучению была предпринята в работе [4], при этом объектом была жидкость (вода). В качестве приемника использовали пьезопластину из ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$  размером  $1 \times 1 \text{ см}^2$ , имеющую частоту механического резонанса  $f_0 = 1,3 \text{ МГц}$  и согласованную с водой четвертьволновым слоем из хлористого калия. Оказалось, что ширина шумовой дорожки, равная 5 К при постоянной времени  $\tau = 30 \text{ с}$ , значительно больше пороговой, рассчитанной по интенсивности теплового излучения. Из этого был сделан вывод, что точность аппаратуры ограничена не флуктуациями шумового сигнала, а шумами экспериментальной установки.

Дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования в Институте радиотехники и электроники АН СССР (впоследствии РАН) не привели к повышению точности и получению практического метода измерения температуры биологических объектов (например, [5] и приводимая там литература). В статье [5] в качестве приемника излучения использован расположенный в аквариуме ПП радиусом 5 мм, снабженный одним слоем, с согласующим трансформатором. При этом  $f_0 = 2,2 \text{ МГц}$ ,  $\Delta f = 0,2 \text{ МГц}$ ;  $\tau = 1 \text{ с}$ ; ширина дорожки также равна 5 К.

Отмечается «отсутствие ясного понимания механизма формирования электрического сигнала за счет теплового акустического излучения». Сделана попытка дать строгий вывод полуэмпирической формулы, в которой интенсивность этого сигнала пропорциональна не температуре объекта, а разности температур объекта и ПП. На ошибочность этой формулы уже указывалось в более поздних

работах [6, 7]. Поскольку интенсивность суммарного шума на электродах ПП нигде не приводится, то факт ее использования является, на наш взгляд, доказательством малой доли указанного выше сигнала в суммарном шуме.

Иной принцип построения ПП рассмотрен в статьях [6, 7]: использовали двояковыгнутую эллиптическую (безабберационную) линзу и ПП со сравнительно узкой полосой частот, в которой разницей затухания сигнала на длине фокусного расстояния можно пренебречь. Было показано, что основной вклад в суммарную интенсивность шумов дает излучение из сферы в фокусе с радиусом, равным корреляционному радиусу  $\rho_k \approx \lambda/2$ , которое после линзы падает нормально поверхности ПП в виде плоской волны. В результате точность измерения температуры достигает пороговой точности. Кроме того, с помощью фокусируемого акустотермометра можно измерять абсолютную глубинную температуру тела одночастотным одноканальным методом. Причем, в отличие от двухчастотного метода, частоту приема нужно выбирать возможно низкую (с малым затуханием, а следовательно, и большой глубиной проникновения в ткани).

В настоящей работе рассмотрены соотношения параметров для ПП трех типов (до схемы измерения), включая и ПП без слоев. На их основе проанализированы экспериментальные данные, описанные в литературе, включая и эксперимент со сферической линзой.

**Теоретическое обоснование.** В соответствии с работой [7] приведем основные соотношения для измерения температуры и определения его точности по тепловому акустическому излучению, принимаемому ПП без демпфера с тыльной стороны:

- 1) без согласующих слоев и линзы (рис. 2, а);
- 2) с согласующими слоями и без линзы (рис. 2, б);
- 3) с согласующими слоями и плосковыгнутой линзой (рис. 2, в).

Электрической нагрузкой служит индуктивность  $L$ , настроенная в резонанс с емкостью пьезопластины с зажатými электродами  $C_0^S$  ( $S = 0$  — смещение поверхности пластины) и компенсирующая эту емкость на частоте  $f_0$ :  $L = 1/(\omega_0^2 C_0^S)$ .

Точность измерения на конечном интервале времени по конечному числу  $N$  выборочных точек  $T_i$ , когда рассчитывается не истинная температура  $T$



и ее дисперсия  $\theta^2$ , а их оценки  $\hat{T}$  и  $\hat{\theta}^2$ , определяется суммой оценки дисперсии и среднеквадратичного отклонения оценки дисперсии от температуры:

$$\theta^2 = \hat{\theta}^2 + \hat{\theta}^2/N. \quad (5)$$

В цитируемых выше экспериментальных работах ошибочно (на это обращалось внимание в статье [7]) оставлялась гораздо меньшая величина —  $\hat{\theta}^2/N$ . Мы будем пользоваться формулой (5), но без малого слагаемого.

*Пьезопреобразователь без согласующих слоев и линзы* (рис. 2, а). Квадрат суммарного напряжения на выходе ПП:

$$\bar{U}_{\Sigma}^2 = \bar{U}_{\text{ПП}}^2 + \bar{U}_{\text{ак}}^2 = 4R_0 k T \Delta f + (z_{\text{ср}}/A_0) k T K_{\text{п}0}^2 \Delta f, \quad (6)$$

где  $R_0$  — действительная часть электрического импеданса  $Z(f)$  нагруженного ПП,

$$R_0 \equiv \text{Re}Z(f) = \frac{z_{\text{ср}} K_{\text{п}0}^2}{4A_0}, \quad (7)$$

$$K_{\text{п}0} = \frac{l_0}{e_{33}} \quad (8)$$

в интервале  $\Delta f$  (вне его  $K_{\text{п}0} = 0$ );  $K_{\text{п}0}$  — коэффициент преобразования акустического давления плоской волны в отсутствие ПП в электрическое напряжение;  $l_0, A_0, e_{33}$  — соответственно толщина ПП, площадь принимающей поверхности и электрическая постоянная;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана.

Из (6), (7) видно, что  $\bar{U}_{\Sigma}^2 = 2\bar{U}_{\text{ак}}^2$ , а следовательно,

$$\theta/T = 2(\theta/T)_{\text{пор}}. \quad (9)$$

Первая компонента в формуле (6) представляет собой «белый шум». При наличии большого затухания спектр второй компоненты должен представлять собой спадающий по частоте шум.

*Пьезопреобразователь с одним согласующим слоем без линзы* (рис. 2, б). Квадрат суммарного напряжения на выходе ПП

$$\bar{U}_{\Sigma}^2 = \left( \frac{z_{\text{сл}}}{z_{\text{ср}}} \right)^2 \bar{U}_{\text{ПП}}^2 + \alpha (z_{\text{сл}}/z_{\text{ср}})^2 (z_{\text{ср}}/A_0) k T K_{\text{п}0}^2 \Delta f. \quad (10)$$

Здесь  $\alpha \ll 1$  — коэффициент, учитывающий зависимость коэффициента трансформации слоя от угла падения, в работе [7] принят равным единице. На его малое значение впервые обращено внимание в настоящей работе.

Минимальное значение второго члена получим при  $\alpha (z_{\text{сл}}/z_{\text{ср}})^2 = 1$ , или

$$\alpha_{\text{мин}} = (z_{\text{ср}}/z_{\text{сл}})^2. \quad (11)$$

В этом случае

$$\bar{U}_{\Sigma}^2 = (z_{\text{сл}}/z_{\text{ср}})^2 \bar{U}_{\text{ПП}}^2 + \bar{U}_{\text{ПП}}^2 \approx (z_{\text{сл}}/z_{\text{ср}})^2 \bar{U}_{\text{ПП}}^2. \quad (12)$$

$$\theta/T = \left( \frac{z_{\text{сл}}}{z_{\text{ср}}} \right)^2 (\theta/T)_{\text{пор}} \gg (\theta/T)_{\text{пор}}. \quad (13)$$

*Пьезопреобразователь с согласующим слоем и плосковогнутой эллиптической линзой* (рис. 2, в). Квадрат суммарного напряжения на выходе ПП

$$\bar{U}_{\Sigma}^2 = (z_{\text{сл}}/z_{\text{ср}})^2 \bar{U}_{\text{ПП}}^2 \left[ (1 + \alpha) + \frac{z_{\text{л}}}{z_{\text{ср}}} \left( \frac{\pi D}{2F} \right)^2 \right]. \quad (14)$$

Из (14) следует, что при  $\alpha \ll 1$  вклад в  $\bar{U}_{\Sigma}^2$  дают в основном акустическое тепловое излучение из фокуса линзы и электрические тепловые шумы сопротивления ПП  $R = (z_{\text{сл}}/z_{\text{ср}})^2 R_0$ . Поэтому

$$\theta/T = \left[ 1 + \frac{z_{\text{ср}}}{z_{\text{л}}} \left( \frac{2F}{\pi D} \right)^2 \right] (\theta/T)_{\text{пор}}. \quad (15)$$

Для линзы из оргстекла при  $z_{\text{ср}}/z_{\text{л}} \approx 0,5$  и  $[2F/(\pi D)]^2 = 2$  получаем  $\theta/T = 2(\theta/T)_{\text{пор}}$ , т. е. всего в два раза больше пороговой.

#### Экспериментальные литературные данные.

1). Поскольку ПП без слоев в экспериментах не применялся, оценим его параметры для использовавшейся в [4] пластины из ниобата лития со следующими параметрами:  $z_{\text{ПП}} = 33,87 \cdot 10^6$  Па·с/м;  $e_{33} = 1,22$  Кл/м<sup>2</sup>;  $N_t = f_0 l_0 = 3650$  Гц·м. Тогда для  $f_0 = 1,3$  МГц,  $z_{\text{ср}} = 1,5 \cdot 10^6$  Па·с/м,  $T = 300$  К,  $\tau = 30$  с,  $l_0 = 2,8 \cdot 10^{-3}$  м,  $A_0 = 10^{-4}$  м<sup>2</sup>,  $\Delta f \approx 0,8$  МГц ( $\Delta\omega = 5 \cdot 10^6$  с<sup>-1</sup>), используя формулы (4), (6)–(9),

получаем  $(\bar{U}_{\Sigma}^2)^2 = 23$  мкВ,  $(\theta/T)_{\text{пор}} = 2,3 \cdot 10^{-4}$ ,  $\theta = 0,14$  К.

2). Для ПП со слоем КС1 ( $z_{\text{сл}} = 8,95 \cdot 10^6$  Па·с/м) при  $\alpha \ll 1$  по формуле (10) получаем  $(\bar{U}_{\Sigma}^2)^2 \approx 100$  мкВ.

Здесь необходимо отметить, что ниобат лития обладает высокой температурой Кюри (1200 К) и при  $T > 300 \dots 400$  К применяется в методе акустической эмиссии, у которого уровень шумов аппаратуры, приведенный ко входу, равен 10 мкВ.

Согласно соотношению (13) точность измерения температуры  $\theta/T \approx 8,3 \cdot 10^{-3}$ .

Приняв  $\theta_{\text{изм}} = 2,5$  К и  $T = 300$  К, получаем  $(\theta/T)_{\text{изм}} = 8,3 \cdot 10^{-3}$ .

Тот факт, что  $(\theta/T)_{\text{расч}}$  и  $(\theta/T)_{\text{изм}}$  близки по значению в случае, когда шумы установки малы по сравнению с  $\bar{U}_{\text{ПП}}^2$ , является доказательством существования эффекта пространственной фильтрации четвертьволновыми слоями диффузного теплового излучения.

В работе [8] использовали ПП диаметром 10 мм из керамики ЦТС-19 с антирезонансной частотой 2 МГц и двумя четвертьволновыми слоями, электрически нагруженный на индуктивность. При  $\Delta f \approx 64$  кГц ( $\Delta\omega = 4 \cdot 10^5$  с<sup>-1</sup>),  $\tau = 3$  с получаем  $(\theta/T)_{\text{пор}} \approx 2,55 \cdot 10^{-3}$ ,  $\theta_{\text{пор}} \approx 0,83$  К.

Из кривой частотной зависимости сигнала на выходе СД с ФНЧ [8], соответствующей разности



температур  $\approx 10$  К, видно, что  $2\theta = 3,2$  К, или  $\theta/T = 5,3 \cdot 10^{-3}$ , что всего в два раза больше  $(\theta/T)_{\text{пор}}$ . Параметры слоев не приводятся.

В более поздней статье [9] без ссылки на работу [8] те же измерения выполнены при  $\Delta f = 0,8$  МГц ( $\Delta\omega = 5 \cdot 10^6$ ),  $\tau = 3$  с и с неуказанным типом ПП. Ширина шумовой дорожки для черного тела (рис. 2 из [9]), равна  $2\theta = 3,20$  К, или  $\theta/T = 5,3 \cdot 10^{-3}$ , но уже при  $(\theta/T)_{\text{пор}} = 7,2 \cdot 10^{-4}$ . Здесь  $(\theta/T)/(\theta/T)_{\text{пор}} = 7,4$ .

Если взять параметры слоя ПП из расчетной работы [8] по сравнению чувствительности акустотермометров различных типов ( $f_0 = 2$  МГц,  $\Delta f = 0,8$  МГц,  $z_{\text{сл}}/z_{\text{ср}} = 3$ ), то получим, что отношение  $z_{\text{сл}}/z_{\text{ср}}$ , которое в [8] приближенно равно 7,4, принимает значение 9. Это также подтверждает правильность формулы (13), а также существование эффекта фильтрации и в работе [8].

В статье [5], в которой использовали ПП с  $f_0 = 2,2$  МГц,  $\Delta f = 0,2$  МГц,  $\tau = 1$  с,  $2\theta = 5$  К, установлено  $\theta/T = 8,35 \cdot 10^{-3}$ ,  $(\theta/T)_{\text{пор}} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ ,  $(\theta/T)/(\theta/T)_{\text{пор}} = (1,9)^2$ .

Обратим внимание, что значение 1,9 практически совпадает со значением  $z_{\text{сл}}/z_{\text{ср}} \approx 2$  для оргстекла и воды, что свидетельствует о материале слоя толщиной  $\lambda/4 = 0,3$  мм, который легко можно нанести, а затем проконтролировать поверхность контакта через принимающую поверхность визуально.

3). Не имевшая в последующих работах продолжения попытка фокусировки теплового акустического излучения была предпринята в статье [10] для демонстрации высокой ( $\approx 1$  мм) поперечной разрешающей способности по сравнению со способностью радиометра с частотой 1 ГГц ( $\lambda = 0,3$  м). При этом использовали ПП с  $f_0 = 2,0$  МГц ( $\lambda/2 \approx 0,4$  мм) и сферическую акустическую линзу диаметром  $D = 20$  мм из оргстекла и с фокусным расстоянием  $F = 30$  мм. Сферическая линза отличается от эллиптической тем, что осевая координата фокуса лучей при увеличении их расстояния от оси приближается к линзе. Можно показать, что сдвиг от центра сферы

$$\Delta F = R_{\text{л}} \left( \frac{n}{1-n} - \frac{1}{\cos\varphi_i/n - \cos\theta_i} \right), F = \frac{R_{\text{л}}}{1-n}, \quad (17)$$

где  $n = c_{\text{ж}}/c_{\text{л}} < 1$  — показатель преломления;  $c_{\text{ж}}$ ,  $c_{\text{л}}$  — скорости звука в жидкости и линзе;  $\sin\theta_i = D_i/(2R_{\text{л}})$ ,  $\sin\varphi_i = n_i \sin\theta_i$ ;  $R_{\text{л}}$  — радиус сферической поверхности линзы;  $D_i$  — диаметр пучка.

Для линзы с рассматриваемыми параметрами по формуле (17) получаем:

$D_i$ , мм	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta F$ , мм	0,073	0,21	0,40	0,66	0,98	1,37	1,84	2,10	3,10

Согласно этим значениям коррелированное излучение из сферы радиусом  $\lambda/2 \approx 0,4$  мм на частоте 2 МГц попадает на линзу и ПП только в область с  $D_i < 8$  мм, который является эффективным диаметром линзы. При  $[\pi D/(2F)]^2 \approx 0,18$  ( $D = 8$  мм,

$F = 30$  мм) выражение (14) будет иметь вид:  $\bar{U}_{\Sigma}^2 = 1,36 \bar{U}_{\text{ПП}}^2$ , а (15) —  $\theta/T = 3,8(\theta/T)_{\text{пор}}$ .

Для частоты  $f = 1$  МГц ( $\lambda/2 = 0,8$  мм),  $D_i < 11$  мм получаем  $[\pi D/(2F)]^2 = 0,33$  ( $D = 11$  мм,  $F = 30$  мм) и  $\bar{U}_{\Sigma}^2 = 1,66 \bar{U}_{\text{ПП}}^2$ ,  $\theta/T = (\theta/T)_{\text{пор}}$ .

Для эллиптической линзы с такими же параметрами ( $D = 20$  мм,  $F = 30$  мм):  $[\pi D/(2F)]^2 = 1,1$  и  $\bar{U}_{\Sigma}^2 = 3,2 \bar{U}_{\text{ПП}}^2$ ,  $\theta/T = 1,45(\theta/T)_{\text{пор}}$ .

## ВЫВОДЫ

1. Методом сравнения пороговой, ограниченной флуктуациями шумового сигнала, точности определения температуры объекта по его тепловому акустическому излучению (из литературных данных измерения этого излучения в жидкости с помощью ПП с четвертьволновыми согласующими слоями) с шириной шумовой дорожки 5 К обнаружен неизвестный ранее эффект пространственной фильтрации диффузного излучения такими слоями. В результате интенсивность собственных электрических шумов ПП значительно — в  $(z_{\text{сл}}/z_{\text{ж}})^2$  раз — превышает интенсивность электрического шума акустического сигнала. Следовательно, точность измерения температуры  $\theta$  во столько же раз больше пороговой.

2. Показано, что указанный эффект является причиной неудачи семнадцатилетних попыток осуществления многоспектральной акустотермометрии внутренней температуры тела с точностью  $\approx 0,2$  К.

3. В случае предложенного в данной работе акустотермометра с фокусируемой плосковогнутой эллиптической линзой ослабление диффузной компоненты по сравнению с пропускаемой без ослабления (коррелированной), излучаемой из находящейся в фокусе линзы сферы радиусом  $\rho_{\text{кор}} = \lambda/2$  ( $\lambda$  — длина акустической волны в жидкости), позволяет получить точность измерения 0,2 К при большем расстоянии и в реальном масштабе времени.

4. Эффект фильтрации способствует увеличению отношения сигнал/шум и в приборах УЗ интроскопии с согласующими слоями.

5. Показано, что с учетом эффекта фильтрации эллиптическая линза эффективнее сферической (при их одинаковых параметрах).

6. Учитывая эффект фильтрации, для метода акустотермометрии в НК твердых тел с  $z \gg \gg 1,5 \cdot 10^6$  Па·с/м можно рекомендовать пьезопластины без слоев из пьезокерамики ЦТС (PZT).

1. О возможностях акустической термографии биологических объектов / Ю. В. Гуляев, Э. Э. Годик, В. В. Дементенко и др. // Докл. АН СССР. — 1985. — **183**, № 6. — С. 1495–1499.
2. Пасечник В. И. Акустическая термография биологических объектов // Радиотехника. — 1991. — № 8. — С. 77–80.
3. Пасечник В. И. Оценка пороговой чувствительности акустотермометров // Акуст. журн. — 1993. — **39**, № 1. — С. 140–143.
4. Зондирование внутренней температуры объектов по их тепловому акустическому излучению / В. И. Миргородский, В. И. Пасечник, С. В. Пешин и др. // Докл. АН СССР. — 1987. — **297**, № 6. — С. 1370–1372.



5. Аносов А. А., Пасечник В. И. Особенности теплового акустического излучения как источника акустических сигналов // Акуст. журнал. — 2002. — 48, № 1. — С. 16–21.
6. Дидковский В. С., Найда С. А. Расчетные соотношения метода акустометрии биологических тканей. — Киев, 1997. — 11 с. — Деп. в ГНТБ Украины 21.04.97, № 314-Ук97.
7. Найда С. А. Акустометрия жидких объектов с помощью пьезоприемников мегагерцевого диапазона // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2002. — № 3. — С. 41–48.
8. Аносов А. А., Бограчев К. М., Пасечник В. И. Измерение теплового акустического излучения из кисти руки человека // Акуст. журнал. — 1998. — 44, № 3. — С. 299–306.
9. Аносов А. А., Бограчев К. М., Пасечник В. И. Пассивная термоакустическая томография кисти руки человека // Там же. — № 6. — С. 725–730.
10. Аносов А. А., Бограчев К. М., Пасечник В. И. Акустическая термография биологических объектов // Радиотехника. — 1991. — № 8. — С. 77–80.

Нац. техн. ун-т Украины «Киев. политехн. ин-т»

Поступила в редакцию  
14.10.2002

## УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Приглашаем Вас и Ваших сотрудников принять участие в работе ежегодных научно-практических конференций, семинаров, круглых столов, выставок, организуемых Украинским Информационным Центром «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ» под научным руководством известных ученых и специалистов Украины, России, Белорусии

ЦЕНТР опирается на многолетний опыт его сотрудников и поименный банк данных, собранных кропотливым трудом в течение 20-летней деятельности по проведению конференций в Украинском Доме экономических и научно-технических знаний и двухлетней самостоятельной работы. Тематика мероприятий кристаллизовалась более 20 лет.

**ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ МЕРОПРИЯТИЙ** — обмен научно-технической информацией, выявление наилучших результатов практической деятельности и их распространение в промышленности, обобщение опыта производства в условиях информационной разобщенности производителей, ученых и специалистов.

**ЦЕНТР ПРЕДЛАГАЕТ:** участие, очное и заочное, в работе 5 ежегодных Международных конференций и выставок (перечень прилагается); организацию бизнес-туров на международные конференции и выставки дальнего зарубежья (план формируется); проведение презентаций предприятий и организаций в рамках конференций; издание сборников материалов конференций; организацию издания лучших докладов в профессиональных журналах Украины, России, Белорусии.

### Перечень проводимых мероприятий в 2003 г.:

- Третья Промышленная конференция с международным участием и блиц-выставка «ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ НАУЧНОГО, РЕСУРСНОГО И ПРОМЫШЛЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ», в рамках которой состоятся семинары: «Машиностроение в новом тысячелетии», «Технологии ремонта машин, механизмов, оборудования», «Горнодобывающая промышленность».

*Место и время проведения:* п. Славское, Карпаты, пансионат «Бойкивщина», 24–28 февраля 2003 г.

- Научно-практический семинар «ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ» в рамках выставки «Сварка. Родственные технологии 2003».

*Научное руководство:* ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, Общество сварщиков Украины.  
*Место и время проведения:* Выставочный центр «КиевЭкспоПлаза», г. Киев, ул. Салютная, 26, 20–23 мая 2003 г.

- Двадцать Третья ежегодная международная конференция и блиц-выставка «КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ» (СЛАВПОЛИКОМ)

*Место и время проведения:* г. Ялта, 2–6 июня 2003 г.

- Одинадцатый ежегодный международный семинар-выставка «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ».

*Место и время проведения:* г. Ялта, конец сентября–начало октября 2003 г.

- Десятая юбилейная научно-практическая конференция «ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА МАШИН, МЕХАНИЗМОВ, ОБОРУДОВАНИЯ» в рамках выставки «Маш-пром».

*Место и время проведения:* г. Днепропетровск, октябрь 2003 г., ЭКСПОЦЕНТР «Метеор».

