

**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.),  
Н. П. Алешин, А. И. Бондаренко,  
В. Л. Венгринович, А. А. Грузд,  
А. Т. Зельниченко, М. Л. Казакевич,  
О. М. Карпаш, В. В. Клюев,  
А. А. Лебедев, Л. М. Лобанов,  
Г. Г. Луценко, З. Т. Назарчук,  
Н. В. Новиков, Г. И. Прокопенко,  
В. А. Стороженко, В. А. Стрижало,  
В. Г. Тихий, В. Н. Учанин,  
С. К. Фомичев, Н. Г. Чаусов,  
В. Е. Щербинин

#### Адрес редакции

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

#### Научные редакторы

Н. Г. Белый, А. А. Грузд

#### Редактор

Т. В. Юштина

#### Электронная верстка

Л. Н. Герасименко, Д. И. Серета

Свидетельство  
о государственной регистрации  
КВ4787 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.

### СОДЕРЖАНИЕ

НОВОСТИ..... 3

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

*ЛОБАНОВ Л. М., ПИВТОРАК В. А., САВИЦЬКИЙ В. В., КИЯНЕЦЬ І. В., ТХОР О. В.* Розробка технології та апаратури для діагностики методом електронної широгографії елементів тонкостінних конструкцій, виготовлених із застосуванням точкового зварювання ..... 5

*МИЦИК Б. Г., МУРАВСЬКИЙ Л. І., ДЕМ'ЯНИШИН Н.М., КАРПЛЮК Ю. М.* Засоби неперервного моніторингу деформацій крупногабаритних об'єктів тривалої експлуатації ..... 10

*СКАЛЬСЬКИЙ В. Р., СТАНКЕВИЧ О. М., КЛИМ Б. П., ПОЧАПСЬКИЙ Є. П.* Особливості програмного забезпечення акустико-емісійних засобів діагностування (Огляд. Повідомлення 2) ..... 16

*УЧАНИН В. Н.* Вихретоковые накладные преобразователи: расширенная классификация, сравнительный анализ и характерные примеры реализации (Обзор) ..... 24

*КОЛБІН І. Б., ВОЛКОВ Ю. О.* Спосіб виявлення площинних відбивачів, орієнтованих в напрямі, близькому до напряму поширення поздовжніх ультразвукових хвиль (1. Експериментальне вивчення можливості виявлення площинних дефектів з орієнтацією, близькою до орієнтації акустичної осі перетворювача) ..... 31

*СМОЛИНА А. А., ПОГОРЕЛОВ А. А.* Количественная оценка остаточных напряжений методом магнитной структуроскопии ..... 36

*БИДА Г. В.* Размер зерна и корреляция прочностных, пластических и вязких свойств с коэрцитивной силой сталей с феррито-перлитной структурой ..... 40

#### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

*СИДОРОВ В. А., СУШКО А. Е.* Выбор диагностических параметров стационарных систем контроля технического состояния металлургических машин ..... 46

*ТИМОФЕЕВ В. А.* Проблемы неразрушающего контроля деталей буксового узла колесной пары и их влияние на безопасность движения ..... 51

#### ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

Обучение и аттестация специалистов по НК ..... 58

Українському товариству неруйнівного контролю та технічної діагностики – 20 років ..... 59

18-я Международная конференция «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» ..... 61

Оценка риска аварий при эксплуатации опасных производственных объектов ..... 65

#### ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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



Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

# TECHNICAL DIAGNOSTICS and NON-DESTRUCTIVE TESTING

№ 4, 2010

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.),  
N. P. Aleshin, A. I. Bondarenko,  
V. L. Vengrinovich, A. A. Gruzd,  
A. T. Zelnichenko, M. L. Kazakevich,  
O. M. Karpash, V. V. Klyuev,  
A. A. Lebedev, L. M. Lobanov,  
G. G. Lutsenko, Z. T. Nazarchuk,  
N. V. Novikov, G. I. Prokopenko,  
V. A. Storozhenko, V. A. Strizhalo,  
V. G. Tikhy, V. N. Uchanin,  
S. K. Fomichev, N. G. Chausov,  
V. E. Shcherbinin

### Address

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

### Scientific editors

N. G. Bely, A. A. Gruzd

### Editors

T. V. Ushtina

### Electron galley

L. N. Gerasimenko, D. I. Sereda

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.

## CONTENT

NEWS ..... 3

### SCIENTIFIC-TECHNICAL

*LOBANOV L.M., PIVTORAK V.A., SAVITSKII V.V., KIYANETS I.V., TKHOR O.V.* Development of technology and equipment for diagnostics by the method of electron shearography of elements of thin-walled structures made with application of spot welding ..... 5

*MITSIK B.G., MURAVSKII L.I., DEMYANISHIN N.M., KAPLYUK Yu.M.* Methods of continuous monitoring of deformations of large-sized objects in long-term service ..... 10

*SKALSKII V.R., STANKEVICH O.M., KLIM B.P., POCHAPSKII E.P.* Features of software for acoustic-emission diagnostic means (Review. Information 2) ..... 16

*UCHANIN V.N.* Eddy current overlay transducers: expanded classification, comparative analysis and characteristic examples of realization (Review) ..... 24

*KOLBIN I.B., VOLKOV Yu.O.* Method of revealing plane reflectors oriented in the direction close to that of propagation of longitudinal ultrasonic waves (1. Experimental study of the possibility of determination of plane defects with orientation close to that of transducer acoustic axis) ..... 31

*SMOLINA A.A., POGORELOV A.A.* Qualitative assessment of residual stresses by the method of magnetic structuroscopy .. 36

*BUDA G.V.* Grain size and correlation of strength, plasticity and toughness properties with coercive force of steels with ferrito-pearlitic structure ..... 40

### INDUSTRIAL

*SIDOROV V.A., SUSHKO A.E.* Selection of diagnostic parameters for stationary systems of monitoring the technical condition of metallurgical machines ..... 46

*TIMOFEEV V.A.* Problems of non-destructive testing of parts of axle-box wheel pair and their influence on traffic safety ..... 51

### NEWS AND INFORMATION

Training and certification of NDT specialists ..... 58

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics is 20 ..... 59

18<sup>th</sup> International conference «Modern methods and means of non-destructive testing and technical diagnostics» ..... 61

Assessment of accident risk in operation of critical production facilities ..... 65

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

Technical Committee on standardization «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» TCU-78



Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics

## СИСТЕМА АЭ ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА ЕМА-3.5

Новые технологии оценки состояния метариалов, новые возможности при автоматизированном контроле ответственных конструкций в процессе эксплуатации и периодических испытаний.

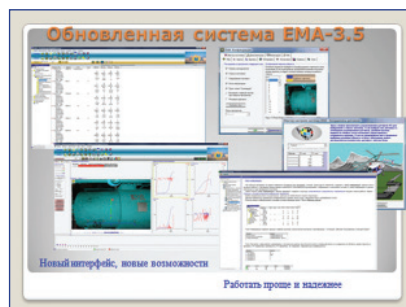
Системы акустико-эмиссионной (АЭ) диагностики и мониторинга ЕМА-3.5 (ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, отдел «Техническая диагностика сварных конструкций») включают быстродействующую измерительную аппаратуру для получения АЭ информации, и программное обеспечение (ПО), реализующее современную технологию оценки состояния конструкций в процессе эксплуатации.



Метод основан на том, что в процессе деформирования в местах нагруженных конструкций, где зарождается и происходит разрушение, возникают акустические волны, которые затем распространяются по материалу и могут быть зарегистрированы специальными датчиками. Обработка и анализ этой информации позволяют определять координаты дефектов и задолго до разрушения судить об их опасности. Системы ЕМА используют передовые компьютерные технологии для передачи данных и интеграции с компьютерными сетями предприятий и Интернета, включая использова-

ние GPRS в сетях операторов мобильной связи, и могут быть построены на базе АЭ приборов различных производителей, унифицированных по протоколу обмена с используемым ПО. Измерительный блок аппаратуры, как правило, поставляется с 16 датчиками АЭ и 16 дополнительными низкочастотными каналами для измерения сопровождающих испытания параметров. Число измерительных каналов и датчиков АЭ по желанию заказчика может быть увеличено.

**Программное обеспечение** систем ЕМА-3.5 предназначено для управления диагностической аппаратурой в процессе испытаний, обработки результатов испытаний, генерации предупреждений о наступлении опасного состояния материала, прогнозирования разрушающих нагрузок и остаточного ресурса, взаимодействия с компьютерными сетями предприятий и Интернетом. Построено на основе компонентной технологии и позволяет легко наращивать возможности системы. Обеспечивает автоматизацию типовых задач, выбор способа графического отображения информации на экране, графики реального времени, позволяющие отображать до 64 параметров, использование технологии XML для представления диагностических данных, сортировку и фильтрацию данных по заданным признакам, их экспорт и обработку в Microsoft Excel.



Системы ЕМА проходит проверку на базе ЦСМ Госпотребстандарта Украины. Государственные стандарты Украины и

нормативные документы, согласованные с Госгорпромнадзором Украины, обеспечивают их применение в промышленности. Осуществляется обучение и сертификация специалистов по применению систем, обслуживание и сопровождение аппаратуры и ПО в процессе их эксплуатации. Все большее распространение на предприятиях Украины приобретают системы непрерывного мониторинга ЕМА-3S, предназначенные для постоянного отслеживания состояния оборудования и агрегатов, обеспечивающие их безопасную эксплуатацию, существенное снижение риска аварий, сокращение числа плановых остановов и внештатных ситуаций.

## ИСПЫТАНИЯ НОВОЙ НИЗКОЧАСТОТНОЙ УЗ СИСТЕМЫ

Специалистами отдела неразрушающих методов контроля ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ впервые в Украине проведены полевые испытания новой **низкочастотной УЗ системы для оперативной оценки технического состояния трубопроводов путем обнаружения коррозионного поражения и износа стенки трубы на ее внутренней и наружной поверхности**. Испытания проводили на открытых участках газопроводов в г. Ялта. В системе используются низкочастотные ультразвуковые направленные волны, которые распространяются вдоль трубы в одну или обе стороны на десятки метров от места установки акустической антенны.



**Технические характеристики  
УЗ системы:**

- Диаметр контролируемых труб – 50...300 мм
- Тип колебаний — крутильные (мода Т(0,1))
- Дальность контроля – до 50 м (в зависимости от покрытия и состояния трубы)
- Разрешающая способность ~ 30 см
- Время установки акустической антенны – 3...5 мин
- Питание системы – автономное

**ПОРТАТИВНЫЕ  
ВИХРЕТОКОВЫЕ  
ДЕФЕКОСКОПЫ  
ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ  
ДЕФЕКТОВ**

В Физико-механическом институте им. Г.В. Карпенко НАН Украины совместно с Центром «Леотест-Медиум» (Львов) разработаны и налажено производство **серии вихретоковых дефектоскопов типа ЛЕОТЕСТ ВД (ВД 3.01; ВД 3.02 и ВД 3.03)**. Дефектоскопы предназначены для выявления поверхностных трещин в деталях из ферромагнитных сплавов (алюминиевые, титановые сплавы, аустенитные стали и т.п.) и ферромагнитных сталей. Дефектоскопы обеспечивают высокую чувствительность к коротким и неглубоким дефектам, в том числе усталостным трещинам; высокую локальность контроля, что необходимо для контроля деталей с малым радиусом кривиз-



ны, например, в зоне галтельных переходов, в зоне заклепок или на внутренней поверхности отверстий. В приборах реализована полная отстройка от изменений зазора между датчиком и контролируемой поверхностью, а также отстройка от края изделия. Прибор имеет автономное питание, легкий и удобный в работе в полевых условиях и условиях аэродромов.

Для применения в нефтегазовой промышленности, энергетике и транспорте дефектоскопы снабжаются специальными датчиками с широкой зоной контроля, что позволяет успешно контролировать детали с грубообработанной поверхностью, в частности, литье.

Дефектоскопы типа **ЛЕОТЕСТ ВД 3.01-3.03** прошли государственные испытания и включены в Госреестр Украины средств измерительной техники (№ У2403-07) и регламент по техническому обслуживанию самолетов «АНТОНОВ».

Дефектоскопы используются, в частности, на АНТК «АНТОНОВ», на Львовском, Севастопольском и Конотопском авиаремонтных заводах, Московском вертолетном заводе им. Миля, ОАО «Мотор-Сич», ЗМКБ «Прогресс», ГПУ «Львівгазвидобування», Карпатском ЭТЦ.

Элементы схемы и датчики дефектоскопов типа ЛЕОТЕСТ ВД защищены патентами Украины № 39207, № 39217, № 42132 и № 42176 .

**ВИХРЕТОКОВЫЙ  
ТОЛЩИНОМЕР  
ПОКРЫТИЙ ТП-101.2**

ООО «Компания «МИКРОН» разработан толщиномер покрытий **ТП-101.2**, предназначенный для измерения толщин неэлектропроводящих (лаки, краски и другие диэлектрики) покрытий, нанесенных на любую проводящую (разные марки стали, а также цветные металлы) поверхность. Толщиномер мо-

жет применяться в лабораторных и цеховых условиях. Измерение осуществляется путем установки вихретокового преобразователя (ВП) на контролируемую поверхность без дополнительных зазоров. Способ сканирования ручной, путем перестановки ВП без скольжения его по поверхности.



**ИМПЕДАНСНЫЙ  
ЭКСПРЕСС ТЕСТЕР  
«ТЭРИ»**

ООО «Votum» выпущен прибор **ТЭРИ**, разработанный для применения в гражданской авиации и предназначенный для импедансного экспресс-контроля многослойных паяных, клеевых композитных материалов и конструкций с сотовым наполнителем на наличие дефектов типа расслоение или непроклей. В ТЭРИ процесс настройки полностью автоматизирован. Необходимо лишь установить преобразователь на бездефектный участок и прибор самостоятельно выставит необходимое значение порога срабатывания сигнализации дефекта.





# РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТА АПАРАТУРИ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННОЇ ШИРОГРАФІЇ ЕЛЕМЕНТІВ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТОЧКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

Л.М. ЛОБАНОВ, В.А. ПІВТОРАК, В.В. САВИЦЬКИЙ, І.В. КИЯНЕЦЬ, О.В. ТХОР

*Проведені експерименти, за результатами яких встановлена залежність величини відстані між екстремумами кривої зміни похідної в околі зварної точки від діаметра її ядра. Характер кривих зміни похідної в околі зварної точки під дією механічного навантаження, що отримані методом електронної широкографії, підтверджені математичним моделюванням. Виконані дослідження довели, що метод широкографії можна застосовувати для неруйнівного визначення діаметра ядра зварної точки в з'єднанні, яке виконане контактним точковим зварюванням.*

*Experiments were conducted, the results of which were used to establish the dependence of the distance between extremums of the curve of derivative variation in the vicinity of spot weld on its nugget diameter. Nature of derivative variation curves in the weld nugget vicinity under the impact of mechanical load generated by the method of electron shearography, was confirmed by mathematical simulation. Performed research proved that the shearography method can be applied for non-destructive determination of weld nugget diameter in a joint made by resistance spot welding.*

Останнє десятиліття характеризується інтенсивним розвитком неруйнівних методів контролю якості конструкцій, створюються нові та удосконалюються відомі методи, активно впроваджується комп'ютерна техніка, створено широку гаму приладів різноманітного цільового призначення. Новим методом, який інтенсивно розвивається, є електронна широкографія, яка із стадії лабораторних застосувань перейшла на етап практичного використання і зайняла надійне місце не тільки в дослідних лабораторіях, але і в ряді галузей промисловості [1, 2].

Суть методу широкографії полягає у наступному [3, 4]. Поверхня об'єкта дослідження частково або повністю освітлюється когерентним лазерним променем. Розсіяне дифузною поверхнею об'єкта світло, що створює спекл-структуру, проходить крізь зсувний елемент і фокусується у площині зображення CCD-камери. На матриці камери формується пара поперечно зсунутих зображень об'єкта. Ці два зображення інтерферують одне з одним, створюючи картину, яка вводиться до комп'ютерного блоку. Порівняння двох широграм, які були записані до та після незначного навантаження об'єкта, дає можливість отримати інтерферограму, яка характеризує деформацію поверхні об'єкта, обумовлену його навантаженням.

Електронна широкографія є ефективною для неруйнівного контролю якості, коли присутність дефекту в контрольованій ділянці об'єкта викликає аномальну деформацію поверхні об'єкта при його навантаженні (нагріванні, розтягуванні, стисканні тощо). Ця аномалія виявляється внаслідок локальної зміни картини інтерференційних смуг і характеризується кривою розподілу похідної  $dw/dx$  або

$dw/du$  ( $w$  — переміщення із площини об'єкта по нормалі до контрольованої поверхні) уздовж обраних перерізів. При цьому екстремуми, які виникають в кривій зміни похідної, характеризують присутність дефектів на контрольованій ділянці. В залежності від оптичної схеми, що використовується під час експериментів, метод широкографії дозволяє окремо визначати як депланаційні деформації, так і площинні [5, 6].