### Подробные сведения можно запросить:

тел./факс: (044) 573 30 40; e-mail: office@conference.kiev.ua;  
glavackaya@softhome.net; www.conference.kiev.ua



## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Ю. А. ЛЫМАРЕНКО, А. Д. ШАМРОВСКИЙ

*Предложена нелинейная двухмассовая модель акустической эмиссии (АЭ) в элементе конструкции с повреждением. На основе численного интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих колебания системы, с последующим разложением решения в ряды Фурье изучены свободные и вынужденные колебания предложенной модели. Показано, что эта модель отражает все характерные особенности колебаний конструкций с повреждениями: уменьшение собственной частоты колебаний, наличие суб- и суперрезонансов, а также акустические эффекты.*

*A non-linear two-weight model of acoustic emission (AE) in a damaged structural element is proposed. Numeric integration of nonlinear differential equations, describing the oscillations of a system, with subsequent expansion of the solution into Fourier series was the basis to study the free and forced oscillations of the proposed model. It is shown that this model reflects all the characteristic features of oscillations of a damaged structure: reduction of the natural frequency of oscillations, presence of sub- and super-resonances, as well as acoustic effects.*

В последнее время опубликовано значительное количество работ [1–9], посвященных разработке эффективных методов неразрушающей диагностики поврежденных элементов механических конструкций различного назначения. В качестве базовой модели в этих работах используют предложенную еще в 1976 г. [10] нелинейную одномассовую систему, в которой масса  $m$  соединяется пружиной с неподвижной опорой. Наличие трещины учитывается посредством дополнительной пружины, работающей только на сжатие. Такой подход в некоторых случаях позволяет вполне адекватно охарактеризовать поведение реальных конструкций, однако он имеет ряд существенных недостатков.

Известно [11, 12], что даже относительно небольшие изменения структуры материала служат источником упруго-пластических волн, возникающих в момент образования или развития указанного дефекта. Данное явление получило название акустической эмиссии. В рамках нелинейной одномассовой модели с трещиной указанный эффект практически не проявляется. Так, при уменьшении жесткости системы на одном полуцикле колебаний на 20 % амплитуда второй гармоники, согласно этой модели, составляет 1,4 % амплитуды первой гармоники колебаний, что не согласуется с экспериментальными данными работ [13, 14]. Основной причиной такого несоответствия является, по-видимому, то, что искажения в системе, вызванные ее повреждением, моделируются изменением упругих свойств модели (невесомой пружины), а инерционные свойства остаются без изменений.

В данной работе предлагается модель, лишенная такого недостатка. Как показали проведенные исследования, использование этой модели позволяет учесть все характерные особенности, присущие колебаниям реальных конструкций с повреждениями.

**Свободные колебания тела с трещиной.** Простейшей моделью, позволяющей изучать гармонические колебания, является, как известно, груз, соединенный пружиной с неподвижной опорой. Учитывая возможность контакта свободных поверхностей трещины при циклически изменяющейся внешней нагрузке, модифицируем эту модель вве-

дением дополнительной массы. В результате получаем двухмассовую колебательную систему (рис. 1). Предполагается, что в состоянии равновесия зазор между массами  $m_1$  и  $m_2$  равен нулю.

Свободные колебания модели описываются системой уравнений

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + C_1 x_1 &= 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 + C_2 x_2 &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

К ней необходимо добавить условие ударного взаимодействия колеблющихся масс, которое в случае прямого центрального удара имеет вид

$$m_1 \dot{x}_1^0 + m_2 \dot{x}_2^0 = m_1 \dot{x}_1 + m_2 \dot{x}_2, \quad (2)$$

где  $\dot{x}_1^0, \dot{x}_2^0$  — скорости масс  $m_1, m_2$  до удара,  $\dot{x}_1, \dot{x}_2$  — после удара.

Использование коэффициента восстановления при ударе

$$k = - \frac{\dot{x}_1 - \dot{x}_2}{\dot{x}_1^0 - \dot{x}_2^0}, \quad (3)$$

учитывающего упругие свойства соударяющихся масс, дает возможность варьировать характер удара

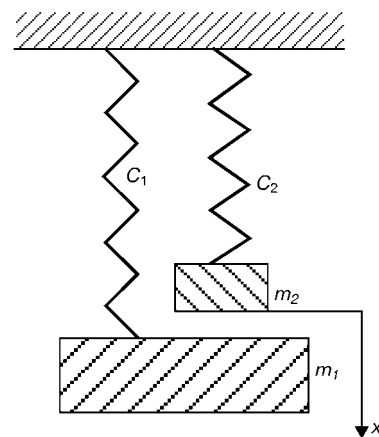


Рис. 1. Модель тела с трещиной:  $m_1, m_2$  — основная и дополнительная массы соответственно

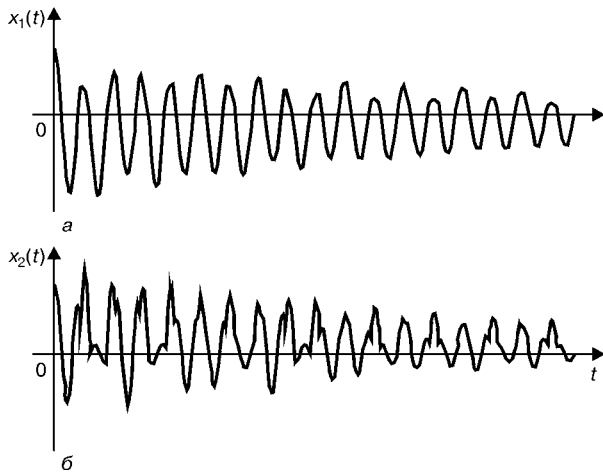


Рис. 2. График свободных колебаний основной (а) и дополнительной (б) масс

от абсолютно упругого ( $k = 1$ ) до абсолютно неупругого ( $k = 0$ ).

Из выражений (2), (3) находим скорости грузов после удара:

$$\dot{x}_1 = \frac{m_1 \dot{x}_1^0 + m_2 \dot{x}_2^0 - m_2 k (\dot{x}_1^0 - \dot{x}_2^0)}{m_1 + m_2}, \quad (4)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{m_1 \dot{x}_1^0 + m_2 \dot{x}_2^0 - m_1 k (\dot{x}_1^0 - \dot{x}_2^0)}{m_1 + m_2}. \quad (5)$$

Для решения системы (1) с учетом выражений (4), (5) для скоростей в момент удара применяем следующий подход. На первом этапе выполняем численное интегрирование системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих колебания модели, методом Рунге – Кутты. Для исследования полученного результата применяем дискретное преобразование Фурье на конечном интервале.

При численном решении задачи момент удара определялся следующим образом. Если в результате выполнения очередного шага интегрирования обнаруживаем, что  $x_2 > x_1$ , то, возвратившись к началу интегрирования, уменьшаем значение шага  $h$  до  $h_1$ , при котором  $(x_1 - x_2)/x_1 < \epsilon$ , где  $\epsilon$  – достаточно малая положительная величина. Вычислив значения скоростей грузов по формулам (4), (5), выполняем интегрирование исходной системы с шагом  $h - h_1$ .

В линейном случае, т. е. при движении единственного груза массой  $m = m_1 + m_2$ , имеют место гармонические колебания с частотой

$$\omega = \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{m_1 + m_2}} \quad (6)$$

и амплитудой, определяемой из начальных условий. При  $m_2 \neq 0$  в системе будут происходить нерегулярные соударения колеблющихся масс  $m_1$  и  $m_2$ , вследствие которых колебательный процесс примет нестационарный характер (рис. 2). Учитывая энергетические расходы при соударении берегов трещины, следует, очевидно, принять  $k < 1$ , что обеспечит постепенное затухание колебаний, обусловленное наличием в системе повреждения.

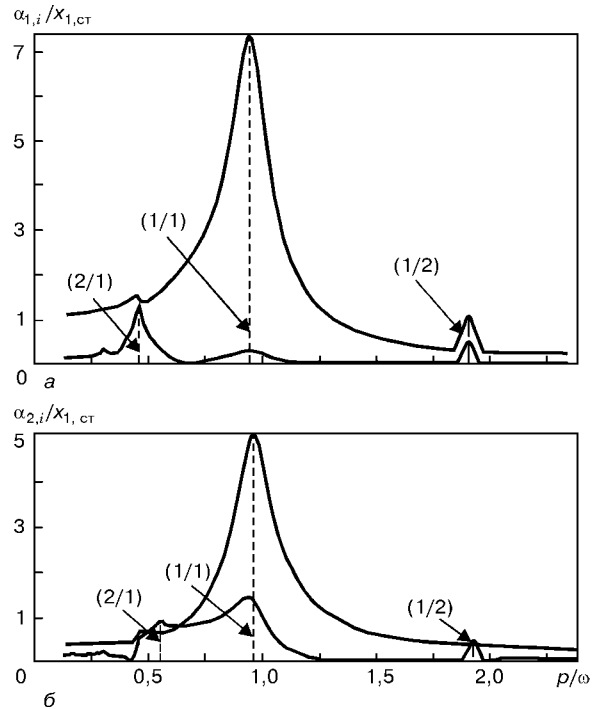


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика колебаний масс  $m_1$  (а) и  $m_2$  (б)

Из приведенного графика видно, что спектр колебаний второй массы существенно богаче по наличию высших гармоник, чем спектр первой массы. Эта особенность двухмассовой нелинейной колебательной модели повреждения может быть использована в качестве источника новых вибродиагностических критериев, которые, очевидно, не могли быть выявлены в рамках одномассовой модели.

**Вынужденные колебания.** Вынужденные колебания системы (рис. 1) под действием гармонической возбуждающей силы  $F$ , приложенной к основной массе  $m_1$ , описываются системой уравнений

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + 2h\dot{x}_1 + C_1 x_1 &= F \sin pt, \\ m_2 \ddot{x}_2 + 2h\dot{x}_2 + C_2 x_2 &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где наличие сопротивления учитывается коэффициентом демпфирования  $h$ .

При численном интегрировании системы уравнений (7) с учетом выражений (4), (5) для скоростей грузов после удара и последующем разложении полученного численного решения в ряды Фурье были получены следующие результаты.

Характер колебаний системы существенно зависит от значения коэффициента  $k$  и параметра демпфирования  $h$ . Так, при достаточно малом сопротивлении и коэффициенте восстановления, близком к единице ( $k \approx 0,8 \dots 1$ ), вынужденные колебания двухмассовой модели носят нестационарный характер. При этом так же, как и в случае свободных колебаний, спектральные характеристики массы  $m_2$  существенно выше, чем для  $m_1$ .

Далее при уменьшении коэффициента  $k$  и неизменном сопротивлении ( $h = \text{const}$ ) колебательный процесс постепенно устанавливается. Так, на

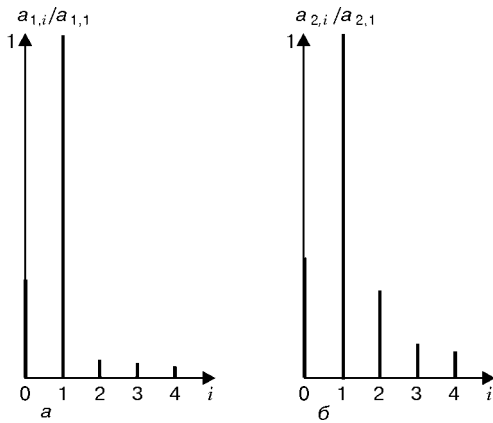


Рис. 4. Спектрограмма перемещений основной (а) и добавочной массы (б)

рис. 3 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) колебаний рассматриваемой модели для первой и второй гармоник при следующих параметрах:  $C_2/C_1 = 0,9$ ,  $m_2/m_1 = 0,35$ ,  $k = 0,3$ ,  $\delta = 0,02$  — логарифмический декремент колебаний ( $\delta = 2\pi h/\omega$ ). Значение параметра  $\delta$  выбрано исходя из того, что в соответствии с [15] для цельных стальных изделий при отсутствии каких-либо энергетических потерь, кроме сил внутреннего трения, логарифмический декремент колебаний будет  $0,01...0,02$ . Символом ( $i/j$ ) на рис. 3 обозначен порядок соответствующего резонанса, равный порядковому номеру находящейся в резонансном режиме гармонической составляющей спектра. АЧХ построены в относительных координатах  $a_{1,i}/x_{1ст}$  ( $a_{2,i}/x_{1ст}$ ) и  $p/\omega$ , где  $a_{1,i}$  ( $a_{2,i}$ ) — амплитуды  $i$ -й гармоники колебаний массы  $m_1$  ( $m_2$ ),  $i = 1, 2$ ;  $x_{1ст} = F/C_1$  — величина статического отклонения массы  $m_1$  под действием силы  $F$ ;  $\omega$  — собственная частота колебаний исходной одномассовой системы, определяется по формуле (6). На графиках рис. 3 четко видны супер- и субгармонические режимы колебаний, которые иллюстрируют нелинейные резонансные свойства системы и поэтому могут быть положены в основу диагностической процедуры контроля. При этом наблюдается (рис. 3, б) существенно большая представительность второй гармоники в спектре колебаний массы  $m_2$  по сравнению с массой  $m_1$ . На рис. 4 представлены результаты спектрального анализа резонансных ко-

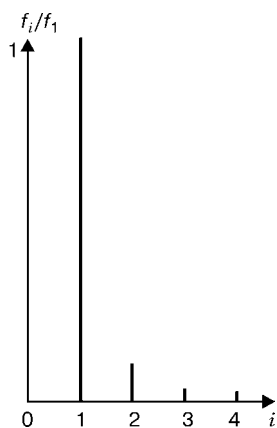


Рис. 5. Спектрограмма суммарной силы давления масс на горизонтальный подвес

лебаний ( $p = \omega$ ) системы, параметры которой приведены выше.

При увеличении параметра демпфирования  $h$  колебания рассматриваемой модели независимо от значения коэффициента  $k$  также устанавливаются. Время установления в каждом конкретном случае зависит от значения коэффициентов  $h$  и  $k$ .

На приведенных выше графиках и спектрограммах в качестве исходной использовали информацию о перемещениях элементов диагностируемой системы. Однако анализ напряжений в системе может оказаться не менее информативным. В рассматриваемой модели наиболее целесообразным в плане диагностики будет измерение суммарной силы, с которой колеблющиеся массы посредством своих пружин действуют на горизонтальную опору. В этом случае, во-первых, учитываются искажения в колебаниях обеих масс; во-вторых, исчезает двойственность при интерпретации результатов расчетов, которая в некотором смысле имела место при исследовании двухмассовой модели по перемещениям. Спектрограмма, полученная в результате гармонического анализа указанного силового воздействия, представлена на рис. 5. При этом параметры системы совпадали с использованными при построении спектрограмм рис. 4.

## ВЫВОДЫ

1. Предложена нелинейная двухмассовая модель явления акустической эмиссии, возникающей при колебаниях элементов механических конструкций с повреждениями.
2. На основе численного интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих колебания системы, с последующим разложением решения в ряды Фурье изучены свободные колебания предложенной модели и ее вынужденные колебания под действием гармонической возбуждающей силы при наличии сил сопротивления.
3. Варьирование параметров модели дает возможность описывать как стационарные, так и нестационарные режимы колебаний исследуемого объекта диагностики, т. е. проводить численные эксперименты по изучению вибраций изделий с трещинами при различных условиях.
4. Предложенная модель отражает все характерные особенности колебаний конструкций с повреждениями: уменьшение собственной частоты колебаний, наличие суб- и суперрезонансов, акустические эффекты.

Авторы выражают благодарность профессору Ройтману А. Б. за участие в обсуждении постановки задачи.

1. Бовсуновский А. П., Матаев В. В. Вибрационные характеристики усталостного повреждения стержневых элементов конструкций // Пробл. прочности. — 2002. — № 1. — С. 52–70.
2. Бурау Н. І. Аналіз моделей об'єкта діагностики з кусково-нелінійною характеристикою відновлювальної сили і методів їх аналітичного дослідження // Наук. вісті НТУУ КПІ. — 1999. — № 3. — С. 48–56.
3. Гельман Л. М., Горпинич С. В. Неразрушающий контроль трещин на основе декремента затухания свободных колеба-



- ний изделий // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1998. — № 4. — С. 20–25.
4. *Матвеев В. В.* К анализу эффективности метода спектральной вибродиагностики усталостного повреждения элементов конструкций. Сообщение 1. Продольные колебания, аналитическое решение // Пробл. прочности. — 1997. — № 6. — С. 5–20.
  5. *Ройтман А. Б., Пылов А. А., Александрова Н. Б.* Продольные колебания консольного стержня с поперечной трещиной. Сообщение 1. Малые колебания // Там же. — 1999. — № 2. — С. 23–34.
  6. *Цыфанский С. Л., Бересневич В. И., Магоне М. А.* Вибродиагностика усталостных трещин в несущих поверхностях летательных аппаратов на основе использования нелинейных эффектов // Дефектоскопия. — 1993. — № 2. — С. 87–94.
  7. *Шульженко Н. Г., Овчарова Г. Б., Билетченко В. П.* Расчет характеристик колебаний многоопорного ротора с поперечной трещиной при малых статических деформациях // Пробл. прочности. — 1996. — № 2. — С. 92–99.
  8. *Vayly P.V.* On the spectral signature of weakly bilinear oscillators // ASME J. of Vibrations and Acoustics. — 1996. — № 118. — P. 352–361.
  9. *Chondros T. G., Dimarogonas A. D., Yao J.* Vibration of a beam with a breathing crack // J. of Sound and Vibration. — 2001. — 239, № 1. — P. 57–67.
  10. *Ройтман А. Б., Шамровский А. Д.* Диагностика трещин путем анализа форм вынужденных колебаний. Новые технологические процессы и надежность ГТД // Тр. Центр. ин-та авиац. моторостроения. — 1976. — № 4. — С. 41–46.
  11. *Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов* / Ф. Я. Балицкий, М. А. Иванова, А. Г. Соколова, Е. И. Хомяков. — М.: Наука, 1984. — 119 с.
  12. *Неразрушающий контроль: В 5 кн.* — М.: Высш. школа, 1991. — Кн. 2.: Методы акустического контроля / Под ред. В. В. Сухорукова. — 287 с.
  13. *Аль-Хрейши А., Королев В. В.* Экспериментальные методы исследования стадий развития трещин // Тез. Междунар. науч.-техн. конф. — Змиев, 1994. — С. 94–95.
  14. *Ройтман А. Б.* Использование акустического сигнала для диагностики поперечной трещины в консольном образце // Акуст. журнал. — 2000. — 46. — С. 685–690.
  15. *Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.* Вибропороглощающие свойства конструкционных материалов. — Киев: Наук. думка, 1971. — 376 с.

Запорож. гос. ун-т

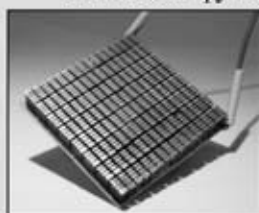
Поступила в редакцию  
20.11.2002

## ДИСТАНЦИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

В Институте физики полупроводников НАН Украины на базе тепловизионной камеры создана установка для дистанционного измерения статических и динамических картин тепловых полей в спектральном диапазоне 8–12 мкм. Установка состоит из блоков формирования и компьютерной обработки термоизображений в реальном масштабе времени, а программное обеспечение позволяет воспроизводить цветное тепловое изображение объекта с частотой 25 кадр/с. Предусмотрены функции «вычитания» изображений, измерения локальных температур и их профилей, а также построения трехмерной картины поля.

Наличие нескольких сменных объективов и ИК-микроскоп позволяют настраивать систему на различные режимы измерений макро- и микрообъектов в диапазоне температур от 20 °С до 1500 °С с пространственным разрешением < 20 мкм и временным разрешением < 20 мкс при погрешности измерений < 2%. Температурное разрешение не хуже 0,07 °С при 300 К. Предусмотрена также возможность измерения мощности тепловых потоков в режиме инфракрасного видения.

Установка функционирует в стационарном и полевом вариантах.



Приглашаем  
к сотрудничеству  
на «first-frame-free» основе.  
Тел./факс: (38 044) 265-57-97  
E-mail: malyut@isp.kiev.ua



## УВЕЛИЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОХОЖДЕНИЯ В УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИСТЕМАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ С ВОЗДУШНО-АКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗЬЮ

В. В. ГОРОДНИЧИЙ, М. А. СЕРЬГА

*Рассмотрена возможность увеличения коэффициента прозрачности системы воздух – твердое тело при УЗ контроле с воздушно-акустической связью. Представлены результаты экспериментальных исследований.*

*The paper analyses the possibility for increasing the coefficient of transparency of air- solid system in UT with an air-acoustic coupling. Results of experimental studies are given.*

В настоящее время актуальной задачей является разработка бесконтактных систем УЗ контроля [1], в частности, УЗ систем НК с воздушно-акустической связью [1]. Трудности использования последних объясняются большим ослаблением сигнала при переходе УЗ волн из воздуха в твердое тело. При контроле изделий на частотах, используемых в обычных контактных или иммерсионных дефектоскопах, уровни сигналов, принятых приемным пьезопреобразователем (ПП), существенно меньше уровня шумов приемного ПП и входного усилителя аппаратуры контроля.

Для осуществления контроля в системах НК с воздушно-акустической связью необходимо улучшить прохождение УЗ волн из воздуха в твердое тело. Этого достигают использованием согласующих слоев в ПП [2], однако одного такого приема недостаточно. Поэтому УЗ контроль с воздушно-акустической связью применяют или на низких частотах, что не позволяет обнаруживать дефекты малых размеров, или при одностороннем контакте через воздух [2].

Для улучшения акустического контакта при прохождении УЗ волн из воздуха в твердое тело можно использовать локальную воздушную ванну с повышенным давлением.

Так как УЗ волны дважды проходят через воздух: воздух – контролируемое изделие и воздух – ПП, то для оценки ослабления сигналов можно использовать коэффициент прозрачности по энергии [3]

$$D = \frac{4Z_1 Z_B}{(Z_1 + Z_B)^2}, \quad (1)$$

где  $Z_B$ ,  $Z_1$  – характеристические импедансы воздуха и твердого тела (ПП или изделия).

С учетом того, что  $Z_1 \approx (3...46) \cdot 10^6$  кг/(м·с), выражение (1) можно упростить:

$$D \approx 4Z_B / Z_1 \approx (3,7...57) \cdot 10^{-5}.$$

Такие малые коэффициенты прохождения границы раздела воздух – твердое тело и обуславливают ограниченность применения акустического контакта через воздух. Повышая давление воздуха, можно существенно увеличить характеристический импеданс воздуха, а значит, и увеличить коэффициент прохождения (прозрачности).

Известно [3], что

$$Z = \rho c, \quad (2)$$

где  $c$  – скорость распространения ультразвука в среде;  $\rho$  – плотность.

Из формулы (2) следует, что увеличить характеристический импеданс можно путем увеличения плотности среды или скорости распространения в ней УЗ волн. Скорость распространения звука в газах с учетом адиабатического характера процессов деформации можно определить по формуле Лапласа [4]

$$c = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}}, \quad (3)$$

где  $P$  – давление газа;  $\gamma$  – показатель адиабаты.

Для практических задач показатель адиабаты для конкретного газа при диапазоне температур 297...397 К можно считать постоянным, например, для воздуха  $\gamma = 1,6$  [5]. Используя выражения (2) и (3), получаем

$$Z_B = \sqrt{\gamma \rho P} \approx 1,18 \sqrt{\rho P}. \quad (4)$$

Поскольку давление функционально связано с плотностью, оценим его влияние на характеристический импеданс воздуха.

При низких и средних давлениях термодинамическое состояние газа хорошо описывается уравнением Дитеричи [4]

$$P(V_0 - b) = RT \exp [a / (RTV_0)].$$

Здесь  $V_0$  – объем одного моля газа;  $b$  – поправка на собственный объем молекул, учитывающая действие сил отталкивания,

$$b = N_A \frac{2}{3} \pi d^3;$$

$N_A$  – число Авогадро;  $d$  – средний диаметр молекулы;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура газа;

$$a = \frac{9}{8} \frac{R}{P_k} \frac{T_k^2}{V_0} \frac{1}{T},$$

$T_k$  – критическая температура, для воздуха  $T_k = 133$  К;  $P_k$  – критическое давление для данного газа.

Для не очень высоких давлений и температур ( $T$  — до 500 К,  $P$  — до 4 МПа)  $b \ll V_0$ , тогда

$$P = \frac{RT}{V_0} \exp \left( -\frac{9}{8} \frac{R}{P_k} \frac{T_k^2}{V_0 K_k} \frac{1}{T} \right)$$

Можно заметить, что степень экспоненты мала. Поэтому, разложив экспоненту в ряд Тейлора и отбросив малые высших порядков, получим

$$P = \frac{RT}{V_0} \exp \left( 1 - \frac{9}{8} \frac{R}{P_k} \frac{T_k^2}{V_0 K_k} \frac{1}{T} \right)$$

где  $K_k$  — критический коэффициент, для воздуха  $K_k \approx 3,7$ .

Переходя к произвольному объему газа  $V$  и учитывая, что  $V_0 = V \frac{M}{m}$ , после ввода постоянной величины (при постоянной температуре газа)

$$\xi = \frac{9}{8} \frac{R}{P_k K_k} \frac{T_k^2}{V_0} \frac{1}{T} \approx 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг},$$

получаем

$$P = \frac{RT}{V_0} \rho (1 - \rho \xi).$$

Решим это уравнение относительно  $\rho$ :

$$\rho_{1,2} = \frac{1}{2\xi} \pm \sqrt{\frac{1}{4\xi^2} + \frac{MP}{RT\xi}} = \frac{1}{2\xi} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4MP\xi}{RT}} \right).$$

Поскольку для не очень высоких давлений

$$\frac{4MP\xi}{RT} \ll 1,$$

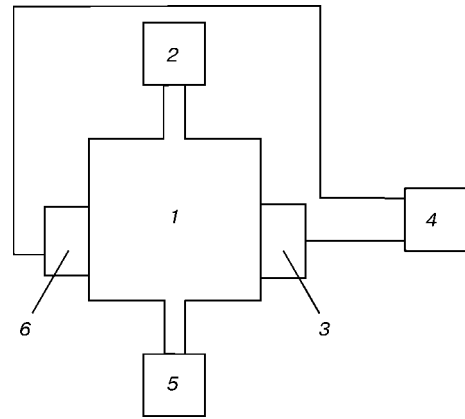
то, разлагая корень квадратный в ряд Тейлора, после преобразований имеем

$$\rho \approx P \frac{M}{RT}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4), получаем

$$Z \approx P \sqrt{\frac{\gamma M}{RT}}.$$

Таким образом, характеристический импеданс газа пропорционален давлению. Это справедливо для  $T > T_k$  и докритического давления  $P < 3,7$  МПа [5]. Следовательно, можно создать локальную ванну со сжатым воздухом, что, согласно (1), увеличивает коэффициент прозрачности для границы раздела воздух — изделие и упрощает согласование ПП с воздухом.



Блок-схема экспериментальной установки

Экспериментально была исследована зависимость коэффициента прозрачности в системе пьезоизлучатель — воздух — ПП от давления воздуха. Так как при изменении давления воздуха волновые сопротивления пьезоизлучателя и ПП не меняются, то изменение коэффициента прозрачности обусловлено только изменением волнового сопротивления воздуха. Блок-схема экспериментальной установки (рисунок) состоит из резервуара с воздухом 1, в котором с помощью компрессора 5 установлено давление  $P$ , измеряемое манометром 2. На внешней поверхности резервуара соосно размещены излучающий 6 и приемный 3 ПП таким образом, что акустическая связь между ними осуществляется только через воздух. В качестве генератора зондирующих импульсов и приемника использовался УЗ дефектоскоп УД-1ФМ 4 с цифровым автоматическим измерителем уровня принятого сигнала [6].

Проведенные исследования полностью подтвердили теоретические расчеты. При увеличении давления воздуха (для системы воздух — контролируемое изделие) в 5 раз уровень принимаемого сигнала увеличился также в 5 раз.

1. *Городничий В. В., Городничий О. В., Петренко А. Н.* Ультразвуковой контроль с воздушно-акустической связью // Системные технологии: Сб. науч. тр. — Днепропетровск: Днепропетр. металлург. акад., 2000. — Вып. 1 (9). — С. 22 — 27.
2. *Заклюковский В. И., Карцев Г. Т.* Применение пьезоэлектрических преобразователей для бесконтактного ультразвукового контроля изделий // Дефектоскопия. — 1978. — № 3. — С. 28—33.
3. *Ермолов И. Н.* Теория и практика ультразвукового контроля. — М.: Машиностроение, 1981. — 240 с.
4. *Яворский Б. М., Детлаф А. А.* Справочник по физике. — М.: Наука, 1977. — 530 с.
5. *Краткий технический справочник* / Под общей ред. В. А. Зиньковского. — Ч. 1. — М.: Гостехтеоретиздат, 1952. — 920 с.
6. *Городничий В. В., Собко В. Н., Малайчук В. П.* Ультразвуковой дефектоскоп УД-1 ФМ // Дефектоскопия. — 1987. — № 6. — С. 90—92.



## ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

І. З. ЛЮТАК, І. С. КІСІЛЬ

*Представлено схему — електричний аналог УЗ перетворювача, приведено послідовність розрахунку електроакустичного тракту на основі даної схеми. Розроблено креслення ультразвукового первинного перетворювача*

*The paper presents a circuit as an electric analog of a primary transducer, and gives the sequence of calculation of the electroacoustic conduit on the basis of this circuit. A drawing of US primary transducer has been developed.*

Основним елементом засобів УЗ контролю при дослідженні фізико-механічних характеристик матеріалів УЗ методом п'єзoeлектричний перетворювач (ПЕП). Необхідні параметри вторинних приладів визначаються параметрами перетворювача.

При дослідженні ПЕП вхідними даними є механічні, електромеханічні і електричні параметри використаних матеріалів при заданих умовах застосування перетворювача. Необхідно також знати умови роботи і зміну характеристик матеріалів при експлуатації ПЕП. В багатьох випадках потрібно проводити корегування параметрів вторинних приладів в процесі експлуатації системи контролю у відповідності до зміни характеристик перетворювача. Тому постає необхідність у дослідженні режиму роботи ПЕП.

Застосування відомої теорії роботи ПЕП при збудженні його неперервним імпульсом вимагає корегування окремих його параметрів при дослідженні роботи в імпульсному режимі, зокрема це відноситься до амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) [1].

Існує ряд підходів до визначення АЧХ ПЕП. Найбільш поширений метод хвильових рівнянь, вирішення яких складає певні труднощі [2]. Більш раціональним є використання методу, за допомогою якого описується поширення пружних акустичних хвиль з використанням еквівалентних схем перетворювача, зокрема, схеми електричних аналогів ПЕП. Перевага даного методу полягає в тому, що розв'язок хвильових рівнянь з заданими граничними умовами замінюють еквівалентною електричною схемою, далі аналізуючи її роботу з використанням добре розробленої теорії електротехніки.

Для розрахунку АЧХ ПЕП в режимі приймання використовуємо електричну схему-аналог в вигляді шестиполісника із зосередженими постійними, на одній парі затискачів якого реєструються в режимі приймання та задаються в режимі випромінювання електричні величини, а на другій парі — механічні [3].

При роботі ПЕП на одностороннє навантаження (наприклад, при закріпленні його на досліджуваній метал) зусилля на вільній його поверхні відсутнє, тому розрахунок електричної схеми-аналога при холостому ході буде описувати режим випромінювання ПЕП, а розрахунок короткого замикання схеми-аналога — режим приймання.

Приймаємо, що ПЕП в режимі випромінювання збуджується коротким імпульсом відомої амплітуди  $U_{\text{вип}}$  (рис. 1), а в режимі приймання відомий сигнал на його вході  $F_0$ . Для математичного опису зондуємого імпульсу скористаємось рядом Фур'є [6]

$$U_{\text{вип}}(t) = B_0 + \sum_{k=1}^n B_k \cos kt + \sum_{k=1}^n A_k \sin kt, \quad (1)$$

де

$$B_0 = \frac{1}{n+1} \sum_{k=1}^n U_{\text{вип}} k; \quad B_k = \frac{2}{n+1} \sum_{k=1}^n U_k \cos kt;$$

$$A_k = \frac{2}{n+1} \sum_{k=1}^n U_k \sin kt;$$

$U_{\text{вип}}(t)$  — функція зондуємого імпульсу;  $n$  — число рівних відрізків, на які поділено тривалість імпульсу.

Отримана нами апроксимаційна формула (рис. 1) має вигляд:

$$U(t) = 0,5 - 0,4 \cos t + 0,098 \sin t + 0,066 \cos 2t + 0,062 \sin 2t - 0,042 \cos 3t - 0,044 \sin 3t. \quad (2)$$

Оскільки ми використовуємо резонансний п'єзоперетворювач, то, розкладаючи в ряд Фур'є зондуєчий імпульс, можемо з достатньою точністю замінити його для розрахунку ПЕП на один півперіод однієї гармоніки. Електричні сигнали на вході ПЕП характеризуються напругою  $U$  та силою струму  $I$ , акустичні — силою  $F$  та коливальною швидкістю  $V$ . Робота ПЕП повністю описується законом Кірхгофа, якщо прийняти, що аналогами є, згідно першої системи електромеханічних аналогів  $F \rightarrow U$ ,  $V \rightarrow I$ , а механічний імпеданс  $Z$

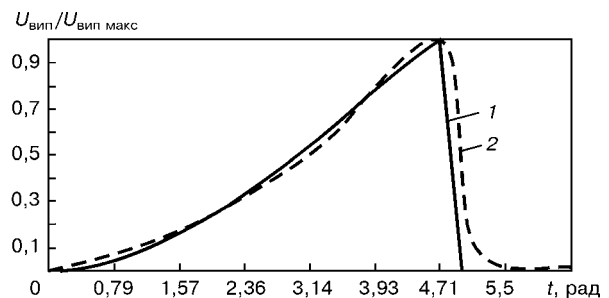


Рис. 1. Зондуєчий імпульс: 1 — ідеальний, 2 — апроксимований

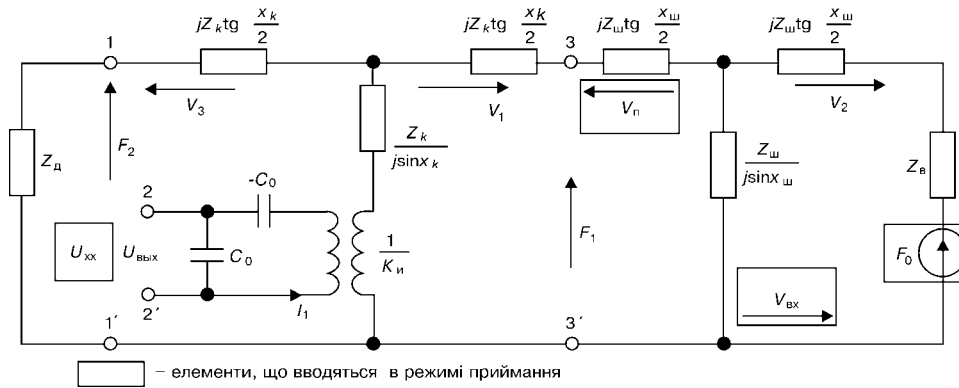


Рис. 2. Схема-аналог первинного перетворювача в режимі випромінювання та в режимі приймання:  $x(k) = (\omega/c_k)l_k$ ,  $x_{ш} = (\omega/c_{ш})l_{ш}$  — хвильові аргументи;  $c_k, c_{ш}$  — швидкість ультразвуку в п'єзотеріалі та узгоджувальному шарі;  $l_{ш}$  — товщина узгоджувального шару;  $U_{внп}$  — напруга збуджуючого імпульсу;  $U_{xx}$  — напруга холостого ходу;  $f_0 = PS$  — джерело електрорушійної сили;  $P$  — акустичний тиск відбитої УЗ хвилі на границі поверхні досліджуваного об'єкта — узгоджувальний шар;  $F_1, F_2$  — електрорушійні сили на вході та виході п'єзоперетворювача

відповідає електричному  $Z$  [2]. Схема-аналог (рис. 2), має такі електричні параметри [4]:

$$K_u = \frac{e_{11}S}{l_k}, \quad Z_B = z_B S, \quad Z_k = z_k S, \quad (3)$$

$$Z_{ш} = z_{ш} S, \quad Z_d = z_d S, \quad C_0 = \frac{\epsilon_{11}^u S}{l_k},$$

де  $z_k, z_d, z_{ш}$  — імпеданси відповідно п'єзоелементу, демпфера та узгоджувального шару;  $S$  — площа поверхні п'єзопластини;  $z_B$  — вхідний імпеданс (матеріалу об'єкта контролю);  $K_u$  — коефіцієнт електромеханічної трансформації;  $e_{11}$  — п'єзопостійна;  $\epsilon_{11}^u$  — діелектрична проникність п'єзотеріалу;  $l_k$  — товщина п'єзопластини.

Приведена схема-аналог містить електромеханічний трансформатор, який відображає зв'язок між механічною силою і електричною напругою п'єзоперетворювача. Коливальні швидкості  $V_1, V_3$  та сили  $F_1, F_2$  відповідають наявності у п'єзоперетворювача двох акустично активних поверхонь.

Розглянемо режим випромінювання ПЕП.

Визначимо вхідний імпеданс шару, який навантажений на зовнішнє середовище (епоксидна смола) з метою визначення коливальної швидкості на виході випромінювача. Для цього імпеданс виразимо через вторинні коефіцієнти:

$$Z_{вх} = Z_{ш} \frac{Z_B \cos x_{ш} + jZ_{ш} \sin x_{ш}}{Z_{ш} Z_B \cos x_{ш} + jZ_B \sin x_{ш}}. \quad (4)$$

Коефіцієнт передачі узгоджувального шару по коливальній швидкості в режимі короткого замикання (затискачі 3-3' замкнуті) буде [6]:

$$K_V = \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\cos x_{ш} + j \frac{Z_B}{Z_{ш}} \sin x_{ш}}, \quad (5)$$

а  $Z_B$  і  $K_V$  можна визначити за допомогою схеми-аналога.

Коливальну швидкість  $V_1$  для п'єзопластини, що навантажена демпфером та  $Z_{вх}$ , визначимо за допомогою методу контурних струмів. Для спрощення розрахунків приведемо еквівалентну схему

контура (рис. 3, а), що містить трансформатор (рис. 3, б) [4].

Запишемо вирази для електричних параметрів  $Z_1$  та  $Z_2$ :

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_0} \left( 1 - \frac{1}{K_u} \right), \quad Z_2 = \frac{K_u}{j\omega C_0}, \quad (6)$$

$$V_1 = - \frac{(Z_d + jZ_k \operatorname{tg} \frac{x_k}{2}) Z_2 U_{внп} \sin x_k}{(Z_{вх} + jZ_k \operatorname{tg} \frac{x_k}{2} + Z_d) (Z_1 + Z_2) [(\cos x_k - Z_d \sin x_k + Z_2 \sin x_k) - Z_2^2]}, \quad (7)$$

$$F_1 = V_1 Z_{вх}. \quad (8)$$

Коливальна швидкість  $V_2$  на виході п'єзопластини, враховуючи формули (5) і (8), буде

$$V_2 = - \frac{1}{Z_{вх}} F_1 K_V. \quad (9)$$

Розглянемо режим приймання акустичних хвиль, основним параметром якого є напруга холостого ходу  $U_{xx}$ . В режимі приймання ми вносимо в схему-аналог (рис. 2) джерело електрорушійної сили  $F_0$ , що виникає в результаті прийняття ПЕП відбитої акустичної хвилі. Для цього визначимо вхідний механічний опір  $Z_{вм}$  п'єзопластини, навантаженої на демпфер, що гасить коливання з однієї сторони, та вхідний механічний опір  $Z_{внп}$  узгоджувального шару, на який навантажена п'єзопластина:

$$Z_{вм} = Z_k \frac{Z_d \cos k_{ш} + jZ_k \sin k_{ш}}{Z_k \cos x_k + jZ_d \sin x_k}, \quad (10)$$

$$Z_{внп} = Z_{ш} \frac{Z_{вм} \cos k_{ш} + jZ_{ш} \sin k_{ш}}{Z_{ш} \cos x_{ш} + jZ_{вм} \sin x_{ш}}.$$

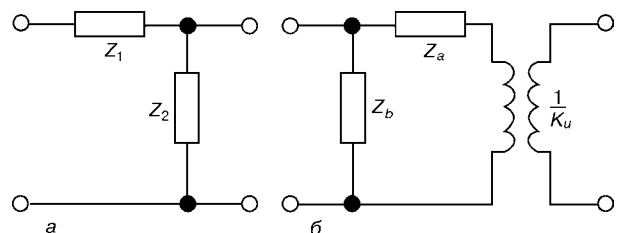


Рис. 3. Еквівалентна схема електричної частини п'єзоелемента

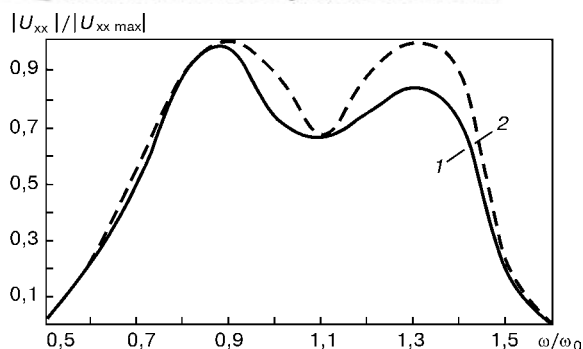


Рис. 4. АЧХ тракту первинного перетворювача: 1, 2 – отримана та ідеальна залежності відповідно

Використовуючи метод контурних струмів, визначаємо коливальні швидкості на вході приймача  $V_{вх}$  та п'єзопластини  $V_{п}$ :

$$V_{вх} = \frac{F_0}{Z_B + Z_{вн}}, \quad V_{п} = \frac{V_{вх}}{\cos x_{ш} + j(Z_{вм}/Z_{ш}) \sin x_{ш}}. \quad (11)$$

На основі цієї формули та закону Кірхгофа розрахуємо струм  $I_1$ :

$$I_1 = \frac{F_0 Z_k}{\cos x_k + jZ_d \sin x_k} \times \frac{1}{\cos x_{ш} + j\frac{Z_{вм}}{Z_{ш}} \sin x_{ш}} \frac{1}{K_u} \frac{1}{Z_B + Z_{вн}}. \quad (12)$$

Визначимо  $U_{xx}$  через параметри реактивних опорів:

$$U_{xx} = I_1 \frac{1}{j\omega C_0} = I_1 \left( -\frac{1}{j\omega C_0} + j\omega L - j\omega L^* \right). \quad (13)$$

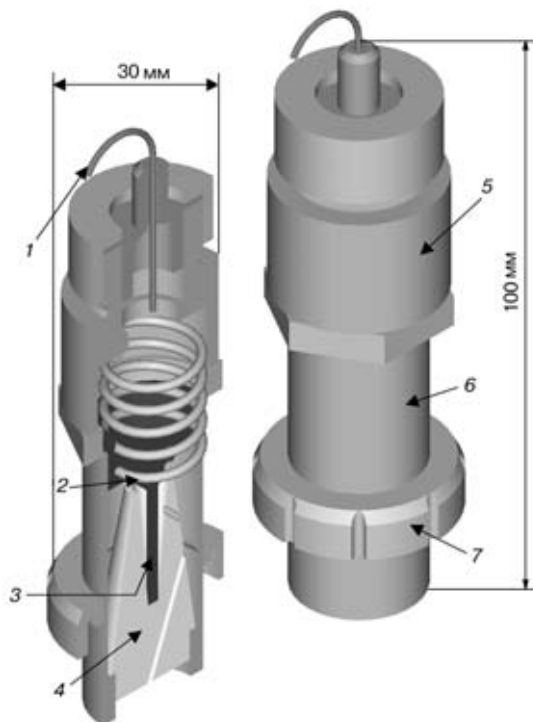


Рис. 5. Конструкція УЗ первинного перетворювача: 1 – з'єднувальний кабель; 2 – пружина; 3 – шток; 4 – демфер; 5 – обойма; 6 – стакан; 7 – гайка

де  $L$  – індуктивність первинної обмотки трансформатора;  $L^*$  – взаємодуктивність.

За допомогою методу контурних струмів розраховуємо струм  $V_3$ , який чисельно рівний коливальній швидкості другої активної поверхні п'єзоперетворювача, та напругу  $F_2$  на затискачах 1-1' як функцію струму  $V_3$  та імпедансу  $Z_d$ :

$$V_3 = \frac{F_0}{\cos x_{ш} + j\frac{Z_{вм}}{Z_{ш}} \sin x_{ш}} \frac{1}{Z_B + Z_{вн}} \left( \frac{Z_k}{K_u (\cos x_k + jZ_d \sin x_k)} + 1 \right), \quad (14)$$

$$F_2 = V_3 L_d.$$

В результаті розрахунку електричної схеми-аналога ми отримали в режимі випромінювання співвідношення між напругою збуджуючого імпульсу та силою  $F_1$  на виході п'єзопластини, коливальною швидкістю на поверхні досліджуваного об'єкта. В режимі приймання отримали залежності між напругою луно-сигналу, силою відбитої акустичної хвилі  $F_0$ , коливальною швидкістю та акустичною силою на другій поверхні п'єзопластини.