В автомобіле-, машинобудуванні тощо при виготовленні тонкостінних конструкцій широко використовується точкове зварювання. Працездатність таких конструкцій залежить від якості зварних точок, які сприймають експлуатаційне, механічне та температурне навантаження. Безпека експлуатації та підвищення їх працездатності потребують розробки та впровадження високопродуктивних і достовірних методів неруйнівної діагностики конструкцій.

Важливим для забезпечення якісного зварного з'єднання є контроль розміру ядра зварної точки. Відомо, що при однакових параметрах точкового зварювання розмір ядра зварної точки може змінюватись, залишаючи практично без зміни відбиток електрода на поверхні листів, що зварюються. В зв'язку з цим актуальним є розробка неруйнівної методики контролю розміру ядра зварної точки.

З метою вибору ефективного способу навантаження зварного точкового з'єднання були виконані експерименти з використанням теплового та механічного навантаження. Для виконання експериментів з тепловим навантаженням був виготовлений пристрій закріплення зварного зраз-

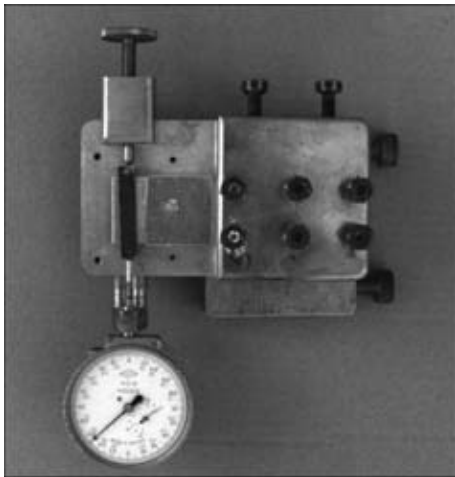


Рис. 1. Загальний вигляд навантажувального пристрою для визначення діаметра ядра зварної точки з використанням механічного навантаження

ка розмірами 125×37 мм, що виготовлений із сталі 14Г2 товщиною 1,2 мм, з затисненням його по контуру. Це дозволило обмежити його розширення при нагріванні та створити деформації в зоні зварної точки. В якості навантаження використовували обдув теплим повітрям за допомогою промислового фена, при цьому час обдуву складав від 20 до 30 с, а температура підігрітого повітря 60 °С.

Аналіз результатів проведених експериментів показав, що термічне навантаження може бути використане під час якісного контролю зварних точок. У випадку необхідності виконання кількісної оцінки діаметра ядра зварної точки використання термічного навантаження стає неефективним, оскільки важко досягти дозованого теплового вкладу з високою повторюваністю під час виконання експериментів на різних зразках в умовах оточуючого середовища, що можуть змінюватися. Тому в якості метода навантаження під час проведення експериментів з кількісної оцінки діаметра ядра зварної точки був обраний механічний спосіб.

Для проведення експериментів з використанням механічного способу навантаження було розроблено та виготовлено навантажувальний пристрій, що наведений на рис. 1. Пристрій являє собою корпус, що зібраний із двох пластин відповідної форми, в якому розміщені елементи кріплення зразка, вузол навантаження та вузол кріплення індикатора годинникового типу (точність вимірювання 0,001 мм).

В розробленому пристрої досліджуваний зразок фіксувався за допомогою жорсткого кріплення поперечної кромки, що дозволило отримати досить великі пружні переміщення елементів зварного з'єднання. Розроблений та створений пристрій для механічного навантаження дозволив виконати серію експериментів із навантаження зварних зразків з досить високою точністю та

повторністю. Визначені величини навантаження залишалися в області пружного деформування поверхні навколо зварної точки для всіх величин діаметра ядра.

Методика кількісної оцінки діаметра ядра зварної точки полягає в наступному. Зразок являє собою дві металеві пластини розмірами 125×37 мм, які поєднані зварною точкою (рис. 2, а). Якщо поперечну кромку першої пластини жорстко закріпити (зона А), а навантаження прикласти на другу пластину (зона В), тоді на першу пластину деформування передається тільки через ядро зварної точки. Якщо навантаження дозоване, тоді чим більше діаметр ядра, тим більшою буде область деформування поверхні першої пластини в околі зварної точки. Таким чином, отримавши методом ширографії графік зміни похідних  $\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)$  в околі зварної точки на першій пластині, можемо визначити залежність величини діаметра ядра зварної точки від кривої розподілу цих похідних уздовж вибраного перерізу.

Виконані дослідження дозволили визначити залежність параметрів деформування від величини діаметра ядра при певному навантаженні  $P$ . Результати експериментів показали, що розмір діаметра ядра зварної точки корелює з величиною відстані поміж двома екстремумами графіка зміни похідних  $\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)$  від компонент вектора переміщення  $(u, w)$  уздовж обраних напрямків  $x$  або  $y$  під час тестового навантаження зварного точкового з'єднання.

У випадку прикладення навантаження  $P$  до зони В на зварну точку діє крутильний момент, який передається також на першу пластину. При цьому в околі точки превалює деформування пластини в площині  $XOY$ . Тому була обрана оптична схема експерименту (рис. 2, б), що дозволяє реєструвати площинні деформації уздовж вісі  $OY$ . Лазерне випромінювання освітлювало досліджувану ділянку зразка під кутом 60° від нормалі до поверхні зразка, а ширографічна камера розміщувалась уздовж нормалі до досліджуваної поверхні.

Дослідження проводили на зразках двох типів: зі сталі 08КП товщиною 1,0 мм (12 шт.) та сталі 14Г2 товщиною 1,2 мм (12 шт.). Початкове навантаження для всіх зразків було обране таким, аби контрольовані переміщення нижньої кромки складали 30 мкм, а величина робочого навантаження дозволяла отримати загальне переміщення 60 мкм. При таких величинах переміщень, у випадку діаметра ядра зварної точки 4 мм, значення початкового навантаження складало 20,4 Н, а робочого 40,8 Н. Загальний вигляд апаратури для визначення діаметра ядра зварної точки з

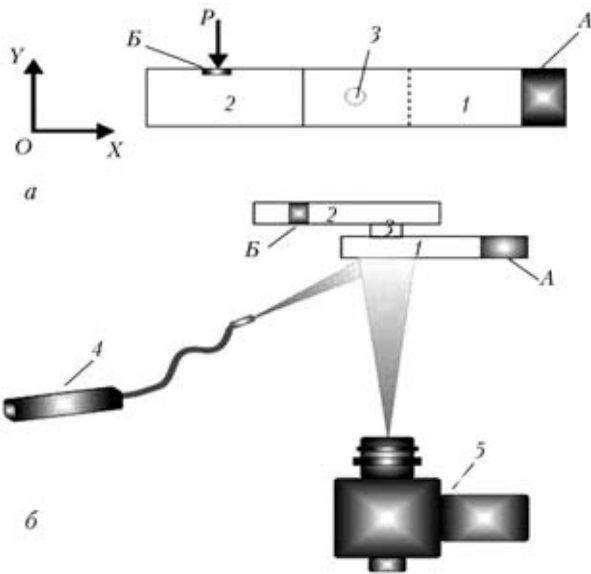


Рис. 2. Схема експерименту, який виконувався для кількісної оцінки діаметра ядра зварної точки: а — схема навантаження зразка; б — оптична схема експерименту; 1, 2 — відповідно передня та задня металева смуга; 3 — зварна точка; 4 — лазер із світловодом; 5 — ширографічний модуль (А — зона кріплення зразка; Б — зона прикладення навантаження Р)

використанням механічного способу навантаження наведені на рис. 3.

При фіксованому переміщенні нижньої кромки пластини 2 відстань поміж екстремумами графіку змін похідних  $\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)$  пластини 1 залежить від розміру ядра зварної точки: чим більший діаметр ядра, тим більша відстань поміж екстремумами. Результати, що отримані під час контролю зразків з використанням механічного навантаження, наведені на рис. 4.

Програмне забезпечення дозволяло отримувати трьохвимірну картину деформування поверхні в околі зварної точки на пластині 1, а також бу-

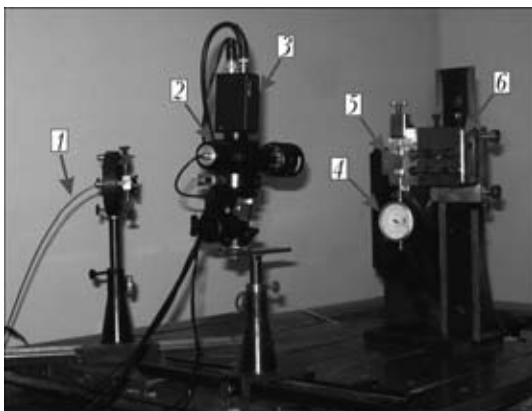


Рис. 3. Загальний вигляд апаратури для визначення діаметра ядра зварної точки з використанням механічного способу навантаження: 1 — світловод; 2 — широмодуль; 3 — CCD-камера; 4 — індикатор годинникового типу; 5 — досліджуваний зразок; 6 — навантажувальний пристрій

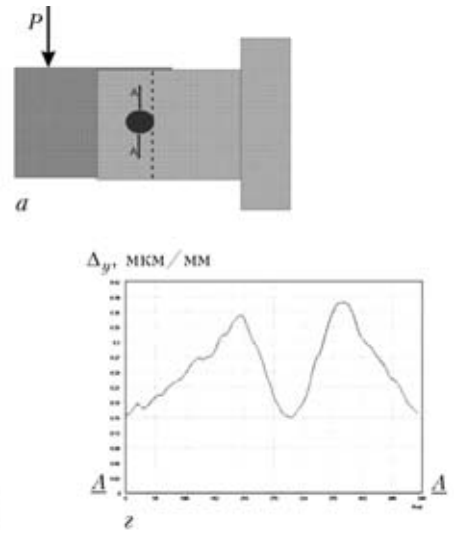


Рис. 4. Оцінка діаметра ядра зварної точки досліджуваного зразка із сталі 3 під дією механічного навантаження Р: а — схема навантаження зразка з позначеною досліджуваною ділянкою; б — широграма досліджуваної ділянки зразка; в — трьохвимірна картина деформування поверхні; г — графік зміни похідної  $\partial u/\partial y$  уздовж перерізу А-А

дувати криву розподілу похідних  $\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)$  уздовж обраного напрямку (рис. 4). З наведених результатів можна бачити, що графік зміни похідних  $\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)$  має вигляд кривої з двома виразними екстремумами. Відстань між екстремумами є тією величиною, що характеризує розмір зварної точки, тобто діаметр ядра зварної точки.

Для визначення реальних розмірів ядра зварних точок зразки, що досліджуються, були зруйновані за допомогою скручування однієї пластини відносно іншої. На рис. 5 представлені фотографії зварних точок після руйнування. Чітко видно структуру зварної точки, ядро, зону термічного впливу, область вигорілого цинку та наявні раковини. Наведені фотографії зварних точок на зразках з різними величинами діаметрів ядра.

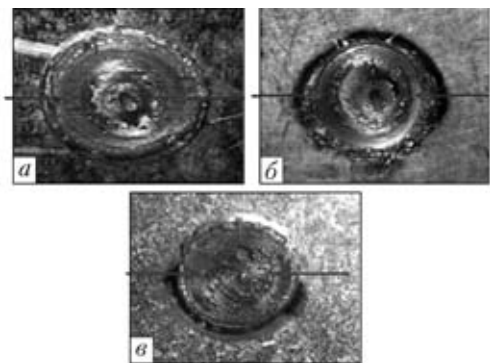


Рис. 5. Фотографії зварних точок після руйнування: а, б — відповідно зразки із сталі 3 товщиною 1, 2 мм; в — зразок із сталі 09Г2С товщиною 1 мм

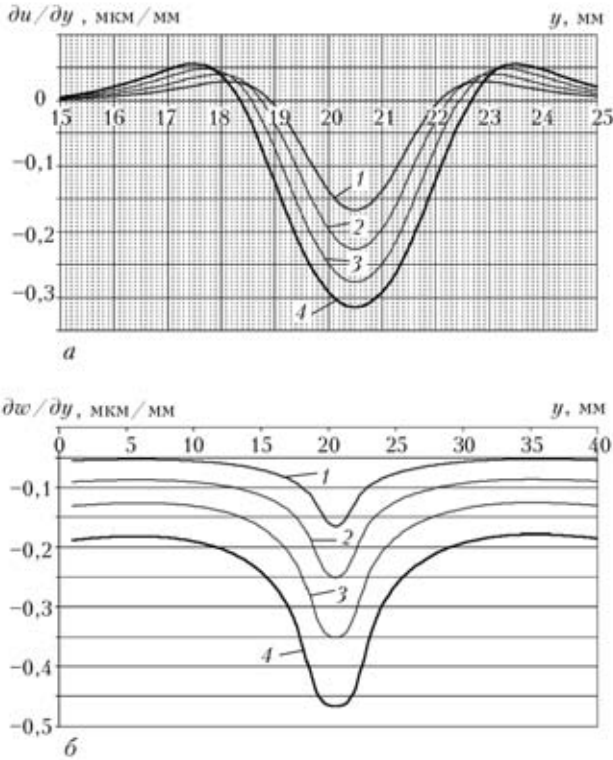


Рис. 6. Значення компонент  $du/dy$  (а) та  $dw/dy$  (б) вздовж центрального перерізу пластини 1 ( $l - D = 2,5$ ; 2 — 3,0; 3 — 3,5; 4 — 4,0 мм)

Для підтвердження правильності запропонованої методики та отриманих результатів було виконане математичне моделювання деформування досліджуваних зразків при їх механічному навантаженні. Оскільки для задачі чисельного моделювання потрібно було створити розбивку на елементи і області зварної точки, а після її вирішення обробити великий масив даних, для цього були розроблені та написані спеціальні програми, які дозволяють із необхідними параметрами проводити розбивку на елементи, задавати граничні умови, а також автоматизувати процес обробки результатів обчислень. Після обчислень отримано такі залежності компонентів переміщень  $u$  та  $w$  від координати  $y$  (рис. 6), на яких чітко проявляються два максимуми, що розташовані симетрично щодо центра точкового з'єднання, а відстань між максимумами прямо пропорційна діаметру точкового з'єднання (рис. 7).

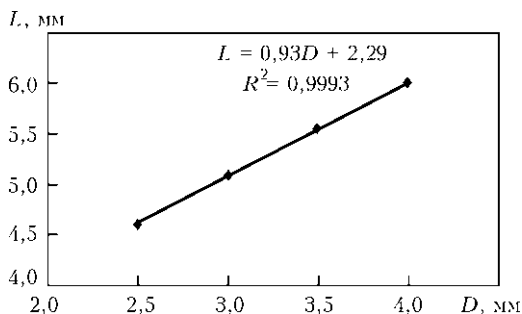


Рис. 7. Залежність відстані  $L$  між точками максимуму значень  $\Delta u$  від діаметра зварної точки  $D$

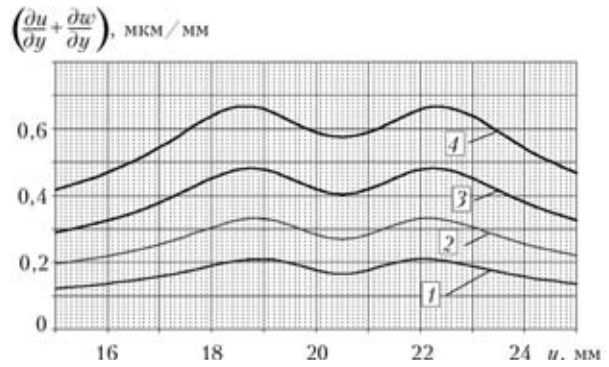


Рис. 8. Профіль деформування поверхні в околі точкового з'єднання уздовж центрального перерізу (1 —  $D = 2,5$ ; 2 — 3,0; 3 — 3,5; 4 — 4,0 мм)

Використовуючи розрахункові дані, можна обчислити значення різниці фаз  $\Delta$  за формулою:

$$\Delta_y = \frac{2\pi}{\lambda} \left( C_1 \frac{\partial u}{\partial y} + C_2 \frac{\partial v}{\partial y} + C_3 \frac{\partial w}{\partial y} \right) \delta y,$$

де  $\lambda$  — довжина хвилі лазерного випромінювання;  $C_1, C_2, C_3$  — коефіцієнти, які визначаються геометрією оптичної схеми;  $\delta y$  — ширографічний зсув у напрямку вісі  $OY$ .

На основі отриманого графіка (рис. 8) можна стверджувати, що існує кореляція діаметра точкового з'єднання з відстанню між максимумами на кривій зміни похідної, що реєструється методом електронної ширографії.

Таким чином, виконані експериментальні дослідження, які спрямовані на визначення оптимального способу навантаження елементів конструкцій, виготовлених точковим зварюванням. Аналіз результатів проведених експериментів показав, що термічне навантаження може бути використане під час якісного контролю зварних точок. У випадку необхідності виконання кількісної оцінки діаметра ядра зварної точки використання термічного навантаження стає неефективним, оскільки важко досягти дозованого теплового вкладу з високою повторністю під час виконання експериментів на серії зразків в температурних умовах оточуючого середовища, що можуть змінюватись.

Розроблений та створений пристрій для механічного навантаження дозволив виконати серію експериментів із тестування зварних зразків з досить високою точністю та повторністю. Визначені величини навантаження залишалися в області пружного деформування поверхні навколо зварної точки для всіх величин діаметрів ядер. Аналіз даних, які отримані за допомогою математичного моделювання, показав, що використання кривої зміни похідних уздовж вибраного перерізу точкового з'єднання, отриманого за допомогою методу електронної ширографії, дозволяє однозначно визначити діаметр зварної точки.





1. Колдрен Й., Кнупка Р., Зиберт Т. Применение ширографии для контроля деталей в аэрокосмической промышленности // В мире неразруш. контроля. — 2007. — № 2. — С. 28–31.
2. Hung Y.Y., Ho H.P. Shearography: an optical measurement technique and applications // Materials Sci. and Eng. — 2005. — R49. — P. 61–87.
3. Методика, технология и аппаратура ширографического неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций / Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, И.В. Киянец, Е.М. Олейник // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2004. — № 3. — С. 29–33.
4. Оперативный контроль качества и определение остаточных напряжений в сварных конструкциях методами электронной ширографии и спекл-интерферометрии / Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, Г.И. Ткачук и др. // Автомат. сварка. — 2005. — № 8. — С. 14–19.
5. Неруйнівний контроль якості конструкцій, виготовлених із металевих і композиційних матеріалів, методом електронної ширографії / Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, П.Д. Кротенко, І.В. Киянець // Тр. 8-й Міжнар. симпозиума українських інженерів-механіків, 23–25 травня 2007р., м. Львів
6. Диагностика элементов и узлов конструкций с применением метода электронной ширографии / Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, Е.М. Савицкая, И.В. Киянец // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 4. — С. 7–13.

Ін-т електросварювання ім. С.О.Патона НАН України,  
Київ

Надійшла до редакції  
20.09.2010



## Новости УО НКТД

Делегация УО НКТД приняла участие в 18-й Международной ежегодной конференции и выставке «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» состоявшейся в Ялте с 4 по 8 октября 2010 г.

Организаторы конференции: УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ» (Киев), НПП «Машиностроение» (Днепропетровск), Украинское общество НКТД. Генеральный спонсор: МЧТПП «ОНИКО» (Киев).

В конференции приняли участие более 150 специалистов из всех регионов Украины, а также из России, Республики Беларусь, Узбекистана, Литвы, Великобритании, Германии, Болгарии и др. стран.

Участники представили свои доклады на двух секциях: «Современные методы и средства НК в промышленности», «Диагностика состояния промышленных объектов».

Особый интерес специалистов вызвал состоявшийся в рамках конференции Международный научно-технический семинар «Ультразвуковой контроль ответственных объектов с использованием современных технологий ультразвукового контроля TOFD, LRUT, УТРА». Данные технологии УЗ контроля широко используются за рубежом, однако в Украине еще недостаточно известны. Для ознакомления отечественных специалистов с особенностями применения методов низкочастотного УЗ контроля протяженных объектов направленными волнами, а также использования технологии фазированных решеток при УЗ контроле объектов с ограниченным доступом на семинар были приглашены руководители европейских научных проектов «Long-Range Ultrasonic Condition Monitoring» и «ShipInspector» Peter Mudge и Phil Catton из Британского института сварки TWI, а также президент Болгарского общества неразрушающего контроля проф. Митко Миховски, специалисты Института механики Болгарской академии наук Александр Алексиев и Йордан Мирчев. В выполнении обоих проектов участвует Украинское общество НКТД.

Состоялись также семинары «Неразрушающий контроль и техническая диагностика оборудования АЭС, находящихся в эксплуатации», «Об опыте сертификации специалистов НК в соответствии с требованиями международных и национальных стандартов», «Диагностика и ремонт металлургического оборудования», в которых принимали участие представители УО НКТД.





# ЗАСОБИ НЕПЕРЕРВНОГО МОНІТОРИНГУ ДЕФОРМАЦІЙ КРУПНОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Б.Г. МИЦИК, Л.І. МУРАВСЬКИЙ, Н.М. ДЕМ'ЯНИШИН, Ю.М. КАРПЛЮК

*Розроблено методику виготовлення елементів «ємність–кераміка–метал», на базі якої створено компактні деформометри дистанційної дії класу точності 0,01 для діапазонів переміщень від 0–0,1 до 0–5,0 мм. Пропоновані деформометри за точністю і температурною стабільністю більші як на порядок переважають кращі світові аналоги.*

*A procedure was developed for manufacturing "capacitance-ceramics-metal" elements, which was the basis for making compact remote strain meters of 0.01 accuracy class for displacement ranges from 0.01 up to 0.50 mm. Proposed strain meters are more than by an order of magnitude superior to the best world analogs in terms of accuracy and temperature stability.*

Сучасні методи оцінки експлуатаційного ресурсу об'єктів тривалої експлуатації на основі моніторингу деформацій цих об'єктів вимагають створення засобів вимірювання з підвищеною точністю. До таких об'єктів слід віднести корпуси морських суден; турбогенератори ТЕС; крупногабаритні промислові будівельні конструкції; геофізичні станції; гідротехнічні споруди та ін.

Існуючі засоби вимірювання деформації мають надто низьку точність. Так, типові похибки плівкових вимірювачів деформації, так званих тензометрів, складають близько 3 %. Крім того, ці похибки зростають при тривалій дії експлуатаційних факторів, що обмежує застосування таких вимірювачів для вирішення промислових задач. Високою точністю характеризуються лазерні інтерферометричні деформометри [1, 2] (близько 0,1 % діапазону вимірювання), однак неконтрольовані похибки довгочасової експлуатації та температурна і вібраційна нестабільність роблять такі деформометри також непридатними для довгочасового моніторингу народно-господарських об'єктів. Кращі світові аналоги деформометрів, придатних для такого моніторингу (наприклад, вимірювачі поздовжньої деформації УПТ-1, ДДИ, ДДН; Росія), мають надто низьку точність (основна похибка 0,5–1,0 %) при ціні близько \$ 3000.

Пропоновані в роботі особливо точні ємнісні деформометри дистанційної дії характеризуються похибкою 0,01 % в діапазонах вимірювання від 0–0,1 до 0–5 мм, мають високу температурну і часову стабільність, і саме вони можуть бути базою для створення ефективної методики оцінки ресурсу безпечного функціонування дорогих об'єктів тривалої експлуатації. Новий якісний результат деформаційного моніторингу можна отримати також за допомогою цифрового спекл-корелятора (ЦСК), оскільки ЦСК-деформометри дозволяють визначати поверхневі переміщення ви-

браних ділянок об'єкта з абсолютними похибками порядку десятків нанометрів і будувати відповідні поля деформацій. Об'єктивна оцінка ресурсу безпечної експлуатації важливих народно-господарських об'єктів на основі еволюції їх одномірних і поверхневих деформацій, в тому числі передбачення їх руйнування при дії на них несприятливих експлуатаційних і природних факторів, має важливе економічне і соціальне значення.

**Деформометри високого класу точності: оптичний і ємнісний.** Принцип побудови оптичного деформометра є таким, як і вимірювача тиску класу точності 0,01, описаного в роботі [3]. Тиск деформує мембрану первинного перетворювача, шторка якої перекидає однорідний світловий пучок. Пріоритетна схема автокалібрування фотоелектричного каналу, який сформований оптоелектронною парою світлодіод–фотоприймач, зводить температурну похибку оптопарі практично до нуля. Розробка деформометра звелась до заміни жорсткої мембрани на м'яку, сильфоноподібну і приєднання до неї штока, який передає переміщення об'єкта. При високих технічних характеристиках первинні перетворювачі (ПП) такого типу деформометрів мають два суттєві недоліки: по перше, механічне збурення об'єкта і первинного перетворювача, що погіршує такі метрологічні показники як точність і додаткова температурна похибка; по друге, малий діапазон переміщень ( $\pm 0,5$  мм). Другий аргумент є вирішальним, оскільки більшість відомих задач точного вимірювання переміщень передбачають роботу в діапазонах від 0–1 до 0–5 мм.

Ці задачі можуть успішно вирішуватись при використанні пропонованих ємнісних деформометрів дистанційної дії. Їх робота базується на тому, що при наближенні металу чи діелектрика до неекранованої ємності  $C_x$ , створеної двома провідниками чи металевими пластинами,  $C_x$  змінює



(зменшує) свою величину. Цей принцип використаний в роботах [4, 5] при створенні пристроїв сигналізації, а в [6, 7] — при створенні деформометрів. Однак в цих роботах не йдеться про високий клас точності, описуються лише технічні рішення вимірювачів переміщення. Заслугове на увагу серійний прилад безконтактного вимірювання переміщень в діапазонах від 0–0,2 до 0–5 мм (тип VT5200/5700, фірма «ONO SOKKI», Японія). Але низький клас точності приладу (0,25) та велика температурна похибка (0,5 % на 10°) обмежують його застосування для вирішення задач точного моніторингу деформацій крупногабаритних об'єктів тривалої експлуатації.

Мета даної роботи — створити ємнісні особливо точні деформометри дистанційної дії на діапазони переміщень від 0–0,1 до 0–5 мм з наступними основними характеристиками: основна похибка 0,01 %; роздільна здатність (шкала приладу) 0,001 % (10<sup>5</sup>); додаткова температурна похибка близько 0,02 % на 100°; діапазон робочих температур від –30 до +200 °С; ефекти старіння в межах 0,01 % відсутні.

**Вибір матеріалів для первинних перетворювачів (ПП).** При виготовленні ПП ємнісних деформометрів використані вузли титан–кераміка (рис. 1). Титан і титанові сплави мають коефіцієнт термічного розширення  $\alpha = 8-9 \cdot 10^{-6}$  1/град [8], співмірний з коефіцієнтом  $\alpha$  глиноземної кераміки 22ХС. Тому вплив температури на жорсткі вузли титан–кераміка зумовлює відносно невеликі напруження на межі взаємодії двох таких матеріалів. З'єднання вказаних матеріалів здійснено за допомогою склокристалічного матеріалу, спеціально розробленого для виготовлення вузлів титан–кераміка [9]. Такий матеріал має коефіцієнт  $\alpha$ , співмірний з титаном і керамікою, а також невелику текучість при дії механічних напружень, зумовлених впливом температури на

вузол титан–склокомполімер–кераміка. Тому вказані напруження мінімізуються і не призводять до таких негативних ефектів, як велика температурна похибка дрейфу, похибка гістерезису термоциклу, похибка старіння, в тому числі під час дії десятків термоциклів в експлуатаційному діапазоні зміни температури  $T$  (в місцях кріплення первинних перетворювачів на Добротвірській ТЕС, на якій заплановано натурні випробовування деформометрів, зміна температури відбувається в діапазоні 10–80 °С). Крім того, розроблений склокристалічний матеріал [9] має високу адгезію як до вибраного титанового сплаву, так і до кераміки 22ХС, що забезпечує високу механічну надійність виготовлених вузлів.

Вибрана кераміка має наступні важливі характеристики [10]: малу вагу (густина  $\rho = 3,6$  г/см<sup>3</sup>), високу механічну міцність на стиск і розтяг ( $\sigma_c = 2500$  МПа,  $\sigma_b = 1900$  МПа; за цими параметрами кераміка 22ХС переважає більшість марок високоякісних сталей і титанових сплавів [8]), високу міцність на згин ( $\sigma_{ii} = 300$  МПа), великий питомий опір ( $10^{13}-10^{16}$  Ом·см). Останній параметр має особливо важливе значення, оскільки саме провідність керамічних елементів ПП, а особливо температурна залежність провідності є причиною неконтрольованої нестабільності вихідного сигналу ємність–напруга, в тому числі причиною неповторюваності характеру температурної залежності робочої характеристики ПП. Така неповторюваність виключає можливість точної компенсації температурних похибок ПП на основі сигналу термодавача. Зовнішній вигляд керамічних і титанових деталей для первинних перетворювачів деформометра приведено на рис. 2.

Основні технологічні операції, використані для створення ПП ємнісних деформометрів, зводяться до наступного: пресування деталей із глиноземного (корундового) матеріалу; обпалювання (близько 1450–1600 °С) і спікання (близько 1800 °С) деталей; шліфування, полірування, глазурування керамічних циліндрів і пластин; нанесення електродів із високотемпературної (750 °С)

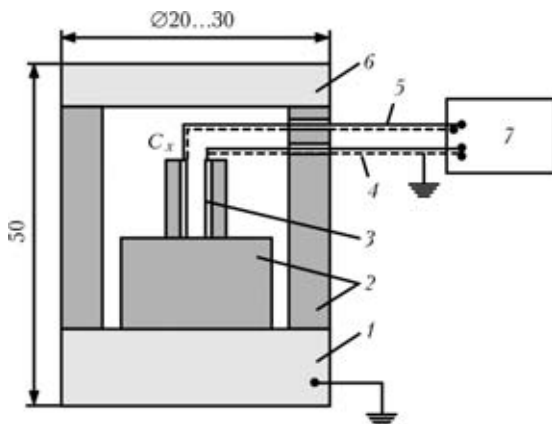


Рис. 1. Схема ПП ємнісного дистанційного деформометра: 1 — титанова основа, зв'язана з екраном вимірювача  $C_x$ ; 2 — керамічні циліндри; 3 — впалені електроди зі срібної пасти; 4 — екран блока електроніки (БЕ); 5 — екрановані провідники; 6 — захисна титанова пластина; 7 — БЕ



Рис. 2. Зовнішній вигляд основних деталей корпусів ПП (діаметр керамічних циліндрів 30 мм)



Рис. 3. Зовнішній вигляд ПП

срібної пасти; виготовлення склокристалічного матеріалу для з'єднання вузлів кераміка-титановий сплав; розробка температурно-часових режимів для з'єднання вузлів кераміка-титан. Зовнішній вигляд ПП емнісних деформометрів наведено на рис. 3.

**Характеристика власної ємності деформометра.** Важливе значення має вибір кераміки для створення власної ємності ПП. Головною вимогою до такої кераміки є висока температурна стабільність діелектричної проникності  $\epsilon_i$ , відповідно, стабільність ємності  $C_x$  конденсатора, створеного на керамічній пластині. В таблиці подані значення ємності двох ідентичних пластин, виготовлених із глиноземної кераміки «Полікор», при різних температурах. Відносна температурна зміна ємності розрахована як  $\beta = \delta C_x(T)/C_x(T_0)$ , де  $T_0$  — кімнатна температура. Можна відзначити наступне: температурна залежність  $C_x$  незначна і не перевищує величини  $\beta = 1,25\%$  на  $100^\circ$ ; нелінійність залежності  $C_x(T)$  (рис. 4) складає  $\beta_n = 4\%$  величини температурної зміни  $C_x$ , тому компенсаційним методом на основі сигналу термодавача можна зменшити температурну похибку  $\beta$  в  $N = 100\% : 4\% = 25$  разів (де  $100\%$  — повна зміна  $C_x$  від температури, а  $4\%$  — величина нелінійності  $C_x$  від  $T$ , рис. 4) і звести температурний дрейф вихідного сигналу до величини близько  $0,05\%$  на  $100^\circ$ . Такий результат є відмінною ха-

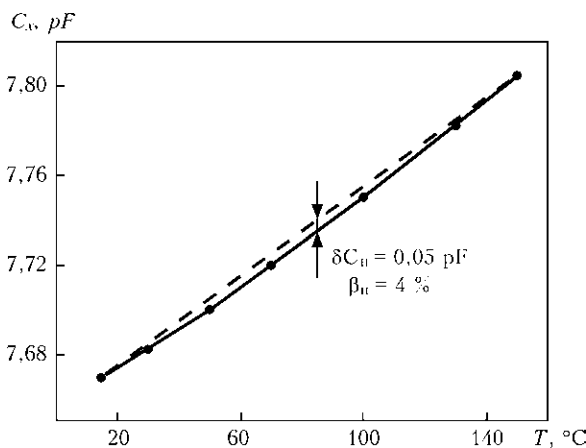


Рис. 4. Температурна залежність ємності полікорової пластини № 2

рактеристикою кераміки «Полікор» і тому дозволяє використовувати її для створення власної ємності деформометра. Крім того, вказана кераміка має малі діелектричні втрати ( $\text{tg}\delta \leq 1 \cdot 10^{-5}$  в межах точності використаного вимірювального приладу). Більше того, до температур близько  $100^\circ\text{C}$  величина  $\text{tg}\delta$  не змінюється (див. таблицю). Така стабільність діелектричних втрат забезпечує повторюваність характеру  $T$ -залежності вихідного сигналу деформометра, відсутність температурного гістерезису для температур до  $100^\circ\text{C}$ , що дозволяє з високою точністю компенсувати похибки температурного дрейфу вихідного сигналу до вказаної вище величини (близько  $0,05\%$  на  $100^\circ$  зміни  $T$ ). На високу діелектричну якість кераміки «Полікор» вказує також те, що температурні характеристики  $C_x$  і  $\text{tg}\delta$  для двох довільно вибраних пластин із партії близько 30 штук є практично тотожними (див. таблицю). Що стосується кераміки 22ХС, то її відповідні характеристики дещо поступаються кераміці «Полікор», тож перевагу при створенні власної ємності ПП деформометра слід віддати останній.