Отже, результати в режимах випромінювання та приймання різні: при випромінюванні акустичний тиск пропорційний збуджуючій електричній напрузі, а при прийманні сила вхідного електричного струму пропорційна акустичному тиску, що діє на ПЕП.

Фізична інтерпретація полягає в наступному: акустична хвиля, що збуджується на поверхні п'єзопластини, послаблюється при проходженні через ПЕП, в матеріалі досліджуваного об'єкта, в результаті розсіювання через відбиття від донної поверхні об'єкта, а також при перетворенні акустичного сигналу в електричний.

Всі ці чинники враховуються одним із важливих параметрів роботи приймача – його чутливістю по тиску в режимі холостого ходу  $\gamma_{xx}$ , що дорівнює відношенню зміни напруги на п'єзопластині до зміни вхідного сигналу, а саме:

$$\gamma_{xx} = \frac{U_{xx}}{P} = \frac{I_1}{j\omega C_0} \frac{S}{F_0}. \quad (15)$$

Тиск на вході в ПЕП можна визначити так [5]:

$$P = \rho_B \frac{d\phi_B}{dt}, \quad (16)$$

де  $\rho_B$  – густина матеріалу досліджуваного об'єкта;  $\phi_B$  – потенціал вхідного контура.

Враховуючи, що потенціал  $\phi_B$  пропорційний об'ємній швидкості  $(V_2 S)_{z_B}$ , а також (16), отримуємо формулу для тиску на вході в приймач:

$$P \sim j\omega \rho_B V_2 S z_B = -\frac{j\omega \rho_B S z_B}{Z_{вх}} F_1 K_v. \quad (17)$$

Напругу холостого ходу  $U_{xx}$  виразимо через тиск  $P$  та чутливість приймача  $\gamma_{xx}$ :

$$U_{xx} = P \gamma_{xx} \sim -\frac{j\omega \rho_B S z_B}{Z_{вх}} F_1 K_v \frac{I_1}{j\omega C_0} \frac{S}{F_0}. \quad (18)$$



Побудуємо графік АЧХ акустичного тракту первинного перетворювача, в якого  $z_n = 7 \cdot 10^6$  Па·с/м,  $z_{ш} = 11 \cdot 10^6$  Па·с/м,  $S = 1,2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>,  $l_k = 0,5$  мм,  $l_{ш} = 10$  мм (рис. 4). Як чутливий елемент використовуємо кварц Y-зрізу квадратної форми з геометричними розмірами 10×10 мм. На осі ОУ буде нормоване значення напруги холостого ходу  $U_{xx}$ , а на осі ОХ — відношення частот  $\omega$  резонансної частоти чутливого елемента  $\omega_0$ , яка дорівнює 5 МГц.

Отримана послідовність розрахунку дозволяє значно спростити процес проектування УЗ первинного перетворювача, а також підібрати відповідні матеріали демпфера, п'єзопластини та узгоджувального шару в відповідності до вхідного характеристичного імпедансу контрольованого типу матеріалу.

Запропонована конструкція ПЕП з врахуванням досліджених характеристик зображена на рис. 5. Даний перетворювач використовується для дослідження фізико-механічних характеристик трубних сталей (сталей для труб малого діаметра).

1. Домаркас В. Й. Пилецкас Э. Л. Ультразвуковая эхоскопия. — Л.: Машиностроение, 1972.
2. Ермолов И. Н. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля. — М.: Машиностроение, 1986. — 280 с.
3. Хасаяка Т. Электроакустика. — М.: Мир, 1982. — 216 с.
4. Физическая акустика. Т. 1. Ч. А. Методы и приборы ультразвуковых исследований. — М.: Мир, 1966. — 592 с.
5. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. — М.: Машиностроение, 1981. — 240 с.
6. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. — М.: Высшая школа, 1978. — 522 с.

*Основным элементом средств УЗ контроля при исследовании физико-механических характеристик материалов УЗ методом является пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП). От его характеристик зависят необходимые параметры вторичных приборов.*

*При исследовании ПЭП входными данными являются электромеханические и электрические параметры используемых материалов при известных условиях эксплуатации датчика. Необходимо также знать условия работы и изменение характеристик материалов в процессе эксплуатации ПЭП. В большинстве случаев нужно проводить дополнительные исследования с целью корректирования параметров вторичных приборов в процессе эксплуатации системы контроля в соответствии со сменой характеристик преобразователя. Поэтому возникает необходимость в исследовании режима работы ПЭП.*

*Использование известной теории работы ПЭП при возбуждении его непрерывным импульсом заставляет корректировать отдельные параметры преобразователя при исследовании работы в импульсном режиме, в частности, это относится к АЧХ.*

*При расчете параметров работы ПЭП использован метод электромеханических аналогий. Для расчета АЧХ преобразователя в режиме приема применена схема-аналог в виде шестиполосника, на одной паре выключателей которого регистрируются в режиме приема и задаются в режиме излучения электрические величины, а на другой — механические.*

*При работе ПЭП на одностороннюю нагрузку усилие на его свободной поверхности отсутствует, поэтому расчет электрической схемы-аналога при холостом ходе будет описывать режим излучения, а расчет короткого замыкания схемы-аналога — режим приема.*

*Принимаем, что ПЭП в режиме излучения возбуждается коротким импульсом известной формы и амплитуды  $U_{изл}$  (рис. 1), а в режиме приема известен сигнал на его входе  $F_0$ . Для математического описания зондирующего импульса используем ряд Фурье в виде (1).*

*Полученная зависимость аппроксимированного зондирующего импульса представлена выражением (2). Электрические сигналы на входе ПЭП характеризуются напряжением  $U$  и силой тока  $I$ , акустические — силой  $F$  и колебательной скоростью  $V$ . Работа ПЭП описывается законом Кирхгофа, если принять, что аналогами являются, согласно первой системе электромеханических аналогов,  $F \rightarrow U$ ,  $V \rightarrow I$ , а механический импеданс  $z$  соответствует электрическому  $Z$ . Схема-аналог изображена на рис. 2.*

*Для упрощения расчетов на рис. 3 приведена эквивалентная схема электрической части преобразователя и формулы пересчета электрических величин (6).*

*В режиме излучения определяем неизвестные величины: колебательные скорости  $V_1$  и  $V_2$ , а также силу  $F_1$  на выходе преобразователя с помощью законов Кирхгофа.*

*В режиме приема находим ток  $I_1$ , колебательную скорость  $V_3$ , силу  $F_2$ , а также напряжение холостого хода как функцию тока  $I_1$ .*

*Таким образом, мы получили различные результаты в режимах излучения и приёма: при излучении акустическое давление пропорционально возбуждающему электрическому напряжению, а при приёме сила входного электрического тока пропорциональна действующему на ПЭП акустическому давлению. Физическая интерпретация сказанного выше состоит в том, что акустическая волна, возбуждающаяся на поверхности пьезопластины, затухает в результате прохождения через промежуточные среды ПЭП, материал исследуемого объекта, рассеивания от донной поверхности объекта, а также при превращении акустического сигнала в электрический. Эти факторы учтены в таком параметре ПЭП, как чувствительность по давлению в режиме холостого хода  $\gamma_{xx}$ .*

*Выражая напряжение холостого хода через давление на входе ПЭП и чувствительность  $\gamma_{xx}$ , получаем зависимость для расчета АЧХ акустического тракта, на основании которой построен график АЧХ акустического тракта разработанного ПЭП (рис. 4).*

*На рис. 5 представлена конструкция разработанного акустического преобразователя.*



## ВЕКТОРНОЕ ПОЛИНОМИНАЛЬНОЕ КАНОНИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА

И. П. АТАМАНЮК

*Получено векторное полиномиальное каноническое разложение случайного процесса, которое не накладывает никаких существенных ограничений на класс исследуемых процессов.*

*A vector polynomial canonic expansion of a random process has been derived, which does not impose any significant limitations on the class of the studied processes*

Каноническое разложение случайного процесса является универсальным инструментом для решения многих прикладных задач управления [1], таких, как моделирование функционирования объекта контроля, диагностика состояния, фильтрация и экстраполяция параметров объекта управления и т. д. Такое разложение для некоторого случайного процесса  $X(t)$ , заданного дискретизованными моментными функциями  $M[X(i)]$ ,  $M[X(i)X(j)]$ ,  $i, j = 1, \bar{I}$ , в исследуемом ряде точек  $t_i$ ,  $i = 1, \bar{I}$ , имеет вид [1, 2]:

$$X(i) = M[X(i)] + \sum_{v=1}^i V_v \varphi_v(i), \quad i = 1, \bar{I}, \quad (1)$$

где  $V_v$ ,  $v = 1, \bar{I}$  — случайный коэффициент,  $M[V_v] = 0$ ,  $M[V_v V_\mu] = 0$ ,  $v \neq \mu$ ;  $M[V_v^2] = D_v$ ;  $\varphi_v(i)$ ,  $v, i = 1, \bar{I}$  — неслучайная координатная функция,  $\varphi_v(v) = 1$ ,  $\varphi_v(i) = 0$  при  $v > i$ .

Элементы канонического разложения определяются следующими рекуррентными соотношениями:

$$V_i = X(i) - M[X(i)] - \sum_{v=1}^{i-1} V_v \varphi_v(i), \quad i = 1, \bar{I}, \quad (2)$$

$$D_i = M[X^2(i)] - \{M[X(i)]\}^2 - \sum_{v=1}^{i-1} D_v \varphi_v^2(i), \quad i = 1, \bar{I}, \quad (3)$$

$$\varphi_v(i) = \frac{1}{D_v} \{M[X(v)X(i)] - M[X(v)]M[X(i)] - \sum_{j=1}^{v-1} D_j \varphi_j(v) \varphi_j(i)\}, \quad v = 1, \bar{I}, \quad i = \bar{v}, \bar{I}. \quad (4)$$

Разложение (1) точно представляет случайный процесс  $X(t)$  в точках дискретизации и обеспечивает в рамках линейных связей минимум среднего квадрата ошибки приближения.

Если  $X(t)$  обладает полиномиальными вероятностными связями:  $M[X^v(i)X^\mu(j)]$ ,  $i, j = 1, \bar{I}$ ,  $v, \mu = 1, \bar{N}-1$ ,  $v + \mu \leq N$ , то каноническое представление процесса [3] записывается как

$$X(i) = M[X(i)] + \sum_{v=1}^i \sum_{\lambda=1}^{N-1} W_v^{(\lambda)} \beta_{1v}^{(\lambda)}(i), \quad i = 1, \bar{I}, \quad (5)$$

где

$$W_v^{(\lambda)} = X^\lambda(v) - M[X^\lambda(v)] - \sum_{\mu=1}^{v-1} \sum_{j=1}^{\lambda-1} W_\mu^{(j)} \beta_{\lambda\mu}^{(j)}(v) - \sum_{j=1}^{\lambda-1} W_j^{(\lambda)} \beta_{\lambda j}^{(\lambda)}(v), \quad v = 1, \bar{I}; \quad (6)$$

$$D_\lambda(v) = M[\{W_v^{(\lambda)}\}^2] = M[X^{2\lambda}(v)] - M^2[X^\lambda(v)] - \sum_{\mu=1}^{v-1} \sum_{j=1}^{\lambda-1} D_j(\mu) \{\beta_{\lambda\mu}^{(j)}(v)\}^2 - \sum_{j=1}^{\lambda-1} D_j(v) \{\beta_{\lambda j}^{(\lambda)}(v)\}^2, \quad v = 1, \bar{I}; \quad (7)$$

$$\beta_{hv}^{(\lambda)}(i) = \frac{M[W_v^{(\lambda)}(X^h(i) - M[X^h(i)])]}{M[\{W_v^{(\lambda)}\}^2]} = \frac{1}{D_\lambda(v)} (M[X^\lambda(v)X^h(i)] - M[X^\lambda(v)]M[X^h(i)] - \sum_{\mu=1}^{v-1} \sum_{j=1}^{\lambda-1} D_j(\mu) \beta_{\lambda\mu}^{(j)}(v) \beta_{h\mu}^{(j)}(i) - \sum_{j=1}^{\lambda-1} D_j(v) \beta_{\lambda v}^{(j)}(v) \beta_{hv}^{(j)}(i)), \quad \lambda = 1, \bar{h}, \quad v = 1, \bar{i}. \quad (8)$$

Координатные функции  $\beta_{hv}^{(\lambda)}(i)$ ,  $h, \lambda = 1, \bar{H}$ ,  $v, i = 1, \bar{I}$ , обладают следующим свойством:

$$\beta_{hv}^{(\lambda)} = \begin{cases} 1, & h = \lambda \text{ и } v = i; \\ 0, & i < v. \end{cases} \quad (9)$$

Предположим, что исследуемый процесс обладает указанными выше нелинейными связями и включает  $H$  зависимых скалярных составляющих:

$$X(t) = \{X_1(t), \dots, X_h(t), \dots, X_H(t)\}, \\ M[X_i^v(j) X_h^\mu(j)], \quad i, j = 1, \bar{T}; \quad h = 1, \bar{H},$$





$$v, \mu = \overline{1, N-1}, v, v + \mu \leq N.$$

Применение выражения (5) к каждой составляющей  $X_h(t), h = \overline{1, H}$ , не дает исчерпывающего представления процесса  $X(t)$ , так как в данном случае не учитываются взаимные связи между составляющими. Классическое линейное разложение для векторных процессов [1, 2] ограничивает объем используемой априорной информации авто- и взаимокорреляционными функциями составляющих:

$$X_h(i) = M[X_h(i)] + \sum_{v=1}^i \sum_{\lambda=1}^H V_v^{(\lambda)} \Phi_{hv}^{(j)}(i), \quad i = \overline{1, T}, \quad (10)$$

$$\text{где } V_v^{(\lambda)} = X_\lambda(v) - M[X_\lambda(v)] - \sum_{\mu=1}^{v-1} \sum_{j=1}^H V_\mu^{(j)} \Phi_{\lambda v}^{(j)}(v) - \sum_{\mu=1}^{\lambda-1} V_\mu^{(j)} \Phi_{\lambda v}^{(j)}(v), \quad v = \overline{1, T}; \quad (11)$$

$$D_\lambda(v) = M\left\{V_v^{(\lambda)}\right\}^2 = M\left\{X_\lambda(v)\right\}^2 - M^2[X_\lambda(v)] - \sum_{\mu=1}^{v-1} \sum_{j=1}^H D_{j\mu} \left\{\Phi_{\lambda\mu}^{(j)}\right\}^2 - \sum_{j=1}^{\lambda-1} D_j(v) \left\{\Phi_{\lambda\mu}^{(j)}\right\}^2, \quad v = \overline{1, T}; \quad (12)$$

$$\Phi_{hv}^{(\lambda)}(i) = \frac{M[V_v^{(\lambda)}(X_h(i) - M[X_h(i)])]}{M\left\{V_v^{(\lambda)}\right\}^2} = \frac{1}{D_\lambda(v)} (M[X_\lambda(v)X_h(i)] - M[X_\lambda(v)] M[X_h(i)]) - \sum_{\mu=1}^{v-1} \sum_{j=1}^H D_{j\mu} \Phi_{\lambda\mu}^{(j)}(v) \Phi_{h\mu}^{(j)}(i) - \sum_{j=1}^{\lambda-1} D_j(v) \Phi_{\lambda v}^{(j)}(v) \Phi_{hv}^{(j)}(i), \quad \lambda = \overline{1, H}, v = \overline{1, T}. \quad (13)$$

В этой связи естественно возникает задача получения разложения, сочетающего в себе достоинства представления (5) (исчерпывающее описание каждой составляющей) и выражения (10) (учет взаимного влияния составляющих, но уже с использованием моментных функций порядка  $\geq 2$ ).

Для получения такого разложения введем в рассмотрение массив случайных величин

$$\begin{pmatrix} X_1(1) & X_1(2) & \dots & X_1(I-1) & X_1(I) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_1^{N-1}(1) & X_1^{N-1}(2) & \dots & X_1^{N-1}(I-1) & X_1^{N-1}(I) \\ X_2(1) & X_2(2) & \dots & X_2(I-1) & X_2(I) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_2^{N-1}(1) & X_2^{N-1}(2) & \dots & X_2^{N-1}(I-1) & X_2^{N-1}(I) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_H(1) & X_H(2) & \dots & X_H(I-1) & X_H(I) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_H^{N-1}(1) & X_H^{N-1}(2) & \dots & X_H^{N-1}(I-1) & X_H^{N-1}(I) \end{pmatrix} \quad (14)$$

Корреляционные моменты элементов массива (14) полностью описывают вероятностные связи процесса  $\bar{X}(t)$  в исследуемом ряде точек  $t_i, i = \overline{1, T}$ , поэтому применение векторного линейного канонического разложения (10) к строкам  $X_h(i), i = \overline{1, T}, h = \overline{1, H}$ , позволяет получить каноническое разложение с полным учетом априорной информации:

$$X_h(i) = M[X_h(i)] + \sum_{v=1}^{i-1} \sum_{l=1}^{H-1} \sum_{\lambda=1}^{N-1} W_{vl}^{(\lambda)} \beta_{l\lambda}^{(h,1)}(v, i), \quad i = \overline{1, T}, \quad (15)$$

$$W_{vl}^{(\lambda)} = X_l^{(\lambda)}(v) - M[X_l^{(\lambda)}] - \sum_{\mu=1}^{v-1} \sum_{m=1}^H \sum_{j=1}^{N-1} W_{\mu m}^{(j)} \beta_{mj}^{(l, \lambda)}(\mu, v) - \sum_{m=1}^{l-1} \sum_{j=1}^{N-1} W_{vm}^{(j)} \beta_{mj}^{(l, \lambda)}(v, v) - \sum_{j=1}^{\lambda-1} W_{vl}^{(j)} \beta_{lj}^{(l, \lambda)}(v, v), \quad v = \overline{1, T}; \quad (16)$$

$$D_{l, \lambda}(v) = M\left\{W_{vl}^{(\lambda)}\right\}^2 = M[X_l^{2\lambda}(v)] - M^2[X_l^{(\lambda)}(v)] - \sum_{\mu=1}^{v-1} \sum_{m=1}^H \sum_{j=1}^{N-1} D_{mj}(v) \left\{\beta_{mj}^{(l, \lambda)}(\mu, v)\right\}^2 - \sum_{m=1}^{l-1} \sum_{j=1}^{N-1} D_{mj}(v) \left\{\beta_{mj}^{(l, \lambda)}(v, v)\right\}^2 - \sum_{j=1}^{\lambda-1} D_{lj}(v) \left\{\beta_{lj}^{(l, \lambda)}(v, v)\right\}^2, \quad v = \overline{1, T}; \quad (17)$$

$$\beta_{l\lambda}^{(h, s)}(v, i) = \frac{M[W_{vl}^{(\lambda)}(X_h^s(i) - M[X_h^s(i)])]}{M\left\{W_{vl}^{(\lambda)}\right\}^2} =$$

$$= \frac{1}{D_{l\lambda}(v)} (M[X_l^{(\lambda)}(v)X_h^s(i)] - M[X_l^{(\lambda)}(v)] M[X_h^s(i)]) - \sum_{\mu=1}^{v-1} \sum_{m=1}^H \sum_{j=1}^{N-1} D_{mj}(\mu) \beta_{mj}^{(l, \lambda)}(\mu, v) \beta_{mj}^{(h, s)}(\mu, i) - \sum_{m=1}^{l-1} \sum_{j=1}^{N-1} D_{mj}(v) \beta_{mj}^{(l, \lambda)}(v, v) \beta_{mj}^{(h, s)}(v, i) -$$



$$\begin{aligned}
 & \lambda - 1 \\
 & - \sum_{j=1}^{\lambda-1} D_{ij}(v) \beta_{ij}^{(l, \lambda)}(v, v) \beta_{ij}^{(h, s)}(v, i), \lambda = \overline{1, h}, v = \overline{1, i}. \\
 & \lambda = \overline{1, h}, v = \overline{1, i}.
 \end{aligned}$$

Случайный процесс  $\bar{X}(t)$  представлен с помощью  $H \times (N - 1)$  массивов  $\{W_l^{(\lambda)}\}$ ,  $\lambda = \overline{1, N-1}$ ,  $l = \overline{1, H}$ , некоррелированных центрированных случайных коэффициентов  $W_{vl}^{(\lambda)}$ ,  $v = \overline{1, I}$ . Каждый из этих коэффициентов содержит информацию о соответствующих значениях  $X_l^{(\lambda)}(v)$ , а координатные функции  $\beta_{il}^{(h, s)}(v, i)$  описывают вероятностные связи по-

рядка  $\lambda + s$  между составляющими  $X_l(t)$  и  $X_h(t)$  в моменты времени  $t_v$  и  $t_i$ .

Разложение (15) не накладывает никаких существенных ограничений на класс исследуемых случайных процессов (линейность, марковость, стационарность, монотонность и т. д.) и, учитывая рекуррентный характер определения его элементов, достаточно простое в вычислительном отношении.

1. Кудрицкий В. Д. Прогнозирование надежности радиоэлектронных устройств. — Киев: Техника, 1982. — 168 с.
2. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение. — М.: Физматгиз, 1962. — 720 с.
3. Атаманюк І. П. Поліноміальний канонічний розклад скалярного випадкового процесу зміни параметрів радіоелектронних пристроїв // Вісн. ЖІТІ. Техн. науки. — 2000. — № 13. — С. 99-101.

Ин-т предпринимательства и соврем. технологий,  
Житомир

Поступила в редакцию  
22.05.2002



**МЕЖДУНАРОДНАЯ  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ  
ВЫСТАВКА**

**2003**  
**9 - 11 апреля**  
РОССИЯ, МОСКВА,  
ЦЕНТР МЕЖДУНАРОДНОЙ  
ТОРГОВЛИ



**ПРОМЫШЛЕННЫЙ  
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ  
КОНТРОЛЬ**

**Тематика выставки:**

- Ультразвуковой контроль
- Контроль методом акустической эмиссии
- Визуальный и оптический контроль
- Магнитопорошковый контроль
- Электромагнитный контроль
- Вибрационный контроль
- Инфракрасный и термический контроль
- Радиографический контроль
- Течеискание
- Контроль трубопроводов
- Обучение и сертификация персонала, аттестация лабораторий

Организаторы:



Тел.: +7 (812) 380-6002,  
+7 (812) 380-6000,  
Факс: +7 (812) 380-6001,  
E-mail: [ndt@primexpo.spb.ru](mailto:ndt@primexpo.spb.ru),  
[www.primexpo.spb.ru/ndt](http://www.primexpo.spb.ru/ndt)

Российское общество  
по неразрушающему контролю  
и технической диагностике





## СИСТЕМА «SKF COPPERHEAD» — ОБНАРУЖЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

*Разработана и внедрена технология обнаружения неисправностей в оборудовании для горнодобывающей промышленности. Это — способствующее повышению рентабельности производства решение в соответствии с концепцией системы «SKF Copperhead» для обнаружения и предотвращения потенциально дорогостоящих неисправностей и сокращения простоя оборудования в тех отраслях промышленности, где такой простой обходится очень дорого.*

*Technology has been developed to detect faults of equipment for mining and processing mineral resources. This is a cost-effective solution, in keeping with the concept of the "SKF Copperhead" system, to detect and prevent potentially costly malfunctions and shorten equipment down time in those sectors of industry, where such down time results in considerable financial losses.*

Компанией SKF разработана и внедрена технология обнаружения неисправностей в оборудовании для горнодобывающей промышленности с целью снижения эксплуатационных расходов и повышения его надежности и эффективности.