На основі даних таблиці можна розрахувати температурний коефіцієнт зміни діелектричної проникності вибраної кераміки. Для цього визначимо зміну  $C_x$  за рахунок термічного розширення керамічної пластини, скориставшись очевидним співвідношенням для температурної зміни ємності плоского конденсатора

$$\delta C_x = C_x(T) - C_x(T_0) = \frac{\epsilon \epsilon_0 S_0 \alpha \Delta T}{d_0}, \quad (1)$$

де  $S_0$  і  $d_0$  — відповідно площа і товщина керамічної пластини при кімнатній температурі  $T_0$ ;  $\epsilon_0$  — електрична стала;  $\alpha$  — коефіцієнт термічного розширення;  $\Delta T$  — зміна температури.

Із (1) і виразу  $C_x(T_0) = \epsilon \epsilon_0 S_0 / d_0$  знаходимо відносну зміну ємності, зумовлену температурною зміною розмірів пластини  $\beta_p = \delta C_x / C_x(T_0) = \alpha \Delta T$ . Оцінку  $\beta_p$  проведемо, виходячи із наступних вихідних даних:  $\Delta T = 100^\circ$ ,  $\alpha = 7,5 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$  [10]. Отримаємо:  $\beta_p = 0,075\%$  на  $100^\circ$ . Це мізерна величина зміни  $C_x$ . Все інше зумовлене  $T$ -залежністю діелектричної проникності  $\epsilon$ . Віднявши від  $\epsilon$  величину  $\beta_p$ , отримаємо величину

**Ємність, її відносна температурна зміна та діелектричні втрати двох полікорових пластин розмірами  $10 \times 11 \times 1$  мм при різних температурах  $T$**

$T, ^\circ\text{C}$	$C_{x1}, \text{пФ}$	$\beta, \%$	$\text{tg}\delta, \cdot 10^{-5}$	$C_{x2}, \text{пФ}$	$\beta, \%$	$\text{tg}\delta, \cdot 10^{-5}$
15	7,758	0	0	7,670	0	0
30	7,771	0,17	0	7,683	0,17	0
50	7,788	0,39	0	7,700	0,39	0
70	7,809	0,66	0	7,720	0,65	0
100	7,839	1,04	0	7,750	1,04	0

відносної температурної зміни  $C_x$  за рахунок  $T$ -залежності  $\epsilon$ :  $\beta_\epsilon = 1,25\% - 0,075\% \approx 1,18\%$  на  $100^\circ$  зміни  $T$ .

Відзначимо, що при  $T \gg 100^\circ\text{C}$  швидкість зміни  $\epsilon$  і  $C_x$  при зміні  $T$  набагато збільшується, суттєво проявляються нелінійні ефекти як щодо  $C_x$ , так і щодо діелектричних втрат (див. таблицю). Тому отримати ємнісний ПП з хорошими метрологічними характеристиками для вказаних температур є, звичайно, проблемною задачею. В рамках даного проекту діапазон експлуатаційних температур є таким ( $10\text{--}80^\circ\text{C}$ ), що дозволяє на основі полікорової кераміки створити високостабільну власну ємність ПП і досягти в цьому діапазоні температур високих метрологічних характеристик деформометра.

**Температурна стабільність оптимізованих ПП.** При розміщенні власної ємності  $C_x$  деформометра в корпусі первинного перетворювача вона зменшується на близько 25% за рахунок взаємодії з металевими і діелектричними деталями ПП. Однак така взаємодія дає і позитивний ефект: зменшується величина і нелінійність температурного дрейфу  $C_x$  (рис. 5). Зміна ємності в температурному інтервалі  $20\text{--}100^\circ\text{C}$  складає  $\Delta C_x(T) = 0,004$  пФ або у відносних одиницях  $\beta = 0,004/5,274 \equiv 0,075\%$  на  $80^\circ$ , що тотожне величині  $\beta = 0,095\%$  на  $100^\circ$  зміни  $T$ . Корисна модуляція ємності в діапазоні переміщення  $0\text{--}2$  мм складає  $\Delta C_x^k = 2,0$  пФ. Відповідно, відносно  $\Delta C_x^k$  отримаємо температурний коефіцієнт зміни ємності  $\beta^k = 0,004/2,0 \equiv 0,2\%$  на  $80^\circ$  або  $0,25\%$  на  $100^\circ$  зміни  $T$ . Лінійність залежностей  $C_x(T)$  (рис. 5) і  $\Delta C_x^k(T)$  дозволяє на основі сигналу термодавача звести відповідну похибку вихідного сигналу деформометра до величини  $\sim 0,01\%$  на  $100^\circ$ . Слід звернути увагу й на те, що амплітуда і характер залежності  $C_x(T)$  не змінюються при дії кількох десятків термоциклів в температурному інтервалі  $20\text{--}120^\circ\text{C}$ , в тому числі при дії термоударів (зміна  $T$  на  $100^\circ$  за час близько 5 хв). Це додатково підтверджує високу температурну стабільність ПП, а також малу імовірність старіння ПП при тривалій дії експлуатаційних температур.

**Робочі характеристики ємнісних ПП.** На рис. 6 подана робоча характеристика (РХ) первинного перетворювача в координатах  $C_x$  (пФ) –  $l$  (мм) та  $l^{BE} - l$ , де  $l$  – віддаль до об'єкта, а  $l^{BE}$  – індикація віддалі на дисплеї блока електроніки (БЕ). Бачимо, що РХ має велику нелінійність ( $\beta_n = 35\%$ ), яка є недоліком створених ємнісних деформометрів, однак не принциповим. В роботі використано два способи лінеаризації РХ, які дозволяють звести  $\beta_n$  до значення  $0,01\%$ . Спершу лінеаризація проводиться аналітичним мікропроцесорним методом за допомогою функції  $y =$

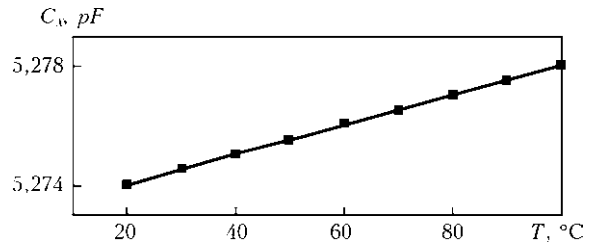


Рис. 5. Приклад температурної залежності ємності ПП

$f(x)$ , де  $y$  – вихідний сигнал блока електроніки в мм ( $y \equiv l^{BE}$ ),  $x = l$  – реальне переміщення, яке вводиться у мікропроцесор. Останній подає вихідний сигнал  $y = f(x) = l^{BE}$  на індикатор чи у канал вихідного інтерфейсу. На рис. 6 подано приклад лінеаризації РХ за допомогою степеневі функції

$$y = 0,11x^{1,74}e^{0,84x} \quad (2)$$

Основним недоліком цієї функції є велика сумарна нелінійність виправленої РХ, яка складає 5,9% діапазону переміщення. Тому первинна лінеаризація здійснена за допомогою складного поліному 6-ї степені:

$$y = 6,29006 \cdot 10^{-5} - 2,73821 \cdot 10^{-4}x + 1,34759x^2 - 2,64747x^3 + 2,64073x^4 - 1,23716x^5 + 0,23631x^6 \quad (3)$$

Використання поліному (3) дозволяє зменшити похибку нелінійності до величини  $\beta_n = 0,1\%$ . В цьому випадку подальша лінеаризація РХ методом кусково-лінійної апроксимації до величини  $\beta_n = 0,01\%$  передбачає введення в процесор лише восьми метрологічних точок. Підкреслимо, що в межах точності  $0,01\%$  первинні РХ (графік 1 на рис. 6) є індивідуальними для кожного деформометра. Тому поліноми типу (3) є теж індивідуальними. Їх вигляд легко встановити, використовуючи стандартне програмне забезпечення і таблиці експериментальних даних, на основі яких побудована РХ.

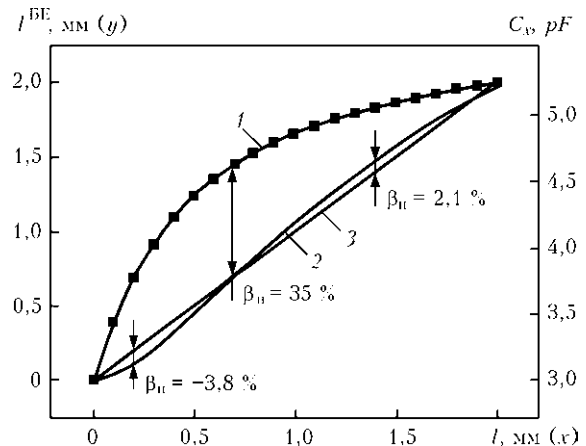


Рис. 6. Робочі характеристики деформометра: 1 – нелінеаризована РХ (стосується осей  $C_x$  і  $l^{BE}$ ), 2, 3 – відповідно РХ, лінеаризовані функцією (2) і поліномом (3) (стосується осі  $l^{BE}$ )



Рис. 7. Зовнішній вигляд БЕ

**Основні функції блока електроніки.** Головним вузлом БЕ є його аналогова частина — перетворювач «ємність–напруга», який виконано на основі пріоритетних технічних рішень. З цього перетворювача напруга, пропорційна ємності  $C_x$ , поступає на аналогово-цифровий перетворювач (АЦП). Кодовий сигнал, пропорційний  $C_x$ , поступає з АЦП на контролер, виконаний на базі сучасного мікропроцесора. Контролер здійснює такі стандартні операції: перетворює код АЦП в одиниці переміщення; лінеаризує РХ на основі полінома (3); проводить вторинну лінеаризацію РХ методом кусково-лінійної апроксимації; забезпечує індикацію переміщення  $l$  і температури  $T$  на рідкокристалічному дисплеї; забезпечує введення у мікропроцесор службової і метрологічної інформації за допомогою вмонтованої у корпус БЕ клавіатури; передає інформацію про  $l$  і  $T$  у вихідні інтерфейси RS 232 (для зв'язку з ПК) і RS 422 (для передачі даних на відстань близько 100 м). Зовнішній вигляд БЕ наведено на рис. 7.

Важливою функцією БЕ є компенсація температурних похибок дрейфу вихідного сигналу і калібрування (зміни нахилу) РХ. Дані про температурну похибку поступають від термодавача первинного перетворювача до АЦП і далі до процесора, який коректує вихідний сигнал на основі виразу

$$l_{BE} = l_{ш} \frac{A_x - A_{\min}(T_0) \left[ 1 + \alpha_1 \frac{T_x - T_0}{T_{\max} - T_0} \right]}{A_{\max}(T_0) - A_{\min}(T_0) \left[ 1 + \alpha_2 \frac{T_x - T_0}{T_{\max} - T_0} \right]}, \quad (4)$$

де  $l_{BE}$  — віддаль до об'єкта;  $l_{ш} = 2,0$  мм — шкала приладу (максимальне переміщення);  $A_x$  — поточне значення коду АЦП, що відповідає ємності  $C_x$  при поточній температурі  $T_x$ ;  $A_{\min}(T_0)$  — мінімальне значення коду при кімнатній температурі  $T_0$ ;  $A_{\max}(T_0)$  — максимальне значення коду при кімнатній температурі  $T_0$ ;  $T_{\max}$  — максимальна робоча температура;  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  — відповідно коефіцієнти температурного дрейфу нуля та темпе-

ратурної зміни нахилу РХ. Останні коефіцієнти задаються виразами:

$$\alpha_1 = \frac{A_{\min}(T_{\max}) - A_{\min}(T_0)}{A_{\min}}, \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \frac{[A_{\max}(T_{\max}) - A_{\max}(T_0)] - [A_{\min}(T_{\max}) - A_{\min}(T_0)]}{A_{\max}(T_0) - A_{\min}(T_0)}. \quad (6)$$

Використовуючи алгоритм (4), на всіх п'яти створених експериментальних зразках вдалось отримати сумарну температурну похибку  $\alpha \leq \pm 0,02$  % на  $100^\circ$  зміни  $T$ .

## Висновки

1. Розроблено методику виготовлення елементів «ємність–кераміка–метал», на базі якої створено високоточні (клас точності 0,01) деформометри дистанційної дії для діапазонів переміщень від 0–0,1 до 0–5,0 мм. Деталі вузлів кераміка–метал первинних перетворювачів з'єднані склокристалічним композитом, внаслідок чого — висока часова і температурна стабільність вихідного сигналу. Габарити ПП  $\varnothing 30 \times 55(85)$  мм, блока обробки і передачі інформації  $180 \times 140 \times 40$  мм. Основна похибка 0,01 %, температурна похибка  $\pm 0,02$  % на  $100^\circ$ , роздільна здатність (шкала) 0,001 % ( $10^5$ ).

Для метрологічного забезпечення деформометрів за класом точності не гіршим, ніж 0,01, розроблено еталонний деформометр на основі лазерного інтерферометра.

2. На базі ємнісних деформометрів дистанційної дії та інтерфейсного блока, побудованого на інтерфейсі RS 422, створено цифрову чотирьохканалну систему моніторингу мікропереміщень платформ циліндрів високого і низького тисків перегрітої пари турбогенератора К-160-130 Доброутвірської ТЕС. Вказані мікропереміщення (особливо в напрямках, перпендикулярних до осі турбіни) зумовлюють при зміні режимів роботи турбогенератора перекося осі турбіни і швидке руйнування її підшипників. Проводиться монтаж та підготовка системи для натурних випробовувань, за результатами яких буде прийняте рішення про доцільність застосування системи в проблемних місцях Доброутвірської ТЕС. До них відносяться, крім згаданих платформ циліндрів високого і низького тисків, ротори турбогенератора. Сумарна потреба на один турбогенератор — 17 деформометрів (підтверджено протоколом технічної наради). Крім турбогенераторів ТЕС та АЕС, пропонувані деформометри будуть ефективними при моніторингу деформацій корпусів морських суден, крупногабаритних промислових будівельних конструкцій, гідротехнічних споруд та ін.



3. Завдяки високим метрологічним показникам створені деформометри можуть мати також вторинне застосування: реєстрація рівня сипучих та гранульованих матеріалів, в тому числі рівня гарячого (до 300 °С) цементу; визначення вологості таких матеріалів.

1. Dubrov M. N., Alyoshin V. A. Precise laser interferometry with 1 pm resolution // Журнал радиоэлектроники. — 2004. — № 5. — С. 2–7.
2. Латынина Л.А. Изучение современных движений земной коры по данным подземных деформационных станций // Геодинамика. — 2007. — № 1(6). — С.26–31.
3. Mytsyk B., Haskevych H. Pressure sensors of especially high accuracy class // 13th intern. conf. SENSOR'2007, 22–24 May 2007: Proceedings. — Nürnberg (Germany), 2007. — Vol. 2. — P. 289–294.
4. Христов И. Устройство за сигнализация при приближании и докосване // Радио, телевизия, електроника. — 1997. — № 10. — С. 12–13. болг.

5. ГОСТ Р50030.5.2–99. Аппаратура распределения и управления низковольтная. Ч. 5.2. Аппараты и коммутационные элементы цепей управления. Бесконтактные датчики. — Введ. 1.01.2002 г.
6. Пат. №2272298 РФ. Емкостный измеритель перемещений // Вавилов В.Д., Долгов А.Н., Вавилов И.В. — Оpubл. 20.03.2006; Бюл. № 8.
7. Способ повышения точности прецизионных емкостных измерителей перемещений / Ф.Б. Гриневич, М.Н. Сурду, А.С.Левицкий и др. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2005. — № 1. — С. 68–72.
8. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов // Под ред. Г.С. Писаренко. — Киев: Наук. думка, 1988. — 736 с.
9. Пат. України 59563 А. Склокристалічний матеріал // Мицик Б.Г., Бучинський П.П., Гаськевич Г.І. — Оpubл. 15.09.2003; Бюл. № 9.
10. Материалы в приборостроении и автоматике / Ю.М. Пятин, А.М. Чернявская, Р.А. Владимирский и др. // Под ред. Пятин Ю.М. — М.: Машиностроение, 1982. — 528 с.