Предприятия горнодобывающей и цементной отраслей промышленности и предприятия по производству щебня, заполнителей бетона стремятся снизить затраты перед тенденцией падения рыночных цен на свою продукцию. За последние семь лет, например, средняя цена угля в США снизилась на 30 %, в то время как эксплуатационные расходы и затраты на охрану окружающей среды увеличились. Компании, занимающиеся добычей и переработкой полезных ископаемых, стремятся к укрупнению предприятий, повышению надежности и эффективности оборудования и снижению расходов, чтобы поддерживать свою рентабельность.

Контроль состояния и обнаружение неисправностей оборудования могут способствовать повышению производительности оборудования, предотвращая незапланированные простои и сокращая время, затрачиваемое на обслуживание и ремонт. Довольно широко распространенная в перерабатывающих отраслях промышленности, таких, как целлюлозно-бумажная, сталеплавильная и нефтехимическая, эта технология пока еще не нашла широкого применения в горнодобывающей, цементной промышленности и в производстве заполнителей бетона. Это частично связано с традиционно высокой стоимостью контроля состояния оборудования и тяжелыми эксплуатационными условиями. Высокая вибрация в вибрационных грохотах, мельницах и дробилках также является сдерживающим фактором на пути широкого распространения контроля состояния оборудования.

Для преодоления этих недостатков компания SKF разработала систему обнаружения неисправностей и систему подшипников «SKF Copperhead» для вибрационных грохотов. Система обнаруживает отклонения от нормы в технологическом процессе, которые могут отрицательно влиять на работу оборудования и вызывать выход его из строя. Первоначально система была разработана для вибрационных грохотов, широко используемых в переработке полезных ископаемых. Система подшип-

© SKF, 2003

ников увеличивает срок службы и улучшает характеристики вибрационных грохотов.

*В основе концепции «SKF Copperhead» лежит использование специально разработанного датчика вибрации и температуры, встраиваемого в вибрационный грохот. Датчик рассчитан на работу в тяжелых эксплуатационных условиях и может быть связан с системой периодического или непрерывного контроля.*

**Анализ параметров виброускорения.** В системе применена технология детектирования огибающей ускорения, разработанная компанией SKF, которая может отличать нормальную вибрацию при прохождении породы через грохот от аномальной, вызываемой нарушением режима работы, например, в результате неисправностей сцепления или переполнения приемного бункера вибрационного грохота. Главной задачей системы обнаружения неисправностей является непрерывный контроль технологического процесса и выявление отклонений от нормы. Подобные системы могут также обнаруживать такие дефекты механизмов, как неисправность системы смазки и повреждение шестерней и подшипников. В этом случае система предупреждает оператора установки об аномальной вибрации, давая возможность выявить и устранить причину вибрации до того, как она приведет к выходу оборудования из строя. Высокопрочный датчик перегрузок / температуры устойчив к высокому уровню вибрации в вибрационном грохоте. Датчик перегрузок / температуры также может быть установлен на мельницах, дробилках и другом горнодобывающем оборудовании.

В дополнение к улучшению эксплуатационных качеств применение системы может повысить безопасность горнодобывающих работ. Эффективность этой технологии продемонстрирована на практических примерах.

*Контроль состояния и обнаружение неисправностей оборудования — два подхода, позволяющих выявлять потенциальные проблемы на ранней стадии. Непрерывный контроль состояния оборудования — относительно дорогостоящий метод, требующий высококвалифицированных специалистов, а также применения сложных приборов. Его наиболее целесообразно использовать в таких отраслях промышленности, как целлюлозно-бумажная.*



Методика обнаружения неисправностей оборудования обычно имеет более низкую общую стоимость, чем непрерывный контроль состояния, и может быть внедрена в самые короткие сроки без длительного обучения персонала. Она не зависит от квалификации специалиста и целесообразна для использования в тех случаях, когда экономия средств является одним из определяющих факторов и в то же время простой оборудования обходится очень дорого.

Обнаружение неисправностей может быть как периодическим, так и непрерывным. Как правило, этот метод не включает определение причины неисправности. Логика обнаружения неисправностей может быть настроена на контроль как технологического процесса, так и состояния оборудования.

**Вибрационные грохоты и вибропитатели.** Вибрационные грохоты и механизмы подачи (вибропитатели) — ключевые компоненты в таких отраслях промышленности, как добыча и переработка полезных ископаемых, организация удаления отходов и строительство. Грохот служит для сортировки или очистки сырья для металлургической промышленности, производства цемента, заполнителей бетона, а также переработки полезных ископаемых. Обычно грохот (и вибропитатель) выполняются в виде каркаса, установленного на пружинных или других амортизаторах. На каркасе устанавливаются грохот (сетка) или решетка, которая сортирует или просеивает материал. Сверху на сетку подается материал (камень, руда, цемент). Процесс сортировки и просеивания ускоряется вибрацией рамы грохота. Чтобы получить желаемую вибрацию, используется вращающаяся неуравновешенная масса. Обычно применяют один или два эксцентриковых вала, опирающихся на подшипники, или вибрационную зубчатую передачу. Частицы, размерами превышающие требуемые, или грязный материал отделяются для дальнейшей переработки или направляются в отходы.

Сбой или выход из строя грохота и вибропитателя могут прервать процесс обработки материала, а также снизить производительность завода. Стоимость нового грохота может составлять от 25 000 до 150 000 долларов США. Потери в связи с простоем вибрационного грохота могут варьироваться от 100 до 15 000 долларов США в час в зависимости от типа процесса. Ремонт грохота может занять от одного до 48 ч, в зависимости от типа неисправности и организации технологического обслуживания.

Вибрационные грохоты или вибропитатели обычно рассчитаны на вибрацию в диапазоне от 2 до 10 единиц ускорения  $g$ , что соответствует амплитуде колебаний грохота от 3 до 20 мм. Вибрация, как правило, синусоидальная вследствие вращательной неуравновешенности эксцентриковой массы. При загрузке и сортировке (просеивании) материала в установке возникают дополнительные колебания. Высокая вибрация в грохоте и абразивные свойства сортируемого материала являются причиной значительных напряжений и износа рамы грохота. Условия повышенной запыленности, а иногда и влажности затрудняют поддержание подшипника грохота в чистоте. Большие перегрузки

в грохоте вызывают необходимость применения подшипников, рассчитанных на работу в условиях вибрации (со специальными сепараторами и другими конструктивными особенностями). Система подшипников «SKF Copperhead» включает в себя подшипник «SKF Explorer», рассчитанный на работу в условиях вибрации, и тороидальный подшипник «SKF CARBR®». Система подшипников фактически устраняет возможность воздействия на подшипники нежелательных сил, что обеспечивает нормальные рабочие температуры и увеличивает сроки службы. Подшипники «SKF Explorer», рассчитанные на работу в условиях вибрации, обозначаются индексами VA405 и VA406.

Типичные отклонения технологического процесса от нормы и дефекты механизмов вибрационных грохотов и вибропитателей следующие.

- **Перепополнение приемного бункера.** Материал накапливается под грохотом и препятствует свободному движению рамы. Рама грохота ударяет о материал, что приводит к неравномерному движению и возможной деформации рамы. Это, в свою очередь, вызывает повреждение конструкции рамы и мешает процессу сортировки, снижая производительность оборудования.

- **Перегрузка.** При загрузке в грохот чрезмерного количества материала возможна деформация подвески рамы. Это имеет те же последствия, что и перепополнение приемного бункера.

- **Ослабление крепления элементов конструкции рамы.** Происходит в результате износа, усталости, коррозии и перегрузки.

- **Ослабление крепления сетки грохота.** Являясь основной причиной простоя грохота, такое ослабление происходит из-за износа и слабого натяжения сетки.

- **Повреждение зубчатой передачи.** Является результатом усталости, загрязнения и износа.

- **Дефект смазки.** Происходит в результате загрязнения или утечки смазки через уплотнение корпуса подшипника.

- **Повреждение подшипника.** Является результатом воздействия чрезмерных сил из-за нарушения нормального технологического процесса (перепополнения приемного бункера), фреттинг-коррозии вала, усталости, загрязнения, нарушения смазки и износа.

Система также позволяет обнаружить прекращение вибрации грохота вследствие повреждения приводного ремня или муфты трансмиссии.

**Обнаружение неисправностей.** Методика обнаружения отклонений технологического процесса и условий работы от нормы предполагает постоянную установку на грохоте специальных датчиков вибрации и температуры, рассчитанных на работу в тяжелых эксплуатационных условиях, сигналы от которых поступают в модуль демодулирующих фильтров. Датчики измеряют полные колебания в грохоте. Демодулирующие фильтры оценивают сигналы в частотном диапазоне от 200 до 12 000 Гц, демодулируя из общего спектра нормальные колебания.

Неисправность обнаруживается как периодическая повторяющаяся высокочастотная «паразитная» вибрация в грохоте, в результате чего полная ве-

личина демодулируемых сигналов увеличивается. Это увеличение вибрации включает аварийную сигнализацию, предупреждающую оператора, давая ему возможность выявить причину неисправности. Часто оператор может определять причину дефекта без специальных приборов. Своевременное устранение неисправности уменьшает время работы грохота в неисправном состоянии, сокращая, таким образом его износ. Если оператор не может определить местонахождение и устранить причину неисправности, может быть вызван специалист по контролю состояния оборудования для проведения дальнейших проверок.

Работа системы обнаружения неисправностей основана на использовании электронных фильтров. Фильтр контролирует колебания в диапазоне частот, в котором происходят неисправности, и игнорирует частоты, которые ему «неинтересны». Информативные частоты далее обрабатываются и сравниваются с заданным значением срабатывания системы сигнализации. Если общий уровень нежелательной вибрации превышает значение срабатывания сигнализации, система оповещает оператора.

Ограничивающим фактором для постоянного и непрерывного контроля является неправильная установка переносных датчиков, например, из-за плохого качества подготовки посадочной поверхности или попадания посторонних предметов между основанием датчика и грохотом. Защитные ограждения также могут препятствовать правильному размещению датчика, а положение датчика может оказаться неоптимальным для измерений из-за влияния вращающейся трансмиссии. В процессе установки временных датчиков рабочий может подвергаться опасности из-за падающих камней и осколков. Воспроизводимость условий измерений от раза к разу не может быть гарантирована. Постоянная установка датчиков устраняет необходимость обеспечения рабочим доступа к грохотам, расположенным в труднодоступных местах.

**Технические требования к системе.** Датчики, применяемые в оборудовании для добычи и переработки полезных ископаемых, должны быть прочными, надежно защищенными от ударов и перенапряжения. Датчик должен иметь неразъемный кабель для подсоединения к системе контроля. Кроме того, кабель должен быть стойким к истиранию и иметь высокую усталостную прочность. Преимущество неразъемного кабеля заключается в отсутствии кабельного соединителя, который может быть поврежден в результате вибрации. В разъем, расположенный вблизи грохота, также может проникать грязь и влага. Чувствительность датчиков должна быть достаточно высока, чтобы воспринимать различные уровни вибрации в грохоте.

Периодический контроль может осуществляться с помощью переносного прибора сборщика данных/анализатора спектра. Такой прибор, оснащенный соответствующим демодулирующим фильтром, может оценивать сигнал вибрации грохота и определять, существует ли неисправность, тогда как анализатор может определять тип неисправности.

В процессе эксплуатации система непрерывного контроля фильтрует и демодулирует сигнал вибрации, имеет возможность регулировки уровня срабатывания сигнализации и может формировать выходной сигнал для контроля. Система непрерывного контроля и обнаружения неисправностей должна иметь выходной сигнал от 4 до 20 мА, который может постоянно контролироваться программируемым логическим контроллером (PLC) установки или распределенной системой управления (DCS). Программируемый логический контроллер или распределенная системой управления также могут контролировать выходной сигнал датчика температуры. Непрерывный контроль посредством PLC или DCS уменьшает количество периодических измерений параметров работы грохота, которые должны проводиться операторами. Система может также включать систему сигнализации, предупреждающую оператора о неисправности в грохоте. Располагая этой информацией, оператор может принять решение об отключении грохота, либо о приостановке подачи породы к грохоту.

Система обнаружения неисправностей была первоначально испытана на медном руднике в штате Аризона в Соединенных Штатах — обнаружена неисправность сцепления и переполнение приемного бункера работающего грохота. Поскольку грохот использовался в производстве, время испытаний «в полевых условиях» было ограничено. Для проведения рабочих испытаний в лаборатории компании SKF был разработан испытательный стенд для вибрационного грохота. На стенде могло быть воспроизведено большинство неисправностей грохота. В результате перед использованием системы в других шахтах и карьерах она была доработана.

**Установка на вибрационных грохотах.** Система обнаружения неисправностей должна быть установлена таким образом, чтобы все ее компоненты были надежно закреплены на вибрационном грохоте и защищены от механических повреждений. Датчики должны быть установлены у корпусов подшипников грохота и ориентированы в направлении хода грохота, плюс/минус 45° (рис. 1). Кроме того, датчики должны быть защищены от ударов падающих камней и осколков, а кабель датчика должен быть защищен от механических повреждений и истирания. Кабель датчика должен быть проложен от подвижной конструкции грохота

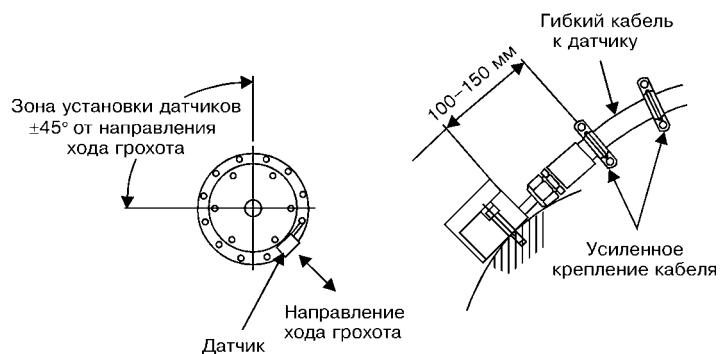


Рис. 1. Схема установки датчика на корпусе подшипника. Предпочтительное положение 45° от направления движения сит. Необходима дополнительная фиксация кабеля

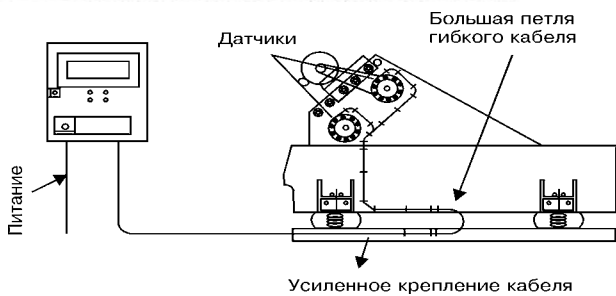


Рис. 2. Схема установки «SKF Copperhead» на вибродатчике

до стационарной рамы таким образом, чтобы была исключена возможность его повреждения при движении грохота или в результате напряжения в кабеле. Участок кабеля датчика между подвижными и неподвижными компонентами грохота должен иметь большой радиус изгиба. Обнаружение неисправностей, основанное на конструкторском решении «SKF Copperhead», применялось на множестве вибрационных грохотов во всем мире. Ниже приводятся три практических примера, демонстрирующих выгоду эксплуатирующей организации при использовании системы. В одном случае система использована в медном руднике (рис. 2), в двух других — на заводах по производству заполнителей бетона.

Одна система обнаружения неисправностей была установлена на вибродатчике в медном руднике в октябре 2000 г. Грохот недавно был восстановлен после отказа одного из двух приводных механизмов. Новый механизм имел нормальный уровень вибрации, тогда как второй имел высокий уровень вибрации. Система обнаружения неисправностей отрегулирована таким образом, что сигнализация должна срабатывать, если вибрация в механизмах превышала уровень 33 gE. В январе 2001 г. система сработала, показав высокую вибрацию в старом механизме. Уровень вибрации был в пределах 49 gE. Клиенту посоветовали вывести грохот из эксплуатации во избежание внезапного отказа.

Другая система обнаружения неисправностей в августе 2000 г. была установлена на вибродатчике на большом заводе по производству заполнителей бетона в Соединенных Штатах. При установке отмечено, что подшипник с одной стороны привода имеет несколько более высокий уровень вибрации, чем подшипник с противоположной стороны. Скорее всего причиной тому был незначительный люфт. В декабре 2000 г. вибрация значительно возросла, о чем свидетельствовало резкое увеличение величины полного ускорения. Грохот был выведен из эксплуатации в рамках капитального ремонта завода. Убедившись в полезности такой системы обнаружения неисправностей, клиент собирается установить еще одну систему обнаружения неисправностей на двух новых грохотах, которые будут установлены в рамках восстановления завода.

Третья система периодического обнаружения неисправностей установлена на вибродатчике на заводе по производству заполнителей бе-

тона в Австралии. Датчики были установлены на грохоте, а прибор обтекающего контроля/анализатора периодически анализировал работу оборудования. При использовании этой методики выявлено повреждение одного из сферических роликоподшипников, зарегистрированное как увеличение общего уровня вибрации. Подшипник была заменен в плановом порядке с минимумом затрат.

**Заключение.** Обнаружение неисправностей, основанное на технологии «SKF Copperhead», является альтернативным подходом к контролю работы оборудования и имеет более низкую стоимость, чем постоянный контроль состояния оборудования. Было доказано, что этот метод представляет собой эффективный способ улучшения эксплуатационных качеств и надежности вибрационного грохота в секторе переработки полезных ископаемых. Способность выявлять нарушения в технологическом процессе и неисправности оборудования и предупредить об этом оператора грохота означает, что неисправности могут устраняться, а регламентные работы или ремонт могут быть запланированы более эффективно. Таким образом, повышается надежность и безопасность контроля (при условии, что система установлена должным образом). Система подшипников «SKF Copperhead» увеличивает срок службы и производительность вибрационного грохота. В настоящее время разрабатывается система «SKF Copperhead» для использования на других видах оборудования переработки полезных ископаемых.

**Факты.** Технология обнаружения неисправностей разработана для использования на оборудовании добычи и переработки полезных ископаемых. Это — решение, способствующее повышению рентабельности производства в соответствии с концепцией системы «SKF Copperhead» для обнаружения и предотвращения потенциально дорогостоящих неисправностей и сокращения простоя оборудования в тех отраслях промышленности, где такой простой обходится очень дорого.

В системе используется недавно разработанный датчик вибрации и температуры, который постоянно устанавливается в соответствующих местах на вибрационном оборудовании типа грохотов и вибропитателей. Система обнаружения обрабатывает сигналы вибрации и отделяет нормальные колебания от аномальной вибрации, вызванной повреждениями механизмов и нарушениями технологического процесса. Результирующий выходной сигнал может непрерывно контролироваться и приводить в действие сигнализацию для предупреждения оператора о возникшей неисправности. Это означает, что неисправность может быть устранена или находиться под контролем до тех пор, пока не будет организовано обслуживание и ремонт наиболее рентабельным способом. Хотя первоначально система «SKF Copperhead» была разработана для вибрационных грохотов, в настоящее время она также разрабатывается для мельниц, дробилок и другого оборудования для добычи и переработки полезных ископаемых.

## О НОВЫХ НАЦИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТАХ ПО РАДИАЦИОННОМУ КОНТРОЛЮ

Н. Г. БЕЛЫЙ, Н. В. ТРОИЦКАЯ

*Рассмотрены новые национальные стандарты по радиографии, разработанные впервые в Украине в соответствии с планом государственной стандартизации на 2001 г. Они основаны на действующих Европейских стандартах: EN 462-1:1994, EN 462-2:1994, EN 462-4:1994, EN 462-5:1996, EN 12517:1998. Необходимость введения этих стандартов в Украине определена соответствующими документами: Договором с Европейским Союзом, имеющим ранг закона Украины, Указом Президента и рядом постановлений Кабинета Министров Украины. Стандарты прошли экспертизу в Министерстве промышленной политики Украины, Министерстве обороны Украины, Украинском научно-исследовательском институте стандартизации, сертификации и информатики (УкрНДИССИ) и утверждены приказами Госстандарта Украины № 658 от 28.12.01 и № 422 от 01.07.02 со сроком введения с 01.01 по 01.10.2003 г.*

*New national standards on radiography are considered, which were developed for the first time in Ukraine in keeping with the plan of state standardization for the year 2001. They are based on European standards, currently in force. The need to introduce such standards in Ukraine is specified by appropriate documents: Agreement with the European Union, which has the rank of the law of Ukraine, President's Act and a number of Acts of the Cabinet of Ministers of Ukraine. Standards have been reviewed by the Ministry of Industrial Policy of Ukraine, Ministry of Defense of Ukraine, Ukrainian Research Institute of Standardization, Certification and Informatics (Ukr.RISCI) and are approved by an order of Gosstandard of Ukraine. N 658 of 28.12.01 and N 422 of 01.07.02 with the period of introduction from 01.01 till 01.10.2003*

Стандартизация средств и методов НК обеспечивает повышение их технического уровня, качества и надежности, единообразие и достоверность результатов измерений, испытания и контроля за счет установления оптимальных методов контроля, разработки методик НК, классификации дефектов и установления критериев их допустимости, развития унификации и типизации технологических процессов контроля.

Срок действия почти всех стандартов, разработанных в СССР, истек или же истекает. Однако в промышленности продолжают пользоваться устаревшими нормативными документами. В то же время практически все международные и европейские стандарты значительно «моложе». Поэтому гармонизация национальных и международных стандартов в настоящее время особенно актуальна.

Следует отметить, что развивающиеся в настоящее время интеграционные процессы в цивилизованном мире предопределяют формирование весьма сложной и вместе с тем достаточно надежной инфраструктуры взаимодействия различных государств в научно-производственной сфере. Сегодня, когда вполне очевидна нецелесообразность сугубо автономного, замкнутого в рамки одного государства, развития индивидуального потенциала, весьма остро ставится на повестку дня вопрос о выработке единых для разных стран критериев оценки и контроля качества производимой продукции.

Обобщение опыта специалистов разных стран играет важную роль в развитии НК. Положительной стороной международных и европейских стандартов является то, что их можно использовать в качестве базы для развития национальных стандартов. Эти документы помогают преодолевать технические барьеры в процессе производства промышленных изделий, их эксплуатации, позволяют находить наиболее оптимальные экономические решения при производстве товаров и предоставлении услуг, облегчают международную торговлю.