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

Надійшла до редакції  
06.10.2010



## 16-я Международная научно-техническая конференция и выставка «ЛЕОТЕСТ – 2011»

### Электромагнитные и акустические методы неразрушающего контроля материалов и изделий

Приглашаем Вас принять участие в 16-й Международной научно-технической конференции и выставке «ЛЕОТЕСТ – 2011», которая состоится 21–26 февраля 2011 г. в пгт. Славское (Львовская обл.) на базе пансионата «Бойкивщина».

#### Организаторы конференции

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики, Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАНУ, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, НПФ «Ультракон-Сервис», НПФ «Специальные Научные Разработки» (г. Харьков) и Центр «ЛЕОТЕСТ-МЕДИУМ» (организационное бюро конференции).

#### Тематика конференции

- теория и практика электромагнитных и акустических методов неразрушающего контроля материалов и изделий;
- диагностические аспекты применения электромагнитных и акустических методов контроля ответственных конструкций в эксплуатации;
- электромагнитные и акустические первичные преобразователи, методы обработки сигналов, вопросы метрологического обеспечения в электромагнитных и акустических методах контроля;
- автоматизированные системы и приборы контроля качества изделий;
- научно-организационные и экономические проблемы, вопросы аккредитации лабораторий, сертификации продукции, подготовки и аттестации персонала.

Тел.: (032)2750869, моб.: 067-9998834 (Учанин Валентин Николаевич)  
(032)2296166, моб.: 096-5942401 (Кириченко Ирина Ивановна)  
E-mail: uchanin@ipm.lviv.ua или leotest@org.lviv.net

# ОСОБЛИВОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНИХ ЗАСОБІВ ДІАГНОСТУВАННЯ

(Огляд. Повідомлення 2)

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, О. М. СТАНКЕВИЧ, Б. П. КЛИМ, Є. П. ПОЧАПСЬКИЙ

*Розглянуто етапи становлення та розвитку прикладного програмного забезпечення (ППЗ) систем АЕ діагностики. Проведено порівняльний аналіз сучасного стану ППЗ АЕ-засобів провідних світових виробників. Особлива увага зосереджена на характеристиках функціональних можливостей програмних продуктів компаній PAC (США), «Diacap» (Росія), «Vallen Systeme» (Німеччина), «Brue&Kjaer» (Данія), ТОВ «ІНТЕРЮНІС» (Росія), а також ППЗ АЕ-апаратури сімейства ЕМА (Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України), АЕ-комплексу АЕМ (Національний авіаційний інститут, Україна), сімейства портативних АЕ-засобів SKOP (Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України). Визначено пріоритетні напрямки та тенденції подальшого розвитку ППЗ систем АЕ-діагностування.*

*The stages of formation and development of applied software for AE diagnostic systems are considered. Comparative analysis of state-of-the-art of applied software of AE means of leading world manufacturers was conducted. Special attention is focused on characterization of functional capabilities of software of such companies, as PAC (USA), Diapac (Russia), Vallen Systeme (Germany), Brue&Kjaer (Denmark), INTERUNIS Company (Russia), as well as applied software of AE instrumentation of EMA family (E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine), AKEM AE system (National Aviation Institute, Ukraine), SKOP family of portable AE-means (G.V.Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine). Priority directions and tendencies of further development of applied software for AE diagnostic systems are determined.*

**ППЗ компанії «Brue&Kjaer».** У контексті розгляду багатоканальних систем для аналізу сигналів варто згадати про датську компанію «Brue&Kjaer» [1], яка, починаючи із 1940-х років, сьогодні не лише прийшла до світового лідерства у галузі точних інструментів для акустичних та вібраційних вимірювань, але й відіграла провідну роль у розвитку науки про вібрації та акустику. Традиції інновацій продовжуються і сьогодні. На зміну більшості окремих приладів, які традиційно використовувались інженерами, прийшли універсальні вимірювальні прилади на базі багатоканальних мультизадачних аналізаторів спектра серії PULSE. У цих модульних системах вдало поєднані можливості одночасно двох концепцій: потужність сучасного аналізатора, який використовує техніку швидкого перетворення Фур'є, та широкі обчислювальні можливості персонального

комп'ютера. Аналізатори цієї серії можна використовувати не лише для вимірювань параметрів звуку та вібрації, а також для аналізу технічного стану машин, будівельних конструкцій, електроакустичних систем. Частотний діапазон цих аналізаторів становить від 0 до 204,8 кГц. Оскільки згідно методології акустико-емісійного діагностування для САЕ [2] ширина смуги частот обмежується знизу значенням 100 кГц (через сильні шуми пристроїв навантаження на низьких частотах), то прилади серії PULSE можна використовувати і для аналізу АЕ-сигналів, хоча й у дуже малому частотному діапазоні.

Основним вимірювальним програмним забезпеченням системи PULSE є ПЗ PULSE FFT & CPB Analysis (швидке перетворення Фур'є та аналіз при постійній відносній ширині смуги частот (CPB)) [3], постобробку даних здійснює система

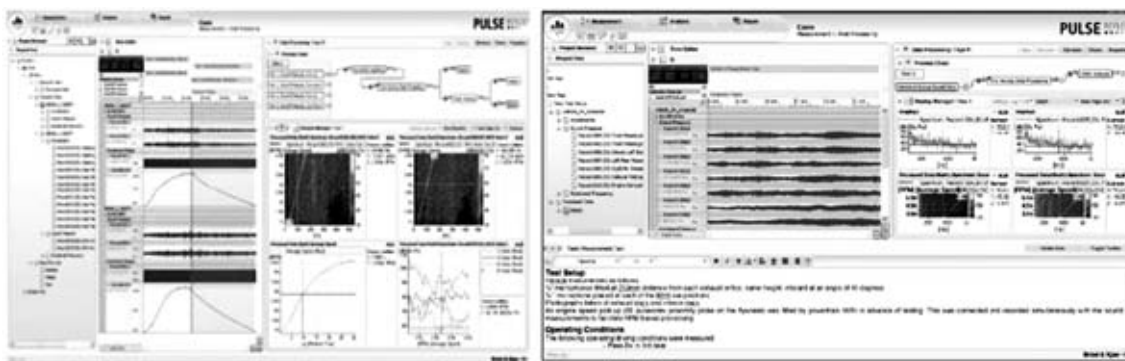


Рис. 1. Постобробка сигналів програмою PULSE Reflex Core

© В. Р. Скальський, О. М. Станкевич, Б. П. Клим, Є. П. Почапський, 2010





PULSE Reflex™. ПЗ PULSE Reflex™ об'єднує низку спеціалізованих програмних інструментів постобробки, призначених для аналізу та обробки даних після виконання вимірювань у часовій та частотній областях. До інструментальних засобів належать: ядро для обробки даних у часових та частотних параметрах (PULSE Reflex Core) (рис.1), яке містить ПЗ PULSE™ LabShop (функції FFT, СРВ-аналізу та порядкового аналізу), а також додатки PULSE Reflex Modal Analysis (модальний аналіз), PULSE Reflex Building Acoustics (аналіз акустики будівель).

ППЗ має предметно-орієнтований та зручний для користувача інтерфейс, розширені функції графічного дисплею та курсора, потужні засоби управління даними (швидка навігація по великих об'ємах даних; швидке фільтрування чи сортування даних для подальшої обробки, наприклад, статистичного аналізу, частотного аналізу чи модального оцінки параметра), підтримка дистанційного управління роботою та експорту даних (OLE-автоматизація та управління за допомогою функцій ActiveX), вимірювання та результати обробки можуть бути збережені на одній із 15 мов та експортовані у Windows-додатки — Word, Excel або PowerPoint, а також додатки PULSE Reflex, MATLAB тощо.

ППЗ компанії ТОВ «ІНТЕРЮНІС». На теренах Росії з 1988 р. провідне місце у галузі НК посідає компанія ТОВ «ІНТЕРЮНІС» [4], яка працює у різних галузях НК, займається розробленням та виробництвом АЕ обладнання, здійснює експертизу промислової безпеки об'єктів соціальної інфраструктури і обладнання промислових підприємств, проводить наукові дослідження, роз-

робляє і постачає системи комплексного діагностичного моніторингу.

У 1992–1993 рр. було випущено перші багатоканальні АЕ системи — А-Line 8S та А-Line 16S на базі персонального комп'ютера, які поклали початок цілому сімейству багатоканальних АЕ приладів серії А-Line.

Одночасно з виходом перших систем АЕ для них з'явилося і прикладне ПЗ. Перша версія програми включала базовий набір функцій, необхідних для збору і подальшої обробки АЕ даних. Разом із тим фахівці компанії прагнули задовольнити потреби своїх замовників, розширюючи функціональні можливості програмного забезпечення. Завдяки побажанням користувачів постійно розроблялися нові алгоритми обробки і відображення АЕ даних, додавалися нові функції.

На сьогодні компанією «ІНТЕРЮНІС» випущено більше 250 екземплярів АЕ систем серії А-Line і 4 покоління ППЗ. Висока якість і надійність приладів підтверджені сертифікатом стандарту якості ISO 9001.

ППЗ АЕ-систем А-Line 32D. Останнє покоління приладів серії А-Line представлене АЕ системами сімейства А-Line 32D. Програмне забезпечення цих систем реалізоване в середовищах Windows 9x/XP і має широкі можливості разом із простотою використання. ППЗ систем А-Line має зручний та добре знайомий користувачу інтерфейс, можливість використання стандартних засобів Windows для індивідуальної обробки результатів (рис. 2). Воно може бути перекладене будь-якою мовою (зараз доступні англійська і російська версії), забезпечує простоту, легкість

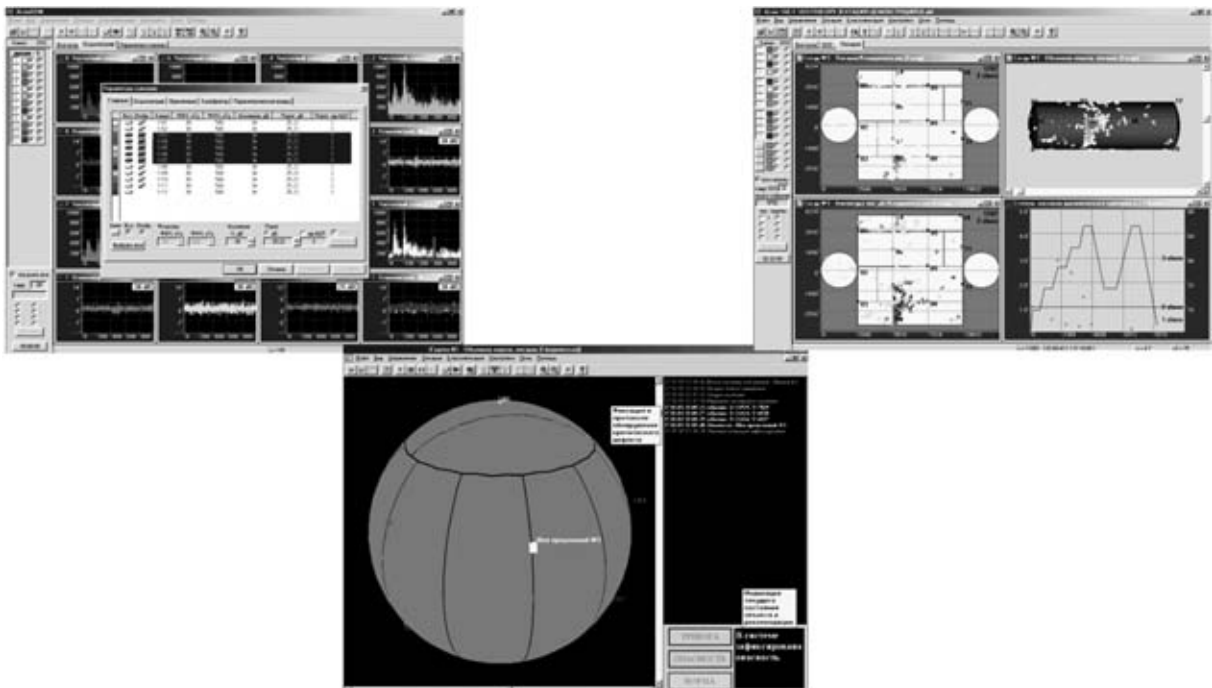


Рис. 2. Форми відображення АЕ-даних та результатів їх обробки у системах серії А-Line 32D

налаштування і управління системою разом з широкими можливостями зміни режимів роботи і характеристик комплексу, має зручне меню для встановлення параметрів графічного і текстового відображення.

За допомогою даного пакету програм можна виконати наступні функції обробки АЕ сигналів: класифікувати джерела АЕ за ступенем небезпеки в термінах амплітудного, локально-динамічного і інтегрального критеріїв; провести локацію дефектів (лінійну і планарну, зонну і об'ємну, на циліндричних і сферичних поверхнях, днищах резервуарів); обчислити координати, вибравши один із методів — за різницею у часі приходу або досягнення максимуму сигналу, триангуляційний або ректангуляційний із можливістю підбору швидкості; виконати кластеризацію об'єкту за кількістю АЕ подій і за розрахунковою амплітудою джерела АЕ, що забезпечує наочність ступеня небезпеки і дозволяє оцінити розмір дефекту; побудувати графіки залежностей будь-яких параметрів АЕ сигналів один від одного, часу, координат локації і даних параметричних каналів, а також гістограми розподілу кількості подій за будь-яким із параметрів АЕ сигналу. Програмний пакет включає вбудовані утиліти вимірювання швидкості АЕ сигналів і заникання в середовищі; спектрального аналізу частотних складових як всього АЕ сигналу, так і окремих його частин; проведення кластерного аналізу за заданими характеристиками форми сигналів або частотних областей спектру. ППЗ містить кореляційний аналіз АЕ сигналів і їх спектрів. Однією із особливостей пропонованого «ІНТЕРЮНІС» програмного пакету є наявність конвертора осцилограм сигналів АЕ у файл звукового формату WAV із різною частотою дискретизації, а також окремого модуля ПЗ для моніторингової системи неперервного спостереження з багаторівневою ієрархією доступу до налаштувань і результатів роботи комплексу у залежності від статусу оператора. Програмний модуль дозволяє вести глибоку статистичну обробку і накопичення баз даних із технічного стану

об'єкта. Водночас, багатofакторний комплексний аналіз даних, що надходять із сенсорних вузлів різного типу, дозволяє звести до мінімуму вплив людського фактору на оцінку результатів діагностичного моніторингу. Програма веде детальний протокол роботи системи та дій персоналу, у випадку виникнення небезпечної ситуації система включає сигнали звукової та світлової тривоги, вказує місцезнаходження та тип можливого пошкодження, видає рекомендації з дій персоналу та уживає інші передбачені кроки з попередження аварії.

Серед останніх новинок функціональних можливостей вказаного ПЗ зазначимо наступні: новий метод нечіткої локації джерел АЕ сенсорною антеною довільної форми на поверхнях тонкостінних ємностей; новий інформаційний статистичний критерій для поділу АЕ джерел за типом; метод оцінки відстані від первинного перетворювача (ПП) до передбачуваного джерела на основі вейвлет-аналізу АЕ імпульсу з врахуванням частотних залежностей групових швидкостей хвиль Лемба [5].

**ППЗ АЕ систем серії «МАЛАХІТ».** Понад 30 років на ринку АЕ приладів і систем працює ЗАТ «НВФ «ДІАТОН» (Росія) [6]. Його колектив пройшов шлях від розробки аналогових приладів та перших у СРСР АЕ систем на базі міні ЕОМ до створення і випуску сучасних цифрових приладів та багатоканальних систем АЕ діагностування промислових об'єктів (магістральних і технологічних трубопроводів, балонів, судин, що перебувають під тиском, ємнісного, колонного, реакторного обладнання, резервуарів нафтопродуктів, вантажопідйомного обладнання тощо). На сучасному етапі підприємство пропонує наступні типи АЕ систем серії Малахит: Малахит АС-12А/АС-14А/АС-15А. Особливість нового покоління АЕ систем полягає у наявності великого динамічного діапазону реєстрації каналів, застосуванні у вимірювальних каналах високопродуктивних цифрових сигнальних процесорів для обробки і реєстрації параметрів сигналів АЕ та мож-

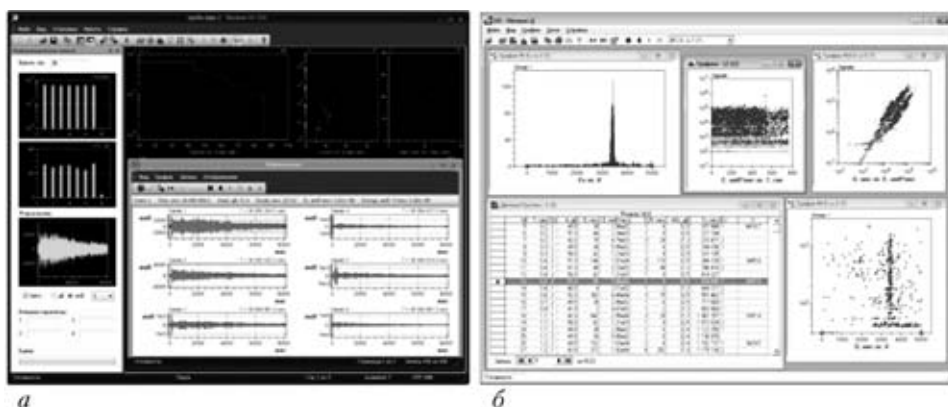


Рис. 3. Способи відображення АЕ даних: а — програма Малахит АС-15А з вікном форми хвилі; б — вікна з графіками і таблицями даних програми Малахит-Д



ливості широкого вибору конфігурацій систем для контролю об'єктів (комплектація чутливими ПП — інтегральними, герметичними, вибухозахищеними, із режимом автотестування).