Для того, чтобы выйти на мировой уровень стандартизации в области НК, принято решение максимально приблизить отечественные стандарты к международным и европейским, взяв их за основу для разработки национальных. Организацией, уполномоченной проводить экспертизу нормативно-технической документации, обеспечение соответствующих разработок, решать вопросы, связанные с гармонизацией стандартов, является Технический комитет по стандартизации ТК-78 «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» Государственного комитета стандартизации, метрологии и сертификации Украины (ныне Государственный комитет Украины по вопросам технического регулирования и потребительской политики).

В настоящее время ТК-78 занимается гармонизацией национальных и европейских стандартов. Вначале в Украине были введены межгосударственные стандарты по сертификации персонала: ГОСТ 30489-97 (EN 473-92) «Квалификация и сертификация персонала в области неразрушающего контроля. Общие требования» и ГОСТ 30488-97 (EN 45013-89) «Органы по сертификации персонала. Общие требования». Затем были гармонизированы и введены в действие национальные стандарты ДСТУ 4001-2000 (ISO 2400) «Зварні шви на сталі. Зразок для калібрування устаткування ультразвукового контролю» и ДСТУ 4002-2000 (ISO 7963) «Зварні шви на сталі. Калібрувальний зразок № 2 для ультразвукового контролю зварних швів».

Работы в этом направлении продолжают и в настоящее время. В соответствии с Законом Украины «Угода про партнерство та співробітництво між Європейськими Співтовариствами і Україною», Указом Президента Украины «Про забезпечення виконання Угоди про партнерство та співробітництво між Україною та Європейськими Співтовариствами і вдосконалення механізму співробітництва з Європейськими Співтовариствами», Постановлением Кабинета Министров Украины «Про заходи щодо поетапного впровадження

в Україні вимог директив Європейського Союзу, санітарних, ветеринарних, фітосанітарних норм та міжнародних і європейських стандартів» ТК-78 провів в 2001–2002 гг. гармонізацію наступої групи європейських стандартів:

**EN 462-1:1994.** Неразрушаючий контроль — Качество изображения радиографических снимков. Часть 1. Индикаторы качества изображения проволоочного типа. Определение показателя качества изображения;

**EN 462-2:1994.** Неразрушаючий контроль — Качество изображения радиографических снимков. Часть 2. Индикаторы качества изображения типа ступень/отверстие — Определение показателя качества;

**EN 462-4:1994.** Неразрушаючий контроль — Качество изображения радиографических снимков. Часть 4. Экспериментальное определение показателей качества изображения и таблиц качества изображения;

**EN 462-5:1996.** Неразрушаючий контроль — Качество изображения радиографических снимков. Часть 5. Индикаторы качества изображения двухпровоочного типа. Определение величины нерезкости изображения;

**EN 571-1:1997.** Неразрушаючий контроль — Капиллярный контроль. Часть 1. Общие принципы;

**EN 584-1:1997.** Неразрушаючий контроль — Промышленные радиографические пленки. Часть 1. Классификация систем пленок для промышленной радиографии;

**EN 584-2:1994.** Неразрушаючий контроль. Промышленные радиографические пленки. Часть 2. Контроль обработки пленки с помощью опорных величин;

**EN 583-1:1998.** Ультразвуковой контроль. Часть 1. Общие принципы;

**EN 473:2000.** Неразрушаючий контроль — Квалификация и сертификация персонала, занятого в неразрушающем контроле. Общие принципы;

**EN 10228-2:1998.** Неразрушаючий контроль поковок из стали. Часть 2. Капиллярный контроль;

**EN 10228-3:1998.** Неразрушаючий контроль поковок из стали. Часть 3. Ультразвуковой контроль поковок из ферритной и мартенситной сталей;

**EN 1289:1998.** Неразрушаючий контроль сварных соединений. Капиллярный контроль сварных соединений. Приемочные критерии;

**EN 1291:1998.** Неразрушаючий контроль сварных соединений. Магнитопорошковый контроль. Метод;

**EN 1291:1998.** Неразрушаючий контроль сварных соединений. Магнитопорошковый контроль сварных соединений. Приемочные критерии;

**EN 12517:1998.** Неразрушаючий контроль сварных соединений. Приемочные критерии для радиографического контроля сварных соединений.

Стандарты серии **ДСТУ EN 462** по радиографии разрабатывались с целью введения в Украине стандартов, идентичных европейским, что позволяет унифицировать методы определения уровня качества изображения снимков при радиографическом методе контроля металлических конструкций. Общей особенностью этих стандартов является расширение действующего ГОСТ 7512-82 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод» и введение в практику радиографии не применявшихся ранее элементов, получивших распространение в Европе и США.

С первых дней существования радиографии применялись устройства, служащие для оценки качества используемой радиографической технологии. Экспериментальное измерение чувствительности применяемого метода по эталонам с искусственными дефектами, имитирующими технологические дефекты, является способом оценки качества радиографического изображения, позволяет контролировать заданный режим просвечивания материала на пленку и определять пригодность данного снимка для оценки качества изделия [1, 2]. В практике радиографии более удобным оказывается не эталон, показывающий наиболее высокую чувствительность используемого метода, а эталон наиболее полно имитирующий предполагаемый дефект. Так, при применении пластинчатого эталона с канавками по ГОСТ 7512-82 наблюдается наиболее высокая чувствительность, однако для воспроизведения и поддержания выбранного режима просвечивания при массовом контроле этот эталон не всегда является лучшим, так как имитируемый в нем дефект мало похож на реальный. Для поддержания выбранного режима просвечивания желательнее как можно точнее оценить выявляемость реальных дефектов [3]. Для этой цели применяют проволоочные (ДСТУ EN 462-1) и ступенчатые эталоны с отверстиями (ДСТУ EN 462-2). Выявляемость дефектов, определенная по этим эталонам, близка к выявляемости реальных дефектов. Так, проволоочный эталон лучше, чем эталон с канавками имитирует такие дефекты сварки, как трещины и непровары. Ступенчатые эталоны с отвер-

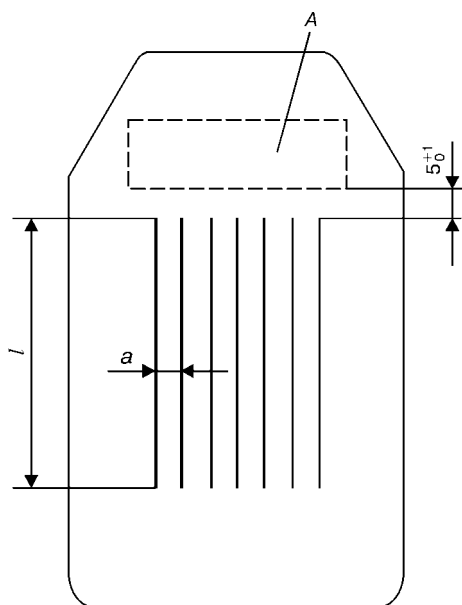


Рис. 1. Индикатор качества изображения проволоочного типа по стандарту ДСТУ EN 462-1: А — поле для маркировки



ствиями хорошо имитируют дефекты сварки и литья (поры, раковины, шлаковые включения). Преимущество этих эталонов заключается и в том, что они просты по конструкции и вносят малые искажения на снимке. Кроме того, их легко изготовить из материала, контролируемого объекта.

В стандартах серии ДСТУ EN 462 описываются устройства, служащие для оценки качества используемой радиографической технологии, называемые индикаторами качества изображения (ИКИ).

Стандарт ДСТУ EN 462-1 [4] определяет ИКИ проволочного типа, требования к нему, а также метод определения качества изображения.

Индикатор качества изображения проволочного типа (рис. 1) состоит из серии прямолинейных проволок (их 19) различных диаметров. В табл. 1 представлены размеры проволок вместе с предельными отклонениями их диаметров. Этот ряд проволок разделен на четыре соответственно пересекающиеся группы из семи следующих друг за другом номеров проволоки: W1–W7, W6–W12, W10–W16 и W13–W19. Семь проволок каждой пары расположены параллельно друг другу. Длина проволок *l* равна 10; 25 или 50 мм. В табл. 2 приведены обычно применяемые материалы проволок.

Проволоки ИКИ вложены в защитную пластиковую оболочку, не влияющую на показатель качества изображения.

Критерием выбора применяемого индикатора качества является материал объекта контроля, а также ожидаемый или требуемый показатель качества изображения.

Материал проволоки, по возможности, должен иметь коэффициент поглощения, как можно больше близкий к коэффициенту поглощения контролируемого материала. Если ИКИ используются для материалов, не приведенных в табл. 2, то тогда следует руководствоваться стандартом ДСТУ EN 462, определяющим методику экспериментального определения ИКИ. В этом случае материал проволоки должен иметь коэффициент поглощения меньший, чем материал объекта контроля. Если из-за слишком большого различия коэффициентов поглощения это невозможно, то следует применять ИКИ, выполненный из материала того же типа, что и материал объекта контроля.

При просвечивании ИКИ размещают на стороне контролируемого участка, которая обращена к источнику излучения и удалена от пленки. Если это невозможно, то ИКИ может располагаться на смежной стороне, ближней к подлежащему контролю участку объекта. Индикатор следует размещать на объекте в области максимально возможной равномерной толщины.

Показатель качества изображения определяют с учетом условий просмотра радиографических снимков, определенных стандартом EN 25 580 [5]. Номер самой тонкой проволоки, изображение которой можно увидеть на снимке, соответствует показателю качества изображения. Изображение проволоки считается распознаваемым, если оно однозначно просматривается в области равномерной оптической плотности, по крайней мере, на 10 мм ее длины.

Таблица 1. Характеристики ИКИ по EN 462-1:1994

ИКИ, включающий					Проволока		Интервал между осями <i>a</i> , мм
W1	W6	W10	W13	Номер	Номинальный диаметр, мм	Предельное отклонение, мм	
X				W1	3,20	± 0,03	9,6 <sub>0</sub> <sup>+1</sup>
X				W2	2,50		7,5 <sub>0</sub> <sup>+1</sup>
X				W3	2,00		6 <sub>0</sub> <sup>+1</sup>
X				W4	1,60	± 0,02	5 <sub>0</sub> <sup>+1</sup>
X				W5	1,25		
X	X			W6	1,00		
X	X			W7	0,80		
	X			W8	0,63		
	X			W9	0,50	± 0,01	
	X	X		W10	0,40		
	X	X		W11	0,32		
	X	X		W12	0,25		
		X	X	W13	0,20		
		X	X	W14	0,16		
		X	X	W15	0,125	± 0,005	
		X	X	W16	0,100		
			X	W17	0,080		
			X	W18	0,063		
			X	W19	0,050		

Маркировка ИКИ должна содержать: номер наиболее толстой проволоки (1, 6, 10 или 13); сокращенное обозначение применяемого материала проволоки, например, Fe; знак EN, например, 10 Fe EN.

Стандарт ДСТУ EN 462-2 [6] определяет ИКИ типа ступень/отверстие, требования к нему и метод определения качества изображения. Такой ИКИ (рис. 2) состоит из 18 ступеней и отверстий различной толщины и диаметра. Номера отверстий, их диаметры, толщины ступеней и предельные отклонения отверстий приведены в табл. 3. Они разделены на четыре соответственно пересекающиеся группы по шесть следующих друг за другом номе-

Таблица 2. Типы ИКИ и материал проволок, используемых для некоторых групп материалов

ИКИ	Проволока		Подходят для испытания материала
	номера	материал	
W1CU W6CU W10CU W13CU	W1-W7 W6-W12 W10-W16 W13-W19	Медь	Медь, цинк, олово и их сплавы
W1FE W6FE W10FE W13FE	W1-W7 W6-W12 W10-W16 W13-W19	Сталь (низколегированная)	Черные металлы
W1TI W6TI W10TI W13TI	W1-W7 W6-W12 W10-W16 W13-W19	Титан	Титан и его сплавы
W1AL W6AL W10AL W13AL	W1-W7 W6-W12 W10-W16 W13-W19	Алюминий	Алюминий и его сплавы

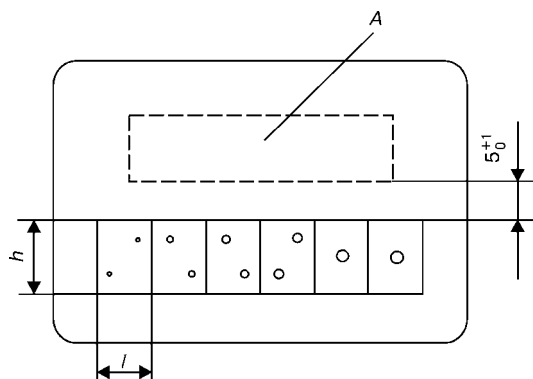


Рис. 2. Индикатор качества изображения типа ступень/отверстие по стандарту ДСТУ EN 462-2: А — поле для маркировки

ров отверстий: Н1–Н6, Н5–Н10, Н9–Н14 или Н13–Н18. На рис. 2:  $h = 10$  мм для ИКИ номер Н1, Н5 и Н9; 15 мм для ИКИ номер Н13;  $l = 5$  мм для ИКИ номер Н1, 7 мм для ИКИ номер Н5 и Н9; 15 мм для ИКИ номер Н13.

Ступени толщиной менее 0,8 мм должны содержать два отверстия одинакового диаметра, а ступени толщиной 0,8 мм или больше — одно отверстие. Минимальное расстояние от центра одного отверстия в этой ступени должно равняться диаметру отверстия плюс 1 мм. Отверстия должны быть перпендикулярны поверхности и не иметь скоса кромки.

Выбор данного типа ИКИ следует осуществлять в соответствии с испытуемым материалом и его толщиной. По возможности ИКИ должен быть выполнен из того же материала, что и объект контроля. В других случаях следует руководствоваться EN 462-4:1994.

Все детали ИКИ должны быть выполнены из одного и того же материала и вложены в защитную оболочку, не влияющую на показатель качества изображения. Обычно применяемые материалы ИКИ приведены в табл. 4.

Маркировка индикатора должна содержать следующую информацию: номер наименьшего отверстия; символ, обозначающий используемый мате-

Таблица 4. Типы ИКИ по ДСТУ EN 462-2 и материалы, используемые для отобранных групп материалов

ИКИ	Номер отверстия (по табл. 3)	Материал ИКИ	Подходит для испытания материала
H1CU	H1-H6	Медь	Медь, цинк, олово и их сплавы
H5CU	H5-H10		
H9CU	H9-H14		
H13CU	H13-H18		
H1FE	H1-H6	Сталь (низколегированная)	Черные металлы
H5FE	H5-H10		
H9FE	H9-H14		
H13FE	H13-H18		
H1TI	H1-H6	Титан	Титан и его сплавы
H5TI	H5-H10		
H9TI	H9-H14		
H13TI	H13-H18		
H1AL	H1-H6	Алюминий	Алюминий и его сплавы
H5AL	H5-H10		
H9AL	H9-H14		
H13AL	H13-H18		

Таблица 3. Характеристики ИКИ по ДСТУ EN 462-2

ИКИ, включающий				Номер отверстия	Номинальный диаметр отверстия и толщина ступени, мм	Предельные отклонение, мм
H1	H5	H9	H13			
X				H1	0,125	+0,0150
X				H2	0,160	
X				H3	0,200	
X				H4	0,250	
X	X			H5	0,320	
X	X			H6	0,400	
	X			H7	0,500	
	X			H8	0,630	+0,0200
	X	X		H9	0,800	
	X	X		H10	1,000	
		X		H11	1,250	+0,0250
		X		H12	1,600	
		X	(1)	H13	2,000	
		X	(1)	H14	2,500	
			(1)	H15	3,200	+0,0300
			(1)	H16	4,000	
			(1)	H17	5,000	
			(1)	H18	6,300	+0,036

Примечание. Значения (1) используют для специальных целей по согласию партнеров по договору.

риала ИКИ, например FE; знак EN, например, H5 Fe EN.

Радиографическое изображение маркировки ИКИ не должно ослеплять при просмотре пленки. Рекомендуются, чтобы поглощение маркировки ИКИ не превышало поглощения наиболее толстой ступени более, чем в два раза.

Каждый ИКИ должен поставляться вместе с декларацией о соответствии по стандарту EN 45014, выданной аккредитованной лабораторией, которая подтверждает выполнение требований настоящего стандарта. Для идентификации ИКИ должен нумероваться и обозначаться изготовителем.

Определение показателя качества изображения осуществляют с учетом условий просмотра радиографических снимков в соответствии со стандартом EN 25 580. При этом номер самого маленького отверстия, распознаваемого на снимке, принимают за показатель качества изображения. Если ступень содержит два отверстия, то тогда должны быть видны оба.

Если при радиографическом контроле требуется проверка качества изображения, то, как правило, показатель качества изображения должен определяться для каждого радиографического снимка. Если гарантируется, что радиографические снимки одних и тех же объектов контроля изготавливались одной и той же техникой съемки и обработки и не предполагается изменения показателя качества изображения, то не требуется подтверждать качество изображения на каждом снимке. В этом случае объем проверки качества изображения должен быть согласован договаривающимися сторонами.

Стандарт ДСТУ EN 462-4 [7] включает инструкции для экспериментального определения показателя качества изображения и таблиц качества

Таблица 5. Пример таблицы качества изображения

Просвечиваемая толщина, мм	Показатель качества изображения
до 2	A
от 2 до 3	B
от 3 до 5	C
от 5 до 10	D
от 10 до 20	E
от 2 до 3	F
более 40	G

изображения. Он применяется в тех случаях, когда производятся испытания материалов, отличных от приведенных в табл. 2, 4 (ДСТУ EN 462-1 и ДСТУ EN 462-2) и следует выбрать ИКИ. При предварительно определенных условиях выполняют два проверочных снимка. Если показатели качества изображения этих снимков идентичны, то полученная величина принимается за требуемый показатель качества изображения. Если показатели качества изображения проверочных снимков отличаются, то процедуру повторяют. Если просвечивают определенный материал, но с различной толщиной стенки, то нужно составлять таблицу качества изображения. На рис. 3 показан пример для определения показателей качества изображения при различных

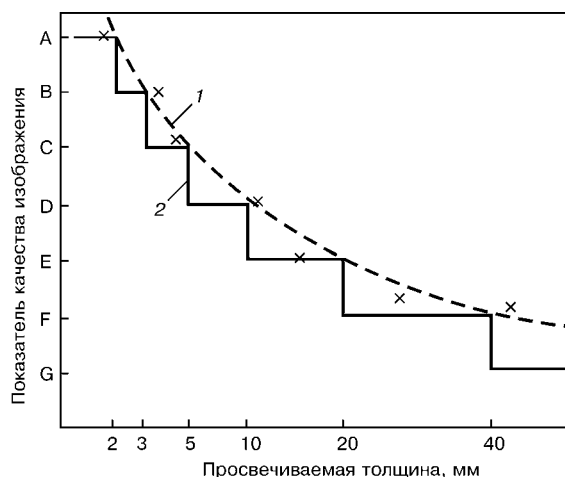


Рис. 3. Пример для определения таблицы качества изображения: X — показатель качества изображения определен по разделу 4 ДСТУ EN 462-4:4; материал — сталь (позиции описаны в тексте)

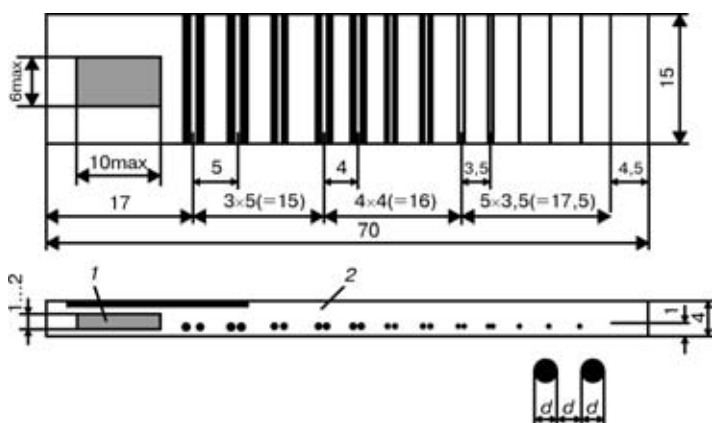


Рис. 4. ИКИ двухпроволочного типа по стандарту ДСТУ EN 462-5: 1 — свинцовый знак EN 462-5; 2 — жесткий пластиковый держатель; d — диаметр проволоки

Таблица 6. Характеристики ИКИ по EN 462-5

Номер элемента (D — двойной)	Нерезкость изображения U, мм	Диаметр проволоки и расстояние между проволоками d, мм	Предельные отклонения значений d, мм
13D	0,10	0,050	± 0,005
12D	0,13	0,063	
11D	0,16	0,080	
10D	0,20	0,100	
9D	0,26	0,130	
8D	0,32	0,160	± 0,01
7D	0,40	0,200	
6D	0,50	0,250	
5D	0,64	0,320	
4D	0,80	0,400	
3D	1,00	0,500	± 0,02
2D	1,26	0,630	
1D	1,60	0,800	

просвечиваемых толщинах. Ступенчатая кривая 2, расположенная под экспериментальной кривой 1, определяет показатели качества изображения и ступени просвечиваемой толщины (табл. 5).

ДСТУ EN 462-5 [8] определяет ИКИ двухпроволочного типа, а также метод определения показателя нерезкости изображения. Индикатор двухпроволочного типа (рис. 4) состоит из 13 рядов элементов, закрепленных в прозрачном жестком пластиковом держателе. Каждый элемент в свою очередь состоит из пары проволок круглой формы. Элементы 1D–3D изготавливают из вольфрама, а остальные — из платины.

Индикаторы двухпроволочного типа применяют в сочетании с индикаторами проволочного типа или типа ступень/отверстие и не заменяют последних, так как их задача — определение только нерезкости изображения.

Изображение ИКИ на снимке должно быть видно с помощью увеличительного стекла вплоть до четырехкратного увеличения. Наибольший элемент (пара проволок) изображения, который сливается в одну целую форму, не имеющую различного интервала между изображениями обеих проволок, следует рассматривать как предел различимости. Нерезкость изображения U задается через 2d, где d — диаметр проволоки и расстояние между проволоками (рис. 4, табл. 6).

Стандарты серии ДСТУ EN 462 утверждены приказом Госстандарта Украины № 658 от 28.12.2001 г. и вводятся в действие с 1.01.2003 г.

Стандарт ДСТУ EN 12517 [9] устанавливает критерии приемки дефектов в стали стыковых сварных швов, обнаруживаемых при выполнении радиографического контроля. Эти приемочные критерии могут быть использованы для контроля других видов сварных соединений, а также сварных соединений, выполненных из других материалов. Стандарт требует, чтобы до проведения радиографического контроля сварные соединения были проконтролированы с помощью визуального контроля в соответствии со стандартом EN 970 [10].