**ППЗ АЕ Studio.** Основу ППЗ АЕ систем Малахіт складає програмний пакет АЕ Studio, сумісний із ОС Windows XP/Vista/7. Усі програми пакету мають єдину довідкову систему. Пакет АЕ Studio виконує функції управління системою, збір та аналіз даних при АЕ діагностуванні будь-яких об'єктів. Серед функціональних можливостей даного ППЗ зазначимо наступні: багатівіконний інтерфейс для табличного та графічного відображення даних (у режимі реального часу до 3000 графіків); кольорове кодування даних; вибір кольорової палітри; накладання на графіки кривої навантаження; стандартні набори графіків; карта (розгортка) об'єкта; автоматичне масштабування; фільтрація даних за будь-яким параметром із ручним і графічним (за допомогою мишки) заданням фільтрів, складні фільтри; здійснення різних типів локації (зонна, лінійна, прямокутна сітка, трикутна сітка, днище, довільне розташування первинних перетворювачів, локація в умовах великої швидкості реєстрації даних із врахуванням зникання); кластеризація та атоматичне визначення характеристик кластерів; статистична обробка даних; спектральний аналіз форм сигналів; класифікація джерел АЕ за амплітудним та інтегральним критеріями (в АЕ системі Малахіт АС-15А). До інструментальних засобів АЕ Studio належать: Малахіт — основна програма збору та обробки даних АЕ систем серії Малахіт, Малахіт-Ф — програма реєстрації і спектрального аналізу форми АЕ сигналів, Малахіт-Д — програма для роботи з базою даних АЕ сигналів (рис. 3). Серед особливостей програми Малахіт-Д варто зазначити наступні: можливість обробки даних, отриманих при використанні різних АЕ засобів; доступ до потужних і гнучких засобів сортування, пошуку і фільтрації даних засобами Microsoft Jet Database Engine; можливість використання для розширеної обробки АЕ даних і генерації звітів систем управління базами даних, електронних таблиць, текстових процесорів та інших програмних продуктів, що підтримують формат MS Access; для даних системи Малахіт АС-15А можна експортувати форму хвилі вибраного сигналу у текстовий файл для наступної обробки спеціалізованими програмами.

**ППЗ Корал.** Корал — комплексна програма обробки результатів діагностування лінійних об'єктів (наприклад, магістральних нафто- та газопроводів тощо). Дозволяє здійснити кореляційну обробку та фільтрацію даних, пошук та видалення електромагнітних завод, локацію джерел АЕ сигналів із врахуванням всіх реальних поєднань сигналів та їх зникання, автоматичну

кластеризацію із визначенням характеристик кластерів.

**ППЗ Буря.** Буря — пакет програм для комплексної, детальної обробки АЕ інформації, отриманої у результаті контролю промислових об'єктів, із метою підвищення достовірності виявлення джерел АЕ. Використовується алгоритм автоматичного аналізу всіх поєднань часу приходу зареєстрованих АЕ сигналів, а також визначення кількості каналів, що формують подію, для її ранжування з врахуванням функції зникання сигналів. Пакет складають програми:

**Днище** — для обробки даних АЕ діагностування плоских днищ круглої форми, на яких немає можливості встановити ПП АЕ. Особливістю програми є можливість використання додаткових ПП, які встановлюються на стінки резервуару, для фільтрації АЕ подій з днища від подій, що відбулись у верхній частині об'єму об'єкта контролю.

**Сфера** — для обробки даних АЕ контролю сферичних об'єктів. Включає окрему програму Сфера-Д, необхідну для рисування карти об'єкта і створення файлу координат розташування ПП на сферичній поверхні з впорядкованою таблицею відстаней між приймачами.

**Циліндр** — програма обробки даних АЕ контролю циліндричних об'єктів (цистерн, колон тощо). Для рисування карти об'єкта і створення файлу координат розташування ПП на циліндричній поверхні з впорядкованою таблицею відстаней між приймачами слугує окрема програма Циліндр-Д.

Запропоновані у програмному пакеті Буря алгоритми особливо ефективні при обробці даних, отриманих багатоканальними АЕ системами, що працюють в умовах підвищеної інтенсивності сигналів, наявності акустичних шумів і електромагнітних завод.

Програми ППЗ Буря адаптовані до універсального програмного забезпечення АЕ систем серії Малахіт і систем фірми РАС (США).

**ППЗ АЕ апаратури сімейства ЕМА.** Роботи зі створення АЕ систем сімейства ЕМА розпочались у 1982 р. зусиллями Інституту електрозварювання ім. Е. О. Патона НАН України [7] та угорської фірми «Відеотон». У 1996 р. із врахуванням нових вимог до систем технічної діагностики та розвинених можливостей інформаційних технологій було розроблено системи серії ЕМА-3 [8, 9] — експертні системи технічної діагностики навантажених виробів, агрегатів і конструкцій усіх галузей промисловості. Дані АЕ системи дозволяють керувати діагностичною апаратурою; здійснювати у режимі оперативного контролю або неперервного моніторингу автоматизовані вимірювання, збір, обробку і зберігання діагностичної інформації; визначати координати дефектів, схильних до розвитку; прогнозувати руйнівне на-

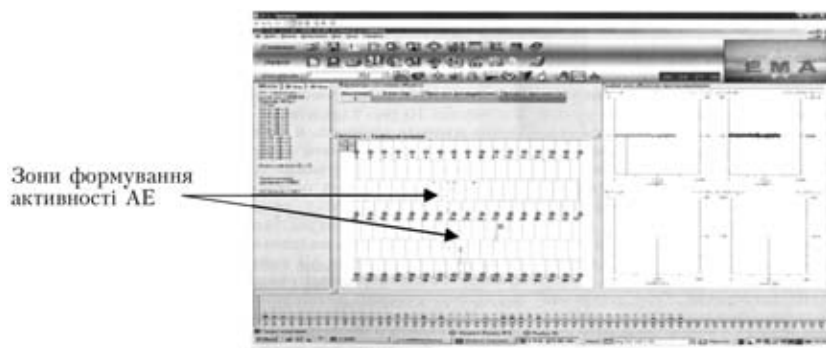


Рис. 4. Вікно програми EMA-3S під час випробувань на ОПЗ

вантаження на початкових етапах експлуатації виробу, агрегата чи конструкції; виконувати розрахунок залишкового ресурсу об'єкта контролю та встановлювати регламент його подальшої можливої експлуатації.

Основою розробки програмного забезпечення систем EMA-3 є: ОС Windows XP, .Net Server; архітектура, інтегрована з мережею Інтернет та можливість використання протоколу TCP/IP; модульна побудова, що дозволяє модифікувати частини програми незалежно; інтеграція з програмами пакету Microsoft Office; універсалізація програми, можливість її використання у пересувних та в моніторингових системах діагностики; орієнтація на управління засобами мережі та через Інтернет; використання технології XML в організації обміну даними. Важливою відмінністю та досягненням систем EMA-3 є розв'язання важливої для промисловості задачі, а саме автоматична відповідь на низку питань: наскільки небезпечний стан конструкції у даний момент; при якому навантаженні зруйнується конструкція у даних умовах експлуатації; який її залишковий ресурс. Основою для інтелектуальних алгоритмів оцінки стану конструкцій слугує розпізнавання образів, яке реалізується у даних системах наступним чином: у процесі роботи система формує Вектор Стану Матеріалу, координати якого складають характеристики процесу випробування; періодично відбувається порівняння вектора з еталоном, що відповідає різним стадіям руйнування; при співпадінні (із необхідним ступенем імовірності) поточного значення вектора з одним із еталонів руйнування система генерує попередження відповідного рівня й одночасно розраховує прогноз руйнівного навантаження при поточних умовах; на основі отриманих даних система розраховує залишковий ресурс об'єкта контролю. Прогноз руйнівного навантаження визначається з точністю  $\pm 15\%$ . Додатково під час випробувань система показує найнебезпечніше місце, де формується руйнування, на схемі об'єкта контролю. Сьогодні на ринку АЕ засобів НК пропонуються наступні системи: EMA-3Б, EMA-3Р, EMA-3У, EMA-3М [10], EMA-3S [11]. ППЗ базової системи

EMA-3Б включає програми для проведення АЕ випробувань та побудови таблиць і графіків, майстер звітів. EMA-3Р — розширена система EMA-3Б+ППЗ із додатковими компонентами: програми для роботи з базою даних та контролю рухомих деталей і вузлів агрегатів, програма для перетворення файлів EMA-2 у формат EMA-3. Універсальну систему EMA-3У складає розширений пакет EMA-3Р+ППЗ із до-

додатковими компонентами: програма прогнозування руйнівного навантаження та попередження про небезпеку, розрахунок залишкового ресурсу, програма математичної генерації тестових сигналів АЕ, програма проведення випробувань у режимі неперервного моніторингу. І нарешті, мережева система EMA-3М, побудована на основі EMA-3У із додатковою програмою керування робочими станціями у мережі (розробляється під конкретне замовлення) та можливістю роботи у локальній мережі і виходом в Інтернет. На базі системи EMA-3М створено систему неперервного моніторингу матеріалів конструкцій. Перша частина цієї системи EMA-3S (стаціонарна система неперервного моніторингу) (рис. 4) виготовлена на замовлення Одеського припортового заводу (ОПЗ) у 2003 р. Як зазначають автори у праці [9], завдяки функціональним можливостям системи технічна діагностика перетворюється в автоматизований процес, коли одним натискуванням на кнопку у будь-який час можна дізнатись про стан тієї чи іншої конструкції.

До розробок нового покоління у галузі АЕ технології належать чотириканальний АЕ прилад ГАЛС1 та модифікований прилад EMA-4 [12] для випробування труб внутрішнім тиском. До нових технологічних можливостей цих засобів належать: можливість обробки форм сигналів АЕ у реальному часі, розширені параметри налаштування, які сприяють кращій фільтрації хибних сигналів АЕ та ефективнішій обробці корисних. У програмне забезпечення цих приладів упроваджено спеціальний механізм стикування різних типів даних, який усунув проблеми із несумісністю даних. Прилади успішно пройшли тестування, за результатами якого для подальшого використання при пошуку координат джерел АЕ був вибраний метод прямого пошуку (дає найменші похибки) та для оцінки похибок розрахунку координат джерел АЕ розроблено метод з використанням кольорової схеми.

**ППЗ АЕ комплексу АКЕМ.** Серед відомих вітчизняних розробок АЕ засобів варто розглянути комплекс АКЕМ [13], створений фахівцями Національного авіаційного університету [14] (м.

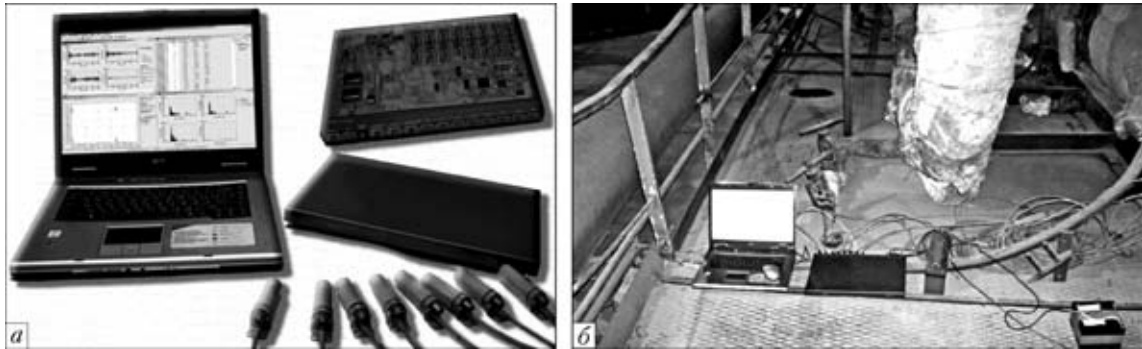


Рис. 5. Система АЕ діагностики SKOP-8: а — загальний вигляд; б — під час випробувань

Київ). У запропонованому підході побудови АЕ систем здійснюється розподіл функцій за призначенням та роботою пристроїв. До них належать: виконання вимірювань і передача даних, а також збереження даних, їх обробка, представлення і виведення результатів аналізу у вигляді залежностей зміни параметрів із використанням математичних і графічних додатків Windows, контроль та управління усіма процесами. Перше завдання розв'язується завдяки використанню засобів технології «PCLabcard» — портів вводу-виводу аналогової та цифрової інформації, друге — із використанням ПК. ППЗ даних систем має модульну архітектуру (модуль управління; операції формування та контролю стану системи; операції управління вимірюваннями, обробки, виводу і представлення результатів аналізу; сервісні операції; операції калібрування; модуль обробки параметрів сигналів та імпульсних потоків АЕ тощо). Багатовіконна структура екранного інтерфейсу забезпечує максимальні зручності користувачу у виконанні різноманітних операцій і наочність представлення результатів роботи як окремих модулів, так і всього пакету прикладних програм. Розроблене ППЗ дозволяє аналізувати інформацію, записану на фізичному рівні, формувати масиви із збереженням на логічному рівні, виводити і представляти результати аналізу у вигляді карт розподілу джерел випромінювання у вибраній координатній сітці, у двовимірному чи тривимірному представленні. Завдяки гнучкому програмному управлінню процесом вимірювань та обробки сигналів швидкості та прискорення коливань можна отримати широкий набір параметрів, що характеризують динамічну поведінку об'єкта контролю, зокрема, частоту коливань, загасання, логарифмічний декремент загасання, коефіцієнт механічних втрат, динамічне зміщення, швидкість, прискорення, добротність тощо. Параметри визначаються за одним-трьома каналами реєстрації інформації.

**ППЗ сімейства портативних АЕ засобів SKOP.** Як зазначалась вище, в Україні одне із провідних місць серед розробників методик АЕ діагностування та портативних вимірювальних

систем посідає Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. Сучасний етап розвитку АЕ систем характеризується створенням малогабаритних, мобільних і максимально простих в експлуатації приладів накопичення вибірок сигналів АЕ, які б дозволяли виконувати технічну діагностику та неруйнівний контроль об'єктів у польових умовах або за ускладненого доступу до місця контролю (мости, висотні конструкції, крани, ділянки трубопроводів тощо). Саме таку мету ставили перед собою розробники портативної восьмиканальної вимірювальної АЕ системи SKOP-8 [15] (рис. 5).

Система забезпечує виділення, реєстрацію та попередню обробку сигналів АЕ (САЕ) з подальшим збереженням їх в пам'яті персонального комп'ютера типу Notebook для необхідної обробки отриманих даних, їх візуалізацію в реальному масштабі часу тощо. Звичайний багатовіконний і багатосторінковий інтерфейс для графічного і текстового представлення отриманих даних у реальному часі та в постобробці і зручна довідкова система дають змогу користувачу швидко засвоїти навички роботи з АЕ системою. Користувачу надаються можливості програмного управління вимірюваннями (вибір кількості робочих каналів, вибір часу тривалості вибірки, задання необхідного підсилення каналів, порогу рівня шуму та смуги пропускання, параметрів об'єкта контролю тощо). За допомогою розробленого програмного забезпечення передбачено визначення координат джерел САЕ з графічним їх відображенням на моніторі у співвідношенні із зображенням розгортки об'єкта контролю і відтворення хвильового відображення події АЕ. Прилад реєструє такі характеристики САЕ: хвильове відображення сигналу, амплітуду огинаючої, сумарний рахунок, суму амплітуд, швидкість рахунку, час наростання фронту імпульсу, його тривалість, спектр частот тощо. Похибка визначення координат джерела АЕ, залежно від умов тестування об'єкта контролю, не перевищує 10 %. У режимі постобробки можна побудувати графіки хвильового відображення, спектрального та амплітудного розподілу, зникання хвилі, параметричних каналів, а також

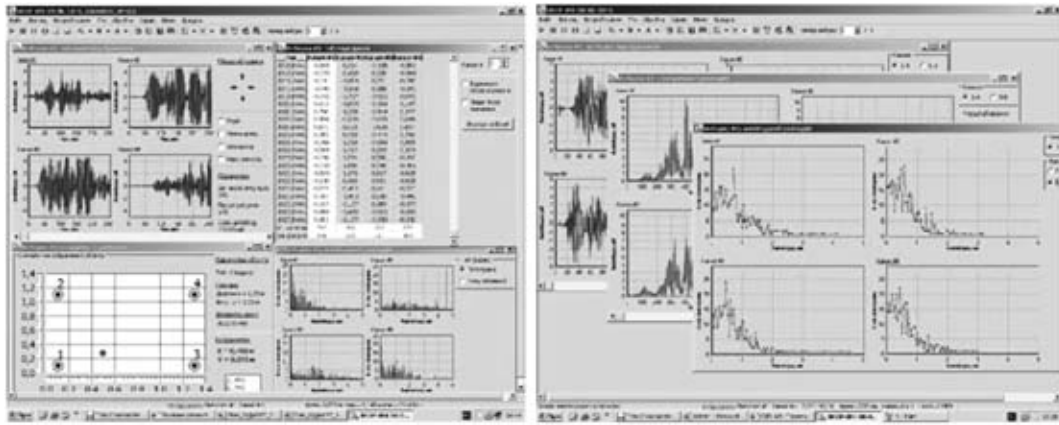


Рис. 6. Форми представлення обробки сигналів АЕ системою SKOP-8

локалізацію джерела за всіма вибірками або за точною вибіркою. Передбачено вибір користувачем варіанту графічного представлення АЕ даних через вибір каналів; масштабування; відображення на графіку порогу рівня шуму, огинаючої, максимального значення сигналу; типу графіка (гістограма чи кумулятивний) тощо (рис. 6). Програма має розвинені функції друку звітів, експорт АЕ даних у Windows-додатки (Word, Excel). Окрім того, дане ПЗ має також функції цифрової обробки сигналів, що включають одержання коефіцієнтів Фур'є, амплітудної та фазової характеристик.