Приемочные критерии для индикации несплошностей стыковых сварных соединений

Таблица 7. Приемочные критерии индикаций в стыковых сварных швах по EN 1257

Вид дефекта в соответствии с EN 26520	Приемочные критерии <sup>1)</sup>		
	3	2	1
Трещина (100)	Не допустима	Не допустима	Не допустима
Трещина в конце кратера (104)	Допускается одна на 40 мм сварного шва	»»	»»
Пористость и поры (2011, 2013, 2014 и 2017)	$l \leq \min(0,5s; 5 \text{ мм})$ $\Sigma l \leq s$ для $L = \min(12s; 150 \text{ мм})$	$l \leq \min(0,4s; 4 \text{ мм})$ $\Sigma l \leq s$ для $L = \min(12s; 150 \text{ мм})$	$l \leq \min(0,3s; 3 \text{ мм})$ $\Sigma l \leq s$ для $L = \min(12s; 150 \text{ мм})$
Свищ (2016)	$l \leq \min(0,5s; 5 \text{ мм})$ $\Sigma l \leq s$ для $L = \min(12s; 150 \text{ мм})$	$l \leq \min(0,4s; 3 \text{ мм})$ $\Sigma l \leq s$ для $L = \min(12s; 150 \text{ мм})$	$l \leq \max(0,3s; 2 \text{ мм})$ и $l \leq 25 \text{ мм}$ $\Sigma l \leq s$ для $L = \min(12s; 150 \text{ мм})$
Включения (300) Продолговатая полость (2015)	$l \leq 2s$ и $\Sigma l \leq L/10$	$l \leq 2s$ и $\Sigma l \leq L/10$	$l \leq \max(0,3s; 6 \text{ мм})$ и $l \leq 25 \text{ мм}$ $\Sigma l \leq 25$ для $L = \min(12s; 150 \text{ мм})$
Включения меди (3042)	Не допустимы	Не допустимы	Не допустимы
Несплавление (401)	Допустимо прерывистое и не до поверхности; $l \leq 25 \text{ мм}$ и $\Sigma l \leq 25 \text{ мм}$ для $L = \min(12s; 150 \text{ мм})$	»»	»»
Непровар (402)	$l \leq 25 \text{ мм}$ и $\Sigma l \leq 25 \text{ мм}$ для $L = \min(12s; 150 \text{ мм})$	Допустим, если не распространяется до поверхности; $l \leq 25 \text{ мм}$ и $\Sigma l \leq 15 \text{ мм}$ для $L = \min(12s; 150 \text{ мм})$	»»
Подрез (501) <sup>2)</sup>	Требуется плавный переход $h \leq 1,5 \text{ мм}$	Требуется плавный переход $h \leq 1 \text{ мм}$	Требуется плавный переход $h \leq 0,5 \text{ мм}$
Превышение проплава (504) <sup>2)</sup>	Большое $h \leq \min[5 \text{ мм}; (1 \text{ мм} + 1,2b)]$	Довольно большое $h \leq \min[4 \text{ мм}; (1 \text{ мм} + 0,6b)]$	Хорошо сформировано, плавный переход к основному металлу $h \leq \min[3 \text{ мм}; (1 \text{ мм} + 0,3b)]$
Местное превышение проплава (5041)	Допустимо	Случайный локальный выступ допустим при гладком переходе	
Случайные оплавления и брызги металла (601), (602) <sup>2)</sup>	Допустимость случайных оплавлений зависит от вида основного металла и вероятности появления трещин Допустимость брызг металла зависит от вида основного металла		

<sup>1)</sup> Приемочные критерии 2 и 3 могут обозначаться «X», указывающим на то, что индикации более 25 мм не допускаются.  
<sup>2)</sup> Дефекты поверхности: критерии приемки, определяемые визуальным контролем. Дефекты, определяемые или неопределяемые визуальным контролем.  
*Условные обозначения:*  $l$  — длина дефекта;  $s$  — минимальная толщина стыкового сварного шва;  $L$  — проконтролированная длина сварного шва;  $h$  — высота дефекта;  $b$  — ширина усиления шва.

приведены в табл. 7. Типы дефектов соответствуют указанным в EN 25817 [11].

Стандарт **ДСТУ EN 12517:2002** утвержден приказом Госстандарта Украины № 422 от 12.07.2002 вводятся в действие с 1 октября 2003 г.

Выполнение требований указанных стандартов при применении радиационного металла неразрушающего контроля позволит оценивать качество сварных соединений на основе европейских требований, что в свою очередь повысит конкурентоспособность украинской продукции и безопасность эксплуатации сварных конструкций.

1. Румянцев С. В. Радиационная дефектоскопия. — М.: Атомиздат, 1974. — 510 с.
2. Троицкий В. А. Пособие по радиографии сварных соединений. — Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000. — 266 с.
3. ГОСТ 7512–82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод.
4. ДСТУ EN 462-1. НК — качество изображения радиографических снимков. Часть 1: Индикаторы качества изображения

- проволочного типа. Определение показателя качества изображения.
5. EN 25 580. Неразрушающий контроль — промышленные радиографические негаскопы. Минимальные требования (ISP 5580:1985).
6. ДСТУ EN 462-2. НК — качество изображения радиографических снимков. Часть 2: Индикаторы качества изображения типа ступень/отверстие — определение показателя качества изображения.
7. ДСТУ EN 462-4. НК — качество изображения радиографических снимков. Часть 4: Экспериментальное определение показателей качества изображения и таблиц качества изображения.
8. ДСТУ EN 462-5. НК — качество изображения радиографических снимков. Часть 5: Индикаторы качества изображения двухпроволочного типа. Определение величины нерезкости изображения.
9. EN 12517:1998. Неразрушающий контроль сварных соединений. Приемочные критерии для радиографического контроля сварных соединений.
10. EN 970. Неразрушающий контроль сварных швов при сварке плавлением. Визуальный контроль.
11. EN 25817. Стальные сварные соединения, полученные электродуговой сваркой — указания по оценочным группам дефектов.

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

Поступила в редакцию  
11.12.2002



## СПЕЦІАЛІЗОВАНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ НА ПРИКАРПАТТІ

О. Є. СЕРЕДЮК\*, доцент ІФНТУНГ

3–6 грудня 2002 р. в м. Івано-Франківську на базі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) проводилася 3-я Спеціалізована науково-технічна конференція і виставка «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання», ініціатором проведення якої була кафедра «Методи та прилади контролю якості і сертифікації продукції» (завідувач кафедри МПКЯ і СП проф. І. С. Кісіль). Офіційними організаторами конференції виступили ІФНТУНГ, Українська нафтогазова академія, ВАТ «Укрнафта», ДК «Укргазвидобування», ДК «Укртрансгаз», Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики, група підприємств «Ультракон», науково-виробнича фірма «Зонд». Інформаційна підтримка конференції була здійснена за участю науково-технічних журналів «Методи та прилади контролю якості», «Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ», «В мире неразрушающего контроля», «Техническая диагностика и неразрушающий контроль».

З привітанням до учасників конференції від Оргкомітету звернувся ректор ІФНТУНГ проф. Є. І. Крижанівський, який відзначив зростаючу актуальність питань забезпечення працездатності і експлуатаційної надійності технологічного обладнання, так як спрацювання більшої частини обладнання і машин у вітчизняній промисловості перевищує 52 %, а в нафтогазовій галузі ця частка становить більше 60 %. Тому основним напрямком конференції був обмін досвідом в практичних аспектах застосування спеціальних засобів неруйнівного контролю і технічної діагностики, особливо в нафтогазовій галузі.

З доповіддю про сучасний підхід до неруйнівного контролю нафтогазового обладнання та інструменту виступив проректор ІФНТУНГ з наукової



Рис. 1. Відкриття конференції (в президії зліва направо: директор НВФ «Ультракон» І. В. Павлій, завідувач кафедри МПКЯ і СП ІФНТУНГ проф. І. С. Кісіль, ректор ІФНТУНГ проф. Є. І. Крижанівський, проректор з наукової роботи ІФНТУНГ проф. О. М. Карпаш)



Рис. 2. Привітання до учасників конференції від голови Оргкомітету — ректора ІФНТУНГ проф. Є. І. Крижанівського

роботи проф. О. М. Карпаш, який констатував, що основною причиною аварій і відмов на об'єктах нафтогазового комплексу та трубопровідному транспорті є механічні пошкодження і корозія. Частка відмов у зв'язку із корозією металу після 20 років експлуатації сягає 35...45 % загальної кількості відмов. На базі узагальнення причин відмов в Україні реалізовано комплексний підхід до забезпечення ефективності застосування засобів неруйнівного контролю. Цей підхід передбачає розробку спеціалізованих технічних засобів для неруйнівного контролю основних показників якості бурового і нафтогазового обладнання й інструменту, розробку нормативно-методичного забезпечення для проведення неруйнівного контролю, організацію кадрового забезпечення через спеціалізовані атестаційні центри з підготовки та атестації фахівців з неруйнівного контролю на відповідність вимогам Міжнародного стандарту EN473 та здійснення організаційного забезпечення шляхом розроблення та впровадження галузевого стандарту «Положення про службу неруйнівного контролю в нафтогазовій галузі».

Від імені Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики учасників конференції привітав член Правління, заступник заві-



Рис. 3. Демонстрація розробок НВФ «Термоприлад» (м. Львів) для теплового контролю

\* Фото люб'язно надані автором статті О. Є. Середюком



Рис. 4. Ознайомлення з розробками НВФ «Промприлад» (м. Київ) для ультразвукового контролю

дувача відділом неруйнівних методів контролю Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, канд. техн. наук М. Г. Білий, який підкреслив практичну роль конференції на Прикарпатті і охарактеризував вагомий внесок науковців і виробників Прикарпаття у вдосконалення і розширення практичних аспектів застосування засобів неруйнівного контролю в нафтогазовій галузі.

Завідувач кафедри МПКЯ і СП ІФНТУНГ проф. І. С. Кісіль у своєму виступі розкрив основні напрямки і особливості підготовки спеціалістів і магістрів кафедрою, яка була заснована в 1991 р., є випускною для підготовки фахівців спеціальності «Прилади і системи неруйнівного контролю» і разом з іншими кафедрами ІФНТУНГ щорічно готує біля 30 спеціалістів вказаної спеціальності, які після закінчення навчання в університеті розподіляються на роботу переважно на підприємства нафтогазової галузі. В процесі навчання студенти крім фундаментальних і інших загально-технічних дисциплін приділяють значну увагу вивченню професійно-орієнтованих дисциплін з різних методів неруйнівного контролю (акустичного, електромагнітного, радіографічного, магнітного, теплового, оптичного, капілярного) з виконанням лабораторних та курсових робіт і проектів з цих дисциплін. Для цього на кафедрі МПКЯ і СП створені і функціонують відповідні навчальні лабораторії, які щорічно поповнюються сучасними приладами і засобами неруйнівного контролю. Для навчального процесу використовуються також виробничі лабораторії двох філій кафедри в науково-технічному центрі «Промтехдіагностика» і НВФ «Зонд». З 2001 р. кафедра на основі пропозицій ряду підприємств нафтогазової галузі організувала через



Рис. 5. Визначення твердості напильника валу нагнітача компресорного агрегату в умовах Богородчанської компресорної станції представником фірми «ІНТРОН-СЕТ»

орган сертифікації національної акредитаційної комісії України з неруйнівного контролю (ОС НАУНК) при УТ НК і ТД сертифікацію своїх студентів-випускників на перший рівень, що позитивно вплинуло як на розподіл їх на роботу, так і на рівень виконуваних ними професійних обов'язків. Підвищенню якості підготовки спеціалістів з неруйнівного контролю сприяє також наукова і науководослідна робота, яка виконується на кафедрі в рамках госпдоговірних і держбюджетних робіт. При кафедрі функціонує аспірантура за спеціальністю 05.11.13 — Прилади і методи контролю та визначення складу речовин, в якій на даний час навчаються 10 аспірантів. Починаючи з 1997 р. кафедра видає науково-технічний журнал «Методи та прилади контролю якості», який є фаховим для науковців спеціальності 05.11.13. За ініціативи співробітників кафедри в ІФНТУНГ створена і успішно функціонує спеціалізована вчена рада для захисту кандидатських і докторських дисертацій зі спеціальності 05.11.13 — Прилади і методи контролю та визначення складу речовин, яку очолює завідувач кафедри МПКЯ і СП.

Приємно констатувати той факт, що у конференції прийняло участь багато колишніх випускників кафедри, серед яких двоє виступили з доповідями по проблемах вирішення і обміну досвідом з виробничих питань, а вісім випускників виступили як молоді науковці-аспіранти. Поряд з цим шість



Рис. 6. Представник НВФ «Ультракон» контролює якість зварного шва корпусу засувки для атомної електростанції в умовах ЗАТ «Івано-Франківський арматурний завод» УЗ дефектоскопом FCAWMIKE



Рис. 7. Фото на пам'ять

випускників були направлені для участі в роботі конференції як провідні фахівці спеціалізованих лабораторій з неруйнівного контролю промислових підприємств області і України.

Не залишилися осторонь і викладачі кафедри, якими було представлено 16 доповідей. А загалом впродовж трьох днів конференції заслухано 42 доповіді, в її проведенні прийняло участь 150 фахівців (із них 98 з інших міст України) із 26 підприємств і організацій України, в тому числі таких загальновідомих, як: НВФ «Ультракон» (м. Київ, директор Павлій І. В.), НВФ «Діагностичні прилади» (м. Київ, директор Павлій О. В.), НВП «ІНТРОН-СЕТ» (м. Донецьк, директор Духовський О. Ю.), НВФ «Зонд» (м. Івано-Франківськ, директор Зінчак Я. М.).

Особливістю конференції було поєднання виступів з виїзними практичними семінарами на підприємства області — Богородчанську компресорну станцію УМГ «Прикарпаттрансгаз» і ЗАТ «Івано-Франківський арматурний завод». Під час виїзних занять фахівцями-розробниками нових сучасних приладів були продемонстровані особливості роботи засобів неруйнівного контролю в реальних умовах виробництва і діагностування лопаток турбін компресорних агрегатів, якості наплення валів їх турбін, ступеня корозійного пошкодження трубопроводів. Особливо цікавим було порівняння результатів практичних досліджень якості зварних з'єднань корпусів засувки для атомних електростанцій, що випускає ЗАТ «Івано-Франківський арматурний завод», одержаних за

допомогою обладнання підприємства та сучасних нових засобів вітчизняного і імпортного виробництва.

Під час роботи конференції працювала виставка спеціалізованих приладів з неруйнівного контролю та технічної діагностики (всього демонструвалося більше 40 приладів та зразків), на якій можна було отримати вичерпну інформацію про їх область застосування і на натурних зразках переконалися в особливостях практичного функціонування кожного з них.

В пленарних і виїзних заняттях активну участь прийняли студенти спеціальності «Прилади і системи неруйнівного контролю» (ПСНК) всіх курсів. При цьому, за їх словами, якщо студенти перших курсів були в захопленні від того, чого їх будуть навчати, то старшокурсники здобули багато практичної інформації стосовно функціонування приладів, задавали безліч запитань фахівцям-виробничникам і всі без винятку отримали пояснення щодо нових засобів неруйнівного контролю, яких ще немає в останніх виданнях спеціалізованих довідників.

За результатами конференції видано матеріали, з якими можна ознайомитися у її учасників і організаторів.

Невід'ємною складовою конференції стали круглий стіл з наукових проблем і культурна програма, під час якої учасники ознайомилися з мальовничою перлиною Прикарпаття — центром туризму області — м. Яремчою.

Накінець, хотілося б особливо подякувати спонсорам конференції ВАТ «Укрнафта», ГПУ «Львівгазвидобування», НВФ «Ультракон», НВФ «Діагностичні прилади», ДК «Укртрансгаз», НГВУ «Чернігівнафтогаз», саме завдяки чий фінансовій підтримці відбулася ця конференція.

Не можна також з вдячністю не згадати інформаційних спонсорів: науково-технічні журнали «Методи та прилади контролю якості», «Розвідка та розробка нафтових родовищ», «В мире НК», «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», які своїми публікаціями сприяли ознайомленню читачів з матеріалами конференції.

За підсумками конференції прийнята відповідна ухвала, в якій сформульовано основні напрямки практичного вирішення питань по розробці, вдосконаленню і практичному застосуванню засобів неруйнівного контролю та покращенню підготовки фахівців цієї галузі.

## УХВАЛА

Заслухавши доповіді, зроблені на засіданнях конференції з 03 по 06.12.2002 р., результати проведених на Богородчанській компресорній станції УМГ «Прикарпатгаз» і ЗАТ «Івано-Франківський арматурний завод» практичних виїзних занять, а також обговоривши представлені на спеціалізованій виставці, що була проведена під час роботи кон-

ференції, технічні засоби з неруйнівного контролю і технічної діагностики різних виробників (НВФ «Зонд», НВФ «Ультракон», НВФ «Діагностичні прилади», НВФ «Ультракон-Сервіс», НВФ «Промприлад», НВФ «ІНТРОН-СЕТ», Сумський ЕТЦ, НВО «Термоприлад», НВФ «Діагностика і контроль» і кафедри «Методи та прилади контролю

якості і сертифікації продукції» (МПКЯ і СП ІФНТУНГ) конференція ухвалила:

1. Проведені науково-технічна конференція і виставка технічних засобів з НК і ТД промислового обладнання сприятимуть використанню і розробці сучасних вітчизняних засобів з НК і ТД, впровадженню їх на промислових підприємствах різних галузей народного господарства України (особливо в нафтогазовій промисловості), а також використанню технічних засобів з НК і ТД закордонного виробництва. Це в цілому підвищить надійність роботи обладнання і зменшить ймовірність виникнення аварійних ситуацій.

2. Вважати доцільним створення на випускних кафедрах за спеціальністю ПСНК вищих навчальних закладів України (НТУ У«КПІ», ІФНТУНГ, Дніпропетровський національний ун-т, Харківський державний технічний ун-т) постійно діючих навчально-технічних центрів з НК і ТД, які б на основі домовленостей між різними виробниками цих засобів і вказаними навчальними закладами були укомплектовані сучасними засобами НК і ТД з метою їх використання як у навчальному процесі із студентами, так і для проведення регіональних семінарів із представниками служб по НК і ТД промислових підприємств відповідних регіонів України.

3. Керівникам служб по НК і ТД промислових підприємств налагодити тісний зв'язок із розробниками і виробниками засобів НК і ТД в Україні з метою розробки і впровадження таких засобів для вирішення конкретних задач по НК і ТД на підприємствах.

4. Завідувачам випускних кафедр за спеціальністю ПСНК проаналізувати навчальні програ-

ми з метою коригування відповідних розділів з урахуванням наявних сучасних засобів по НК і ТД, що були представлені на виставці, матеріалів проведеної конференції, погоджувати ці програми як з виробниками, так і зі споживачами засобів НК і ТД, рекомендувати ініціювати створення науково-методичної ради по спеціальності ПСНК при Міністерстві освіти і науки України.

5. Рекомендувати вказаним вище навчальним закладам України проводити подібні науково-технічні конференції і виставки засобів НК і ТД з метою їх ефективного впровадження на промислових підприємствах інших регіонів України і ознайомлення з ними студентів спеціальності ПСНК цих закладів.

6. Кращі з представлених на конференції доповідей рекомендувати до друку в спеціалізованих журналах «Методи та прилади контролю якості», «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», та в інформаційному бюлетні УТ НК і ТД.

7. Виразити подяку співробітникам ректорату ІФНТУНГ та кафедри МПКЯ і СП цього університету за сприяння, організацію і проведення конференції і виставки; керівникам вказаних вище виробників засобів НК і ТД за представлення засобів на виставку; керівникам компресорної станції «Богородчани» і ЗАТ «Арматурний завод» за надання можливості проведення виїзних занять безпосередньо на технологічному обладнанні промислових об'єктів, керівникам ВАТ «Укрнафта», ДК «Укртрансгаз», НГВУ «Чернігівнафтогаз», ВО «Львівтрансгаз» за спонсорську підтримку в організації і проведенні науково-технічної конференції, а також редакціям наукових журналів за інформаційний супровід.

*Голова оргкомітету науково-технічної конференції,  
ректор ІФНТУНГ, проф. Є. І. Крижанівський*

Труды 1-й Международной научно-практической конференции **«Защита окружающей среды, здоровье, безопасность в сварочном производстве»** (11–13 сент. 2002 г., г. Одесса) / Физ.-хим. ин-т защиты окр. среды и человека. — Одесса: Астропринт, 2002. — 728 с.



Труды содержат материалы 81 доклада, отражающие состояние НИОКР в области экологии сварочного производства, включая физико-химические основы улавливания, нейтрализации, утилизации сварочных аэрозолей; технологические и технические возможности уменьшения выбросов, а также медицинские, экономико-правовые аспекты защиты сварщиков и окружающей среды от воздействия сварочных аэрозолей. Книга может быть полезна инженерно-техническому персоналу, научным работникам, а также аспирантам и студентам.

*Заказы на книгу просьба направлять по адресу:  
65026, г. Одесса, ул. Преображенская, 3, ФХИЗОСич  
Справки по тел.: 23-75-61, 23-11-16,  
e-mail: eksvar@ukr.net, eksvar@hotmail.com*



Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики  
 Национальная академия наук Украины  
 Институт электросварки им.Е.О.Патона НАН Украины  
 ДК "Укртрансгаз" НАК "Нефтегаз Украины"  
 Государственный комитет Украины по надзору за охраной труда  
 Национальный авиационный университет

при поддержке:



## 4-я НАЦИОНАЛЬНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ВЫСТАВКА



## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

19-23 мая 2003, Киев, Украина  
 Институт электросварки им.Е.О.Патона НАН Украины

- Основные темы конференции:**
- теория и практика физических методов контроля сварных конструкций, материалов и изделий
  - компьютерная обработка и моделирование в неразрушающем контроле
  - мониторинг технического состояния и оценка остаточного ресурса объектов при эксплуатации
  - повышение безопасности и надежности эксплуатации промышленных объектов и сооружений
  - проблемы и особенности НК и ТД в энергетике, авиации, металлургии, машиностроении, нефтегазовой отрасли, гражданском строительстве, на железной дороге и др. областях народного хозяйства
  - стандартизация и метрологическое обеспечение в НК и ТД
  - подготовка, обучение и сертификация специалистов в области НК и ТД

Генеральный спонсор:



НПФ "Ультракон-Сервис"

Спонсоры:

Украинский Национальный комитет МТП  
 ДП "Завод им.В.О.Мальшева"  
 Одесский припортовый завод  
 ПНТК "Солар"  
 НПФ "Промсервисдиагностика"  
 НПФ "Специальные Научные Разработки"  
 ДП "Колоран" ИФХ НАНУ

Информационная поддержка:

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА  
 И  
 НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

Контроль.  
 Диагностика

В АН ПЕ НК

Інформаційний  
 бюлетень УТ НКТД

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ  
 КОНТРОЛЬ

[www.usndt.com.ua](http://www.usndt.com.ua)  
[www.ndt.com.ua](http://www.ndt.com.ua)



Оргкомитет:

Украинское общество  
 неразрушающего контроля  
 и технической диагностики

ул. Боженко, 11, 03680, г.Киев-150, ГСП  
 Тел. (+380 44) 227-26-66, 220-94-82, 261-52-49  
 Факс: (+380 44) 220-94-82  
 E-mail: [usndt@ukr.net](mailto:usndt@ukr.net)



## Microlog CMXA 50

Портативный Сборщик Данных/ БПФ Анализатор

**Новейший прибор в поколении портативных сборщиков данных/анализаторов спектра SKF**

Microlog CMXA 50 — это новейшее добавление к поколению портативных сборщиков/анализаторов данных. Двухканальный, на маршрутной основе инструмент, маленького размера, легковесный и прочный. CMXA 50 помещается в одной руке, весит всего 1.7 фунтов (0.715кг) и еще выдерживает падение с 2-метровой (6.6 футов) высоты. Он собирает, хранит и отслеживает вибрацию и другие данные, включая огибающую ускорения — с 4 выбираемыми встроенными фильтрами для улучшения детектирования повреждений подшипников и шестерен. CMXA 50 работает с программным обеспечением SKF Machine Analyst™ (Машинный Аналитик) и PRISM4 для Windows для хранения, более глубокого анализа и заводской отчетности в рамках концепции Asset Efficiency Optimization™ (Оптимизация Эффективности Активов).