**Засоби програмування АЕ методів.** Для програмної реалізації АЕ методів технічного діагностування у середовищі Windows спочатку використовувались мови програмування високого рівня (переважно Borland C++ for Windows). На даний час лідерство перехопили засоби візуального проектування та об'єктно-орієнтованого програмування подій, такі як Microsoft Visual Basic (мова програмування Visual Basic) та Borland Delphi (мова програмування Object Pascal). Обидва програмні продукти мають зручний візуальний інтерфейс і звільнили програмістів від багатьох зайвих зусиль. Однак Borland Delphi вийшла на перше місце серед засобів програмної реалізації АЕ методів, маючи ряд суттєвих переваг: можливість використання та створення DDL-бібліотек (Dynamic Link Library) та спеціальних елементів управління (таких як ActiveX) для нарощування функціональних можливостей; можливість реагування на будь-які події, що виникають у Windows; повна компіляція програм у машинний код, зрозумілий комп'ютеру, що сприяє високій швидкодії програмних продуктів.

## Висновки

Проведений порівняльний аналіз існуючого програмного забезпечення АЕ засобів дозволяє зробити висновок про те, що паралельно із розробкою нових поколінь АЕ систем вдосконалюється і їх програмне забезпечення, виконане на базі сучасних досягнень у галузі інформаційних технологій і

методів програмування з урахуванням багатого досвіду реального застосування АЕ, набутого як фахівцями-розробниками, так і багаточисленними користувачами АЕ систем. До характерних особливостей програмного забезпечення сучасних АЕ систем належать:

- стандартний інтерфейс та надзвичайно різноманітні графічні та функціональні можливості;
- оперативна довідкова система;
- повна сумісність з усім програмним забезпеченням Windows, що сприяє потужній функції буфера обміну та отриманню різноманітних друкованих звітних форм;
- підтримка форматів файлів різних АЕ систем, що дозволяє здійснювати аналіз та обробку отриманих АЕ даних різними пакетами програм та проводити порівняльний аналіз результатів обробки.

Програмне забезпечення найпоширеніших АЕ систем має розвинені функції роботи з даними. Зокрема, різні способи фільтрації даних (за допомогою логічних операцій або графічним способом, використання складних фільтрів), автоматичне перенесення змін у параметрах на всі види графіків та таблиць, сортування будь-яких ознак АЕ сигналу тощо. Якщо перші програмні продукти АЕ систем включали лише базовий набір функцій збору і обробки сигналів АЕ, то за допомогою існуючого ППЗ значно розширюється спектр методів АЕ діагностування. До них належать: різноманітні методи локації джерел сигналів (лінійна, планарна, циліндрична, сферична, мультитриплетна, тривимірна, кореляційна локація), алгоритми автоматичної кластеризації (максимінна відстань, К-середнє, нейронні мережі та ін.) та ручного групування у кластери, спектрального, кластерного та кореляційного аналізів, аналізу форм хвиль та їх класифікації тощо, а також найсучасніші методи обробки сигналів АЕ: швидке перетворення Фур'є, вейвлет-аналіз, алгоритми розпізнавання образів. Обробка АЕ даних може бути здійснена як в реальному часі, так і в режимі постобробки. Програмні пакети дозволяють вести глибоку статистичну обробку і накопичення да-



них технічного стану об'єктів у моніторингових системах діагностики.

Подальший розвиток ППЗ орієнтований на застосування розвинених технологій організації обміну даними, забезпечення управління АЕ системами через мережі Інтранет та Інтернет, створення прикладних програмних пакетів для технічної діагностики конкретного класу об'єктів та окремих АЕ технологій.

Розвиток теоретичних основ та вдосконалення методів АЕ діагностування, які реалізуються у прикладному програмному забезпеченні АЕ систем, сприяють найефективнішій обробці сигналів АЕ, що у свою чергу забезпечує можливість більш якісної та точної діагностики та контролю технічного стану тих чи інших об'єктів.

1. *Bruel&Kjaer*. — [Virtual Resource]. — Access Mode: URL: <http://bksv.com>.
2. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн. посіб.: У 3-х т. — Т. 2: Методологія акустико-емісійного діагностування. — Київ: Наук. думка, 2009. — 263 с.
3. Інформація о системе / АСМ тесты и измерения. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://bruel.ru/UserFiles/File/3560SW.pdf>.
4. IU ИНТЕРЮНИС. Системы промышленного мониторинга. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://www.interunis.ru>.
5. Елизаров С. В., Букатин А. В., Ростовцев М. Ю., Терентьев Д. А. Новинки программного обеспечения АЭ систем семейства А-Line. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://www.interunis.ru/publikacii/statya21>.
6. Акустическая эмиссия, НПФ Диатон. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://www.diaton-test.ru/index.htm>.
7. Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://www.paton.kiev.ua>.
8. Недосека С. А., Недосека А. Я. Диагностические системы семейства «ЕМА». Основные принципы и особенности архитектуры (Обзор) // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2005. — № 3. — С. 20–25.
9. Недосека С. А., Недосека А. Я. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций // Там же. — 2008. — № 2. — С. 5–19.
10. Автоматизированные экспертные системы технической диагностики нагруженных изделий, агрегатов и конструкций // Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://www.paton.kiev.ua/ru/razrabotki-ies/prodlenie-resursa/tehnikeskaya-diaagnostika/879-akusticheskaja-jemissija>.
11. Применение АЭ технологии при непрерывном мониторинге оборудования Одесского припортового завода / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, М. А. Яременко та ін. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 4. — С. 85–95.
12. Дослідження приладів для акустико-емісійного контролю та діагностування зварних конструкцій / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, А. А. Грузд та ін. // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Зб. наук. стат. за результатами, отриманими 2007–2009 рр. — Київ, 2009. — С. 118–122.
13. Филоненко С. Ф. Акустическая эмиссия. Измерение, контроль, диагностика. — Киев: КМУГА, 1999. — 312 с.
14. Національний авіаційний університет. — [Електронний ресурс]. — Засіб доступу: URL: <http://www.nau.edu.ua/uk/Science/GotoviRozrobky/AcousticEmission/>.
15. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн. посіб.: У 3-х т. — Т. 3: Засоби та застосування методів акустичної емісії. — Київ: Наук. думка, 2009. — 326 с.

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

Надійшла до редакції  
25.03.2010

**NDTMS 2011**  
**ISTANBUL**

**NDTMS 2011 - МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ  
ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ  
МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУР**

**Время проведения:** 15.05.2011 - 18.05.2011  
**Место проведения:** Турция, Стамбул  
**Темы:** Неразрушающий контроль NDT  
**Организатор:** Стамбульский технический университет

**Темы симпозиума:**

- Методы NDT для определения характеристик материалов и структур
- Общие методы NDT, современное состояние, последние разработки, использование комбинированных методов NDT, датчики и приборы, измерения, обработка сигнала, технологии моделирования и обработки изображений
- NDT для определения характеристик материалов и структур
- Измерения и количественные характеристики свойств материалов, включая цементные, металлические и композитные
- NDT для гражданских объектов инфраструктуры. Обнаружение и оценка повреждений, оценка состояния и срока службы, изучение примеров оценки объектов инфраструктуры (зданий, мостов, дамб, туннелей, фундаментов, труб и пр.)
- NDT для оценки бетона. Существующие и разрабатываемые методы оценки свойств бетона
- Мониторинг состояния структур. Методы постоянного мониторинга структур, технологии дистанционного контроля, беспроводной NDT
- NDT и оценка исторических зданий и сооружений
- Оценка и мониторинг состояния памятников истории и их оснований

# ВИХРЕТОКОВЫЕ НАКЛАДНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ: РАСШИРЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ, СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ХАРАКТЕРНЫЕ ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ (Обзор)

В. Н. УЧАНИН

*Предложена развернутая классификация вихретоковых накладных преобразователей, позволяющая выделить ряд перспективных конструкций накладных преобразователей, которые ранее не были классифицированы или относились к классу специальных.*

*An expanded classification of eddy current overlay transducers is proposed, which allows finding a number of promising designs of overlay transducers, which were not earlier classified or were included into special transducer class*

Вихретоковые преобразователи (ВТП) являются источником первичной информации о параметрах контролируемого материала и их свойства имеют решающее значение для обеспечения высокой эффективности контроля. Согласно существующей классификации в зависимости от рабочего положения ВТП относительно объекта контроля (ОК) их разделяют на накладные, проходные, экранные и комбинированные [1–9]. Накладные ВТП представляют собой одну или несколько обмоток, торцы которых во время контроля подводят к поверхности ОК. Накладные ВТП являются наиболее универсальными и используются для контроля плоских поверхностей и поверхностей с относительно большим радиусом кривизны. Предлагаемая работа посвящена рассмотрению накладных ВТП, существующая классификация которых не позволяет охватить многие современные конструкции. Предложенная в настоящей работе развернутая классификация позволяет выделить ряд перспективных конструкций накладных ВТП, которые ранее были вне классификации или относились к классу специальных.

**Общепринятые классификационные признаки накладных ВТП.** Для полноты рассмотрим вкратце общепринятые классификационные признаки накладных ВТП [1–9]. Все ВТП в зависимости от того, каким образом и в какой параметр преобразуются параметры ОК, разделяют на трансформаторные и параметрические. Трансформаторные ВТП имеют как минимум две обмотки: обмотку возбуждения (ОВ), предназначенную для создания первичного электромагнитного поля, и измерительную обмотку (ИО), в выходное напряжение которой преобразуются параметры ОК. В параметрических ВТП, имеющих в большинстве случаев одну обмотку, параметры ОК преобразу-

ются в ее комплексное сопротивление (импеданс). Параметрические ВТП являются более простыми по конструкции и могут быть выполненными меньших размеров. Однако в параметрических ВТП собственное сопротивление его обмотки добавляется к внесенному сопротивлению, несущему информацию о параметрах ОК, и нестабильность параметров обмотки, в частности, температурная, дает существенный эффект. Поэтому температурную стабильность легче достичь в трансформаторных ВТП [4].

В зависимости от способа преобразования параметров ОК в параметры сигнала различают абсолютные и дифференциальные ВТП. Выходной сигнал абсолютного ВТП зависит от абсолютного значения контролируемого параметра ОК, а дифференциального — от разности этих параметров на двух участках ОК. На рис. 1 изображены простейшие накладные ВТП абсолютного и дифференциального типа, а также распределение сигнала от локального дефекта [7]. При размещении абсолютного ВТП в «воздухе», когда на него не влияет ОК, на выходе ИО имеем сигнал, амплитуда и фаза которого обусловлены первичным электромагнитным полем ОВ. При установке ВТП на бездефектный участок ОК на выходе ИО будет сигнал, обусловленный суммой первичного поля и поля вихревых токов бездефектного ОК. Такое поле будем называть нормальным согласно определению, взятому А. Я. Тетерко из терминологии электроразведки [10].

Накладные ВТП выполняют без сердечника (их часто называют «воздушными») или с ферромагнитным сердечником, который дает возможность повысить их чувствительность и локальность (рис. 1) [11].

Рассмотренные общепринятые классификационные признаки накладных ВТП представлены



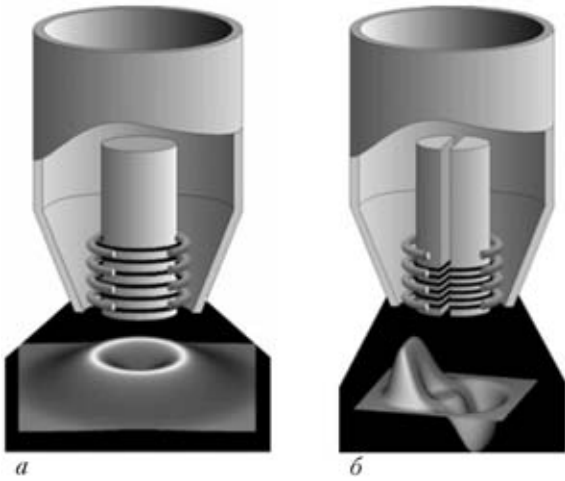


Рис. 1. Простейшие абсолютный (а) и дифференциальный (б) накладные ВТП и распределение сигнала от локального дефекта

на рис. 2 как часть предлагаемой расширенной классификации.

**Предлагаемые классификационные признаки накладных ВТП.** Рассмотрим признаки накладных ВТП, которые могут стать основой их расширенной классификации (рис. 2).

Все трансформаторные накладные ВТП в зависимости от взаимного положения оси (осей) ИО относительно оси ОВ можно разделить на коаксиальные и анаксиальные. Наиболее распростра-

ненными и исследованными являются коаксиальные накладные ВТП с соосными обмотками (рис. 3, а) [1–5], которые наиболее эффективны при определении удельной электрической проводимости (УЭП) и геометрических параметров ОК. В коаксиальных ВТП с помощью дополнительной компенсационной обмотки, включенной встречно основной ИО, добиваются компенсации влияния первичного или нормального поля, что позволяет уменьшить неинформативную составляющую выходного сигнала [12–15]. Коаксиальные ВТП с дополнительной компенсационной обмоткой иногда некорректно называют дифференциальными. Несмотря на дифференциальное включение обмоток такие ВТП по своей природе являются абсолютными, так как их выходной сигнал определяется параметрами только одного участка ОК. Для исключения недоразумений нами предложено называть их абсолютными компенсированными ВТП [15]. Для компенсации первичного поля ВТП размещают в «воздухе» и перемещением компенсационной ИО (рис. 3, а) настраивают таким образом, чтобы минимизировать его выходной сигнал [15]. При симметричном расположении ИО и компенсационной ИО относительно ОВ (и ферритового сердечника при его наличии) можно достичь «нулевого» значения выходного сигнала. В этом случае при установке ВТП на ОК его сигнал будет