### **Скорость, Точность и Усиленный Анализ**

Превосходное качество данных нового Microlog — это результат использования **большого динамического диапазона в 90 dB**, который эффективно увеличивает его возможность по детектированию и определению проблем быстрее и более точно. Скорость сбора данных сильно увеличена за счет того, что обработка цифрового сигнала осуществляется в диапазоне **40 КГц** в режиме реального времени благодаря **24-битному процессору Motorola**. Многоточечная автоматизация в дальнейшем улучшает эффективность сбора данных с возможностью собирать и обрабатывать до 12 параметров измерения в точке при нажатии одной кнопки. Встроенный мультиплексор обеспечивает также поддержку для сбора вибраций сразу в трех направлениях (вертикальном, горизонтальном, аксиальном).

Максимальный частотный диапазон CMXA 50 составляет 40,000 Гц, делая, таким образом, CMXA 50 прекрасным выбором для высокоскоростного детектирования шестерен и подшипников. **Разрешение БПФ составляет 12800 линий**, что дает возможность значительно улучшить отображение данных на дисплее и возможность выделять и идентифицировать компоненты спектра, где два пика могут практически сливаться. Кроме того, **до 10 полос предупреждения** возможно загрузить из ведущего программного обеспечения PRISM4 for Windows или SKF Machine Analyst, чтобы снизить вероятность пропуска важных изменений в машине.

### **Возможности: Два Канала, Балансировка, Измерения Вне Маршрута**

Полномасштабная двухканальная возможность предлагается с CMXA 50 для усиленного анализа. Не фильтруемая и фильтруемая орбита, кросс-канальная фаза, одновременные двухканальные спектры БПФ и временные сигналы. CMXA 50 удовлетворяет вашим основным и повышенным требованиям к одно- и двухканальному анализу. CMXA 50 также обеспечивается программой для двухплоскостной балансировки, дающей возможность устранения одного из наиболее частых источников проблем подшипника и машины. Имеется также модуль немаршрутного сбора данных, предлагающий удобство работы в полевых условиях или изменения загруженных маршрутов.

### **Адаптивность, Удобство и Сбережение Затрат**

CMXA 50 архивирует маршруты и графические изображения с дисплея прибора, сохраняя их на PC Карте ATA-Flash. Это делает возможным сохранять, печатать и сравнивать изображения для дальнейшего анализа или подготовки отчетов.

Пользователи могут также легко сохранять даже очень большие маршруты без необходимости неоднократно предварительно удалять и загружать их, чтобы разместить в ограниченной памяти прибора. Долгий срок службы перезаряжаемых литий-ионных батарей обеспечивает их длительную эксплуатацию.

CMXA 50 классифицирован и сертифицирован по CE и IP 65 (защита от воздействия окружающей среды), CSA и FM (взрывобезопасность) по Классу I, Подразделению 2, Группы A, B, C, D.



## Научно-производственная фирма Специальные Научные Разработки

# СНР

61121, г. Харьков, ул. Светлая, 10, кв.16, тел./факс (0572) 64-36-13,  
тел. (0572) 64-99-85, 26-32-06, e-mail: bezlyudko@yahoo.com

### Приборы и методики неразрушающего контроля и оценки ресурса.



✓ **Коэрцитиметры** – для неразрушающего контроля (по СНГ-стандарту ГОСТ 30415-96) механических свойств, структуры металлопроката, напряженно-деформированного (усталостного) состояния и ресурса конструкций и оборудования из стали и чугуна, контроля режимов термообработки, сортировки по маркам и т.д. Портативные цифровые приборы с сетевым (**КРМ-Ц**) или автономным питанием (**КРМ-Ц-К2М** и **КРМ-Ц-К3**). Микропроцессорный (**КРМ-Ц-К3**) вариант измеряет, кроме коэрцитивной силы, и другие параметры предельной петли гистерезиса образца (индукцию насыщения, остаточную индукцию, релаксационную коэрцитивную силу и др.), имеет большую память данных.

**КРМ-Ц-МА** – магнитный анализатор – приставка к ПЭВМ для исследования предельной и частных петель образца (простой и практичный аналог баллистических установок БУ).

*Методики технического диагностирования и ресурса грузоподъемных кранов и сосудов давления согласованы Госгортехнадзором РФ.*



✓ **Магнитометры** – для контроля остаточной намагниченности деталей, торцов труб, для контроля полей в магнитопорошковой дефектоскопии и "магнитной загрязненности" рабочих мест и оборудования, для измерения параметров постоянных магнитов и т.д.:

– вариант **КРМ-Ц-Т** – для измерения постоянных полей, **КРМ-Ц-Т1** – с сигнализацией характерного порога допустимой при сварке остаточной намагниченности 30 Гс, **КРМ-Ц-ТД** – с локализацией аномалий естественной намагниченности металлоконструкций как мест вероятного зарождения эксплуатационных дефектов (так называемая "магнитная память");  
– вариант **КРМ-Ц-ТМ** – процессорный универсальный магнитометр для переменных, постоянных, импульсных полей, с памятью данных и каналом связи с ПЭВМ.

*Удобный датчик-щуп или приставной датчик на выносном кабеле.*



✓ **Бесконтактный толщиномер-дефектоскоп КРМ-Ц-Дельта** – ультразвуковой ЭМА-прибор, работает при температурах от -25°C и по горячему металлу в несколько сот градусов, без контактной жидкости, без специальной зачистки поверхности, по краске или через воздушный зазор около 1 мм, с погрешностью не более 0,1 мм, с отображением на экране зондирующего и донных импульсов, с запоминанием всех эхограмм и передачей их по каналу связи в ПЭВМ для документирования результатов контроля.

Все приборы имеют портативное и автономное исполнение, **госповерку, сертификат Госстандарта Украины и России, включены в их Госреестры**, пригодны для широкого применения рядовым персоналом в сложных условиях эксплуатации.

Все приборы имеют также вариант мощного стационарного исполнения для работы в технологических линиях цехов металлургических комбинатов, в составе АСУТП.

**Наши приборы – это мировая методическая и техническая новизна при хорошем сочетании цена/эффективность, годовая гарантия и последующее сервисное обслуживание, с обучением персонала особенностям эксплуатации.**

# ТЮФ Рейнланд/Берлин-Бранденбург

## Управление по Центральной и Восточной Европе



Наиболее важная задача TÜV CERT, независимой организации по сертификации, состоит в том, чтобы своими международными сертификатами содействовать экономическому успеху клиентов и становлению гармонических отношений с окружающей средой.

Для достижения этих целей:

- ▶ Независимая организация по сертификации TÜV CERT принимает участие в разработке методик и требований к компетенции на международном уровне.
- ▶ Для сохранения своей независимости и объективности организация применяет одни и те же методы и систему требований ко всем своим партнерам.
- ▶ Аудиторы организации по сертификации TÜV CERT осуществляют проверку на языке данной страны.
- ▶ Специальные аудиторы TÜV CERT являются экспертами полномочного органа Германии, и они осуществляют также сертификацию продукции.
- ▶ Организация по сертификации TÜV CERT использует систему качества, аккредитованную независимыми организациями по сертификации.
- ▶ Организация по сертификации TÜV CERT прилагает весомые финансовые и интеллектуальные усилия для обучения своих аудиторов и экспертов, постоянного совершенствования их профессиональной компетентности.

Достижения независимой организации по сертификации TÜV CERT в Центральной и Восточной Европе:

- ▶ TÜV CERT выдана подавляющая часть сертификатов по группе стандартов ISO 9000 в странах этого региона.
- ▶ Бюро по сертификации расположены в Брюсселе, Будапеште, Киеве, Москве.
- ▶ Организация координирует работу свыше 1000 аудиторов и экспертов различных национальностей в данном регионе.

Организация предоставляет широкий спектр услуг:

- ▶ Сертификация систем управления качеством по стандартам ISO 9000, QS 9000, VDA 6.1, ISO/TS 16949.
- ▶ Сертификация систем управления окружающей средой по стандарту ISO 14001.
- ▶ Сертификация систем охраны здоровья и безопасности рабочих мест по стандарту BS 8800.
- ▶ Сертификаты HACCP.
- ▶ Сертификация интегрированных систем управления предприятием.
- ▶ Методика сертификации — согласно Европейским Директивам.

Подразделения стран Центральной и Восточной Европы концерна «ТЮФ Рейнланд/Берлин-Бранденбург» трудятся для того, чтобы обеспечить возможность предприятиям и организациям, осуществляющим деятельность в сфере производства, дистрибуции, предоставления услуг, присоединиться к деловым кругам, действующим на международном рынке. Благодаря нашим услугам, отвечающим современному уровню, мы помогаем клиентам адекватно реагировать на проблемы рынка. Мы помогаем им стать активными участниками, а не жертвами глобализации рыночных процессов.

ТЕХНИКА  
ИНЖЕНЕРНЫХ  
СООРУЖЕНИЙ

БЕЗОПАСНОСТЬ  
ПРОДУКЦИИ

БЕЗОПАСНОСТЬ  
АВТОТРАНСПОРТНЫХ  
СРЕДСТВ

СИСТЕМА  
СЕРТИФИКАЦИИ

Украина, 01014, г. Киев  
ул. С. Струтинского, 6, оф. 701  
тел.: (044) 254-24-31  
факс (044) 294-62-13  
E-mail: tuvnlk@carrier.kiev.ua  
www.tuv.com

SKF Condition Monitoring



## Портативные Приборы SKF MicroVibe™

MicroVibe™ — новейший портативный вибрационно-измерительный прибор SKF, позволяющий проводить современный анализ состояния роторных машин. Благодаря своим измерительным качествам, низкой стоимости, компактности, маленькой массе, MicroVibe™ является первым вибрационно-измерительным прибором, который совместим с Palm PC (карманным компьютером). Прибор оснащен всеми необходимыми функциями, включая выбираемую пользователем систему единиц измерения (Английская, Метрическая); набор инструментов измерения: Общие Уровни Вибрации, Временная Волна, Спектры БПФ. В прибор также заложены критерии сравнения получаемых данных с допустимыми уровнями вибрации согласно стандартам ISO.



SKF Reliability Systems Представительство SKF Eurotrade AB в Украине  
Украина 01033, г. Киев, ул. Гайдара, 22.  
тел. +38(044) 2302889, 2302890; факс +38(044) 2302140  
E-mail: SKF.ukraine@skf.com; www.skfcm.com; www.reliability.com

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

#### ПРОВОДИТ



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

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

#### АТТЕСТУЕТ

специалистов неразрушающего контроля по следующим методам:

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



#### ИЗГОТАВЛИВАЕТ

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

03680, г. Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 17  
Тел.: (044) 261-51-75; 261-51-83





## НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА «ПРОМСЕРВИСДИАГНОСТИКА»

Тел./факс: (044) 227-88-13, 261-54-74. Телеграммы: Киев 5, СТЫК. Телетайп: 132174, СТЫК

Наша фирма на протяжении многих лет, используя собственную материальную базу и современные методы неразрушающего контроля и оценки результатов испытаний, проводит работы по техническому диагностированию сосудов, работающих под давлением; резервуаров для хранения нефтепродуктов, реагентов и химической продукции; грузоподъемных механизмов; паровых, водонагревательных котлов и котлов-утилизаторов; технологического оборудования нефтеперерабатывающих заводов, газонефтепроводов и нефтепродуктопроводов; сооружений, установок и оборудования нефтегазовых промыслов; систем подготовки нефти и газа к транспортировке, АГНКС; криогенного оборудования (Разрешение № 575.01.30-31.62.3, выданное Государственным департаментом по надзору за охраной труда 21.07.2001 г.), а также выполняет работы по ремонту грузоподъемных кранов, наливных емкостей и сосудов, работающих под давлением (Разрешение № 118.02.18 от 19.07.02).

За это время специалисты фирмы провели с субподрядчиками исследования характера расслоений газовых сепараторов, исследовали причины разрушений подземных магистральных трубопроводов, сосудов высокого давления с технологическими обвязками, резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов, технологического оборудования и газораспределительных станций ОАО «Укрнафта» (НГДУ «Охтырканефтегаз»), ДП «Харьковтрансгаз» и других предприятий, обнаружили десятки единиц оборудования, имеющего опасные дефекты, и устранили их.

**При наличии с Вашей стороны предложений по диагностированию технологического оборудования, а также по ремонту особо ответственных объектов с использованием ремонтных сварочных технологий — мы готовы к сотрудничеству.**



# ИЗОТОП



**Неразрушающий контроль:**  
**Дефектоскоп АРИНА-3**  
 (50 мм по стали)  
**Толщиномеры покрытий**

**Рентгенографическая пленка и химикаты**  
**РТ-4, РТ-1В, Структурикс D4, D7 (AGFA)**

Экраны усиливающие, эталоны чувствительности,  
 УШС-3, УШР-1,2 3, наборы для цветной  
 магнитопорошковой диагностики

**03680, ГСП, Киев, ул. Горького, 152, тел./факс (044) 268-90-00**  
**E-mail: [ndt@izotop.kiev.ua](mailto:ndt@izotop.kiev.ua)**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «КОЛОРАН»  
ИНСТИТУТА ФИЗИЧЕСКОЙ ХИМИИ ИМ. Л.В. ПИСАРЖЕВСКОГО  
НАН УКРАИНЫ**



ГП «КОЛОРАН» является основным предприятием в Украине по разработке и серийному выпуску отечественных экологически чистых материалов для цветной и люминесцентной капиллярной дефектоскопии. Материалы отпускаются в аэрозольной упаковке в виде наборов и в обычной расфасовке.

Материалы поставляются в виде наборов «ИФХ-КОЛОРАН-4», «ИФХ-КОЛОРАН-5», «ЦМ-В КОЛОРАН-Т» в состав которых в разных комбинациях могут входить жидкость ЦЖ-1, ЦЖ-2, проявитель ПРМ-1, ПРМ-4, ПРМ-4Т (высокотемпературный), очиститель ОЖМ-1, жидкость ЛЖ-6Ам. Материалы для цветной и люминесцентной дефектоскопии производятся в соответствии с ТУ

У 21585720-048-99, ТУ У 21585720-049-99, ТУ У 21585720-050-99, ТУ У 21585720-053-01.

ГП «КОЛОРАН» разработан отраслевой стандарт ОСТУ 3-026-2002 «Контроль неразрушающий. Капиллярные методы контроля материалов, полуфабрикатов, деталей, изделий авиационной техники», который введен в действие распоряжением Минпромполитики Украины от 09.01.2003 г. № 3 с 01.03.2003 г.

ГП «КОЛОРАН» производит портативные дефектоскопические комплекты «МАГЭКС» для магнито-порошкового контроля сварных соединений, конструкций из ферромагнитных материалов. Комплекты «МАГЭКС-1м», «МАГЭКС-2», «МАГЭКС-3» выпускаются с намагничивающими устройствами на постоянных магнитах и обеспечивают высокую выявляемость поверхностных и подповерхностных (до глубины 2–3 мм) несплошностей всех видов (уровень чувствительности А по ГОСТ 21105-87). Комплекты «МАГЭКС» просты, надежны, удобны для работы в полевых условиях, при проведении высотных монтажных работ, при контроле качества внутренней поверхности емкостей, трубопроводов и т.д.



ГП «КОЛОРАН» предлагает комплексное решение проблем антикоррозионной защиты сварных соединений ответственных конструкций (трубопроводов энергоблоков АЭС на межремонтный период), а также материалы для герметизации и контроля резьбовых и фланцевых соединений трубопроводов, заделки поверхностных микротрещин и т.д.

Тел./факс: (044) 265-95-29

E-mail: m\_kazakevich@ukr.net



**ЗАО Технический комитет  
«Спецмонтаж»**

**Где работает:**

- ✦ техническое диагностирование и паспортизацию строительных конструкций, в том числе нефтеналивных резервуаров, в соответствии с действующими нормативно-техническими документами.

**Разрабатывает:**

- ✦ автоматизированные системы технического диагностирования строительных конструкций;
- ✦ проекты ремонта и проекты выполнения ремонтных работ по восстановлению, реконструкции и усилению строительных конструкций, находящихся в эксплуатации.

**Существляет:**

- ✦ специальную подготовку к аттестации специалистов I и II уровней по визуально-оптическому методу НК в системе ГНОТ;
- ✦ подготовку и аттестацию специалистов строительной отрасли по вопросам охраны труда;
- ✦ деятельность в сфере стандартизации в области монтажных и специальных строительных работ.

**Сказывает методические пособия:**

- ✦ при подготовке предприятий к лицензированию строительной деятельности;
- ✦ при аттестации испытательных лабораторий.

**Аттестует в системе ГНОТ:**

- ✦ специалистов на I и II уровне по радиационному, ультразвуковому, визуально-оптическому методам НК в производственных секторах 1–5, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 16;
- ✦ руководителей сварочных работ;
- ✦ членов аттестационных комиссий по аттестации сварщиков;
- ✦ Сварщиков;
- ✦ сварочные технологии.

ТК «Спецмонтаж» имеет права на выполнение указанных работ, подтвержденные лицензиями и разрешениями на начало работ.



03680, Киев, ул. Семья Сосниных, 7А

тел. (044) 476-19-37, т/ф. 477-93-52

<http://tks.com.ua> e-mail: [office@tks.com.ua](mailto:office@tks.com.ua)



## ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ НА ЖУРНАЛЫ ИЭС ИМ. Е.О. ПАТОНА:

«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

4 выпуска в год, подписной индекс 74475, тел.: (044) 261 58 81, 269 26 23;

«Автоматическая сварка»

12 выпусков в год, подписной индекс 70031, тел.: (044) 227 63 02, 269 26 23;

«Современная электрометаллургия»

4 выпуска в год, подписной индекс 70693, тел.: (044) 269 26 23, 268 34 84,

(с 1985 по 2002 гг. журнал издавался под названием «Проблемы специальной электрометаллургии»);

«The Paton Welding Journal»

перевод на английский язык журнала «Автоматическая сварка»,

12 выпусков в год, подписной индекс 21971, тел.: (044) 269 26 23, 227 63 02;

«Advances in Electrometallurgy»

перевод на английский язык журнала «Современная электрометаллургия»

4 выпуска в год, тел.: (044) 269 26 23, 268 34 84

Подписка в Украине по каталогам агентств:

«Пресса» ♦ «Идея» - тел.: (044) 568 5715 ♦ «KSS» - тел.: (044) 464 0220 ♦ «САММИТ» - тел.: (044) 254 5050

Подписка в Российской Федерации по каталогу агентства «Роспечать»

Подписка через редакции журналов на годовые комплекты,

отдельные выпуски и статьи, в т.ч. в электронном виде (600 dpi, \*.pdf формат)

<http://www.nas.gov.ua/pwj>

### Расценки на размещение рекламы в журналах:

«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»,  
«Автоматическая сварка»,  
«Современная электрометаллургия»,  
«The Paton Welding Journal»  
«Advances in Electrometallurgy»

### Стоимость рекламы на обложке, в USD

Страницы	Размер, мм	Полноцветная	Одноцветная
1	188×198	500	—
2	200×290	350	315
3	200×290	300	270
4	200×290	400	360

### Стоимость блочной рекламы на внутренних страницах

Площадь	Размер, мм (ширина×высота)	Цена, USD	
		черно-белая	цветная
1 полоса	170×250	80	200
1/2 полосы	170×125	40	—
1/4 полосы	170×60	20	—
1/6 полосы	80×80	15	—

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

Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу

**Статья** на правах рекламы — 50% стоимости рекламной площади

**Скидки** при размещении рекламы в двух (и более) журналах ИЭС согласовываются дополнительно

**Скидки** на размещение рекламы при единовременной оплате:

Количество подач	3	6	12
■ Скидка	10 %	25 %	33 %

**Требования** к оригинал-макетам:

Формат журнала после обрезки 200×290 мм

**Черно-белые:**

TIF grayscale 300 dpi для фотоизображений, TIF bitmap 600 dpi для графики

**Цветные:**

TIF CMYK 300 dpi

**Сопроводительные материалы:**

обязательна черно-белая распечатка файла

**Носители:**

дискеты 3,5"

CD-ROM, переносной HD



## Международная выставка-ярмарка Сварка. Родственные технологии—2003

20.05–23.05.2003

«Международный выставочный центр»  
Броварской просп., 15, Киев, Украина

Міжнародна виставка-ярмарок  
«Зварювання. Споріднені технології—2003»  
Київ, 20.05–23.05.2003

International Fair  
«Welding. Related Processes—2003»  
Kyiv, 20.05–23.05.2003

Международная выставка-ярмарка  
«Сварка. Родственные технологии—2003»  
20.05–23.05.2003 г.

### Организаторы выставки-ярмарки:



Научно-технический комплекс  
«ИЭС им. Е. О. Патона»



Общество сварщиков Украины



Экспоцентр «Наука»

### При поддержке:

Национальной академии наук Украины,  
Министерства промышленной политики,  
Киевской государственной городской  
администрации,  
ЗАО «Международный  
выставочный центр»

### При содействии

Программы развития ООН



Дополнительную информацию Вы можете получить в НТК «ИЭС им. Е. О. Патона»:  
Тел: (38-044) 268-1254, 227-1238, 268-3523 Тел./факс: (38-044) 227-6502, 495-2616 [expo@paton-expo.kiev.ua](mailto:expo@paton-expo.kiev.ua) [www.paton-expo.kiev.ua](http://www.paton-expo.kiev.ua)

Подписано к печати 26.02.2003. Формат 60×84/8. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 7,5. Усл. кр.-отт. 8,75. Уч.-изд. л. 8,86.  
Типография фирмы «Эссе». 03142, г. Киев, пр. Вернадского, 34/1.