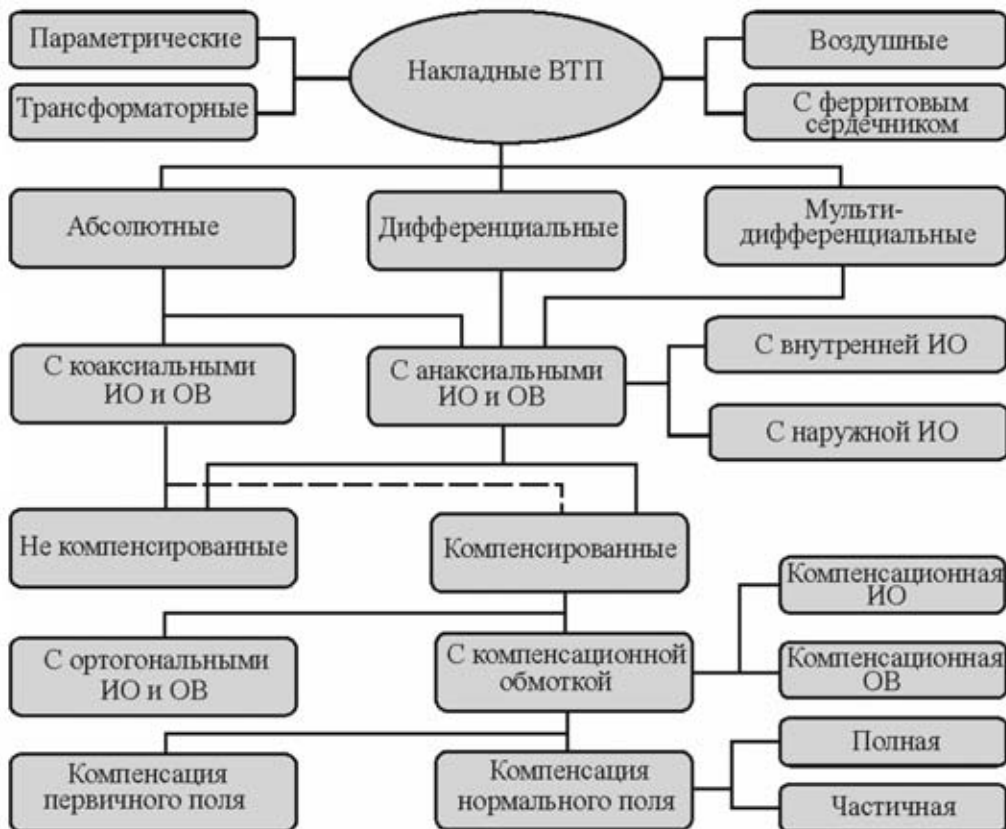


Рис. 2. Классификация накладных ВТП

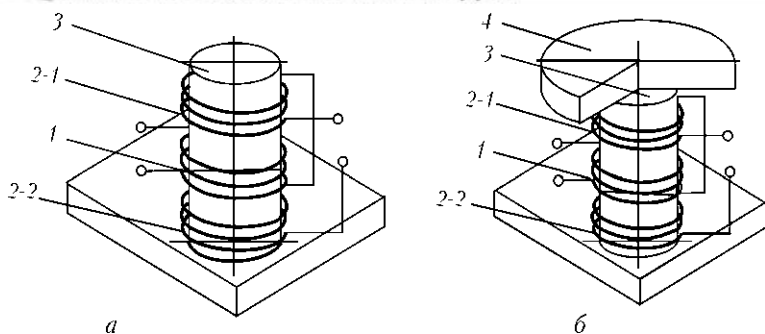


Рис. 3. Абсолютные коаксиальные ВТП с компенсацией первичного (а) или нормального (б) электромагнитного поля: 1 — ОВ; 2 — ИО; 3 — ферритовый сердечник; 4 — компенсатор

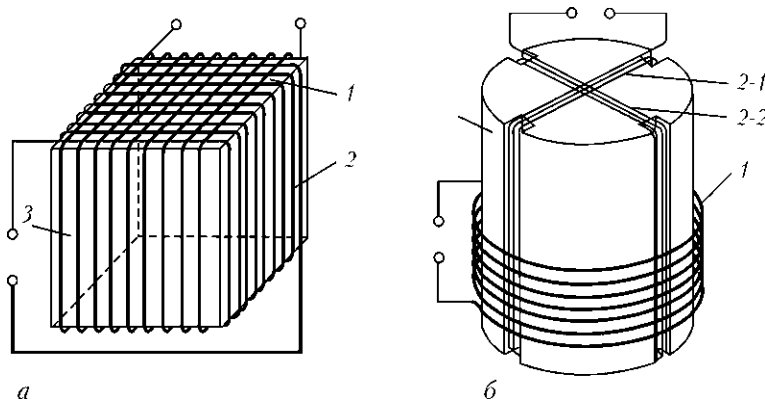


Рис. 4. Варианты ВТП с ортогональными обмотками по [18] (а) и [19] (б): 1 — ОВ; 2 — ИО; 3 — сердечник

зависеть только от электромагнитного поля вихревых токов ОК. При компенсации нормального поля ВТП достижение минимального выходного сигнала ВТП при настройке перемещением компенсационной ИО осуществляют при установке ВТП на бездефектную часть образца, выполненную из материала ОК [15]. Для достижения нулевого выходного сигнала в этом случае необходимо в конструкцию ВТП ввести компенсатор в виде пластины из материала ОК (рис. 3, б). В компенсаторе благодаря взаимодействию с ОВ наводятся вихревые токи, аналогичные вихревым токам ОК. Сигнал в компенсационной ИО аналогичен сигналу в основной ИО, что позволяет исключить влияние электромагнитного поля вихревых токов бездефектного ОК [16]. Глубину ком-

пенсации первичного или нормального поля можно оценить с помощью коэффициента компенсации  $K_K$ :

$$K_K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_B} = \frac{U_B - U_K}{U_B},$$

где  $U_{\text{ВЫХ}}$ ,  $U_B$  и  $U_K$  — соответственно сигналы на выходе ВТП, на выходе основной и компенсационной ИО. Важно, что параметр  $K_K$  является инвариантным относительно напряжения на ОВ и количества витков обмоток ВТП. Компенсацию первичного поля можно также обеспечить с помощью дополнительной ОВ, расположенной коаксиально относительно ИО, поле которой действует встречно к полю основной ОВ [17].

Другим эффективным способом исключения влияния первичного поля является ортогональная ориентация оси ИО относительно оси ОВ [18–21]. Такие ВТП могут состоять из ОВ и ИО, оси которых ориентированы тангенциально относительно поверхности ОК (рис. 4, а) [18], или иметь одну ОВ, ось которой ориентирована нормально относительно поверхности ОК, с двумя перекрестными тангенциальными ИО (рис. 4, б) [19].

В анаксиальных ВТП оси ИО не совпадают с осями ОВ. Термин «анаксиальный» введен впервые Б. И. Блажкевичем с сотрудниками, которые проанализировали такие ВТП применительно к задаче измерения толщины и УЭП [22]. Как преимущество анаксиальных ВТП показано уменьшение влияния первичного поля ОВ на выходной сигнал ИО. Анаксиальные ВТП могут быть абсолютными и дифференциальными. Дифференциальные ВТП всегда имеют анаксиальное размещение ИО относительно ОВ. При этом, согласно предложенной классификации (рис. 2), ИО могут быть расположены как внутри ОВ [23–25], так и

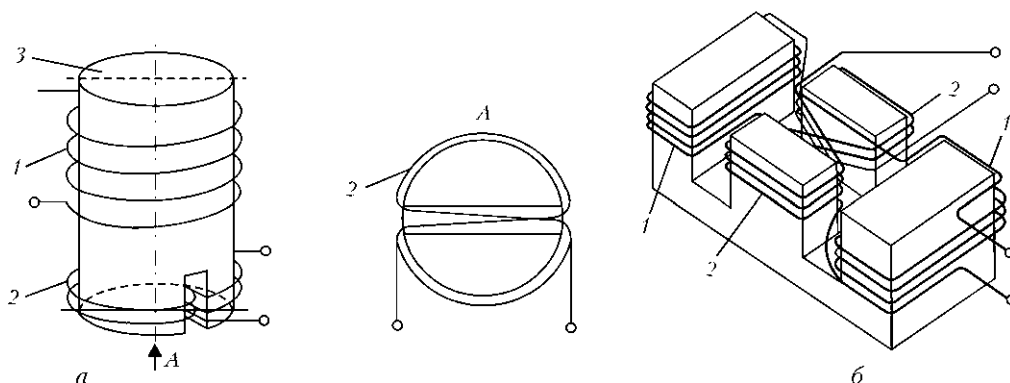


Рис. 5. Варианты дифференциальных ВТП с одной (а) и двумя (б) ОВ [24]: 1 — ОВ; 2 — ИО; 3 — ферритовый сердечник

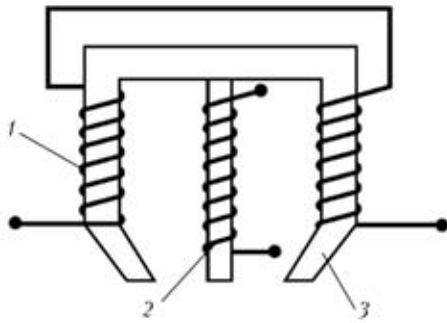


Рис. 6. Анаксиальный дифференциальный ВТП с двумя ОВ [23]: 1 — ОВ; 2 — ИО; 3 — ферритовый сердечник

вынесены за ее пределы [25–29]. На рис. 5 представлены два варианта ВТП Ф. Ферстера: один с внутренними дифференциальными ИО, намотанными общим проводом в форме восьмерки; второй с двумя ОВ, расположенными симметрично относительно дифференциальных ИО, влияние первичного электромагнитного поля которых на каждую ИО суммируется [24].

Компенсацию первичного поля в дифференциальных ВТП можно улучшить с помощью дополнительных компенсационных обмоток, расположенных коаксиально к основным ИО [26]. Необходимо отметить, что дифференциальный способ контроля можно реализовать с помощью одной ИО, на которую действует встречное поле двух идентичных ОВ с параллельными осями, расположенными симметрично по разные стороны ИО [10, 23, 30] (рис. 6).

Кроме абсолютных и дифференциальных ВТП предлагаемая классификация (рис. 2) предполагает перспективную группу мультидифференциальных ВТП, которые в большинстве случаев осуществляют операцию двойного дифференцирования, т. е. их выходной сигнал зависит от разности двух дифференциальных сигналов (рис. 7). Такие ВТП позволяют подавить влияние не только изменений зазора, но и перекоса ВТП относительно поверхности ОК. Мультидифференциальные ВТП могут быть с четырьмя ИО, расположенными внутри (рис. 7) [31–33] или снаружи ОВ, как в

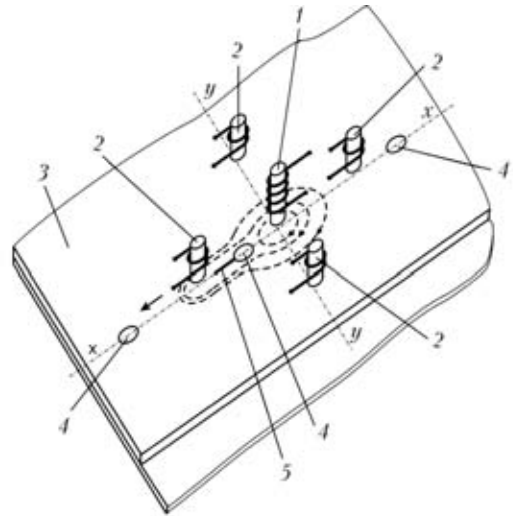


Рис. 8. Мультидифференциальный ВТП с внешними ИО [34]: 1 — ОВ; 2 — ИО; 3 — ОК; 4 — заклепка; 5 — трещина

ВТП (рис. 8) для реализации скользящего способа обнаружения трещин в зоне заклепок [34].

Оригинальная конструкция мультидифференциального ВТП с двумя ОВ, расположенными симметрично относительно двух миниатюрных ИО, предложена А. Я. Тетерко [10, 35]. Обмотки возбуждения 1 этого ВТП (рис. 9, а) размещены на ферритовых сердечниках и включены так, чтобы создаваемые ими магнитные потоки имели противоположное направление. Миниатюрные ИО 2 ориентированы для определения вертикальной составляющей первичного поля и установлены в нейтральной плоскости, где эта составляющая равна нулю. При таком включении в каждой ИО реализован дифференциальный способ контроля, как в дифференциальном ВТП, изображенном на рис. 6. При формировании выходного сигнала ВТП путем встречного включения ИО реализована операция двойного дифференцирования. Этот ВТП исследовали в работе [36] при решении задачи выявления дефектов под обшивкой. Подобный вариант ВТП с удлиненными ИО, которые для увеличения чувствительности к дефектам ти-

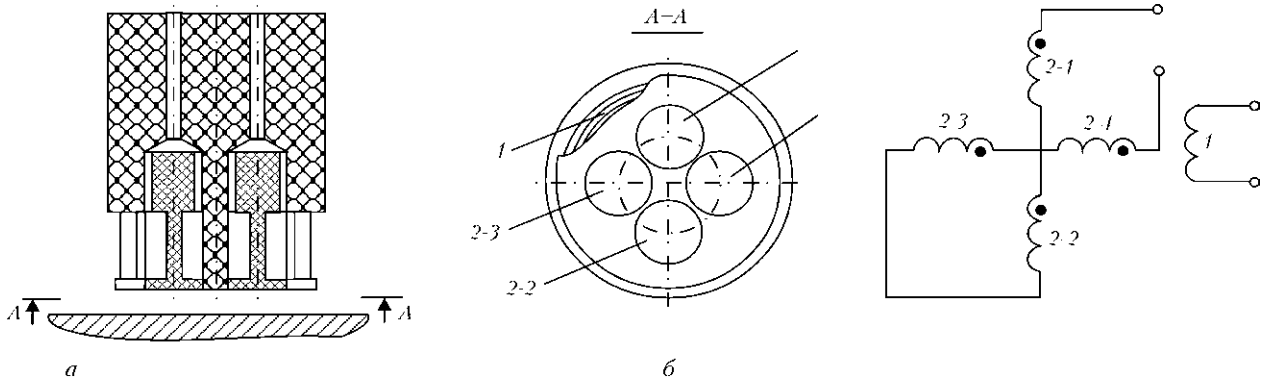


Рис. 7. Мультидифференциальные ВТП с внутренними ИО (а) и схема соединения обмоток [31] (б): 1 — ОВ; 2 — ИО; 3 — ОК

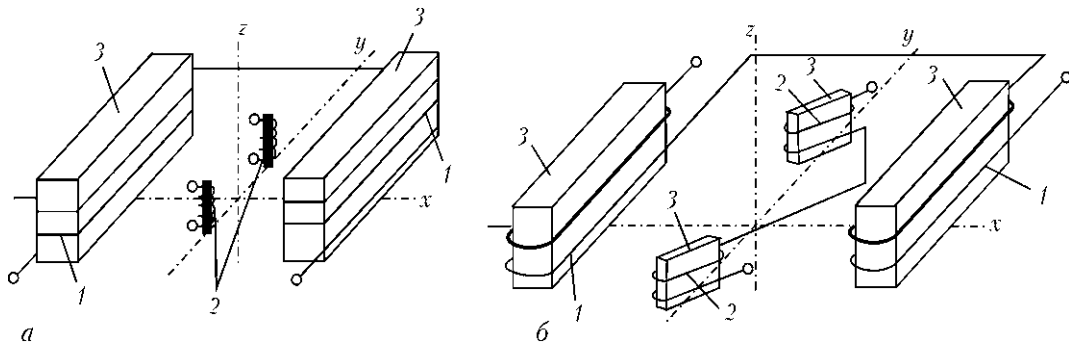


Рис. 9. Мультидифференциальные ВТП с двумя ОВ и двумя ИО по [10] (а) и [37] (б): 1 — ОВ; 2 — ИО; 3 — ферритовые сердечники

па трещина развернута на  $45^\circ$  относительно оси, соединяющей оси ОВ, изображен на рис. 9, б [37]. К недостатку этих ВТП можно отнести сравнительно большие размеры, что ограничивает возможность контроля ОК с малой кривизной поверхности и большим количеством крепежных элементов. Их преимуществом является возможность отстройки не только от плоско-параллельного зазора относительно поверхности ОК как в дифференциальных ВТП, но и от перекоса.

В мультидифференциальном ВТП на рис. 10, а все обмотки I–IV размещены на одинаковых ферритовых сердечниках сегментной формы с пазами для укладки обмоток [38]. Это позволяет улучшить локальность контроля за счет уменьшения размеров ВТП и расстояния между обмотками. Такой ВТП особенно эффективен при контроле неоднородных по структуре материалов, например сварных соединений [39]. На рис. 10, б представлено пространственное распределение сигнала мультидифференциального ВТП от локального дефекта.

Мультидифференциальные ВТП первоначально использовали в составе дефектоскопов типа ДУЭТ и ПОЛЕТ [35, 36, 40, 41], которые эффективно работали только на рабочей частоте 1кГц, что ограничивало их применение. Тем не менее, благодаря большой глубине контроля и пространственному разрешению, с их помощью впервые реализована возможность обнаружения

дефектов под обшивкой толщиной до 5 мм. Мультидифференциальные ВТП были использованы при обнаружении подповерхностных дефектов усталостного и коррозионного происхождения в авиационных неразъемных конструкциях, в частности, дефектов под обшивкой, локальных коррозионных повреждений при контроле с непораженной стороны, трещин под слоем герметика, внутренних дефектов в многослойных конструкциях в зоне заклепок и др. [40–41]. Эффективность мультидифференциальных ВТП с анаксиальными обмотками при выявлении подповерхностных дефектов можно объяснить результатами исследований, которые показывают, что затухание вихревых токов можно уменьшить путем выбора большого диаметра обмоток коаксиального ВТП или путем удаления ИО от ОВ [10, 30, 42]. При большом размере обмоток ВТП нельзя достичь высокой разрешающей способности. В анаксиальных ВТП с разнесенными ОВ и ИО большая глубина контроля достигается установкой относительно большого расстояния между обмотками, а высокая разрешающая способность — их небольшими размерами.

В последнее время разработано множество вариантов выполнения ВТП мультидифференциального типа, которые отличаются диаметром рабочей площадки и диапазоном рабочих частот [43–45]. Для каждого типоразмера предложено три варианта ВТП для работы в нижнем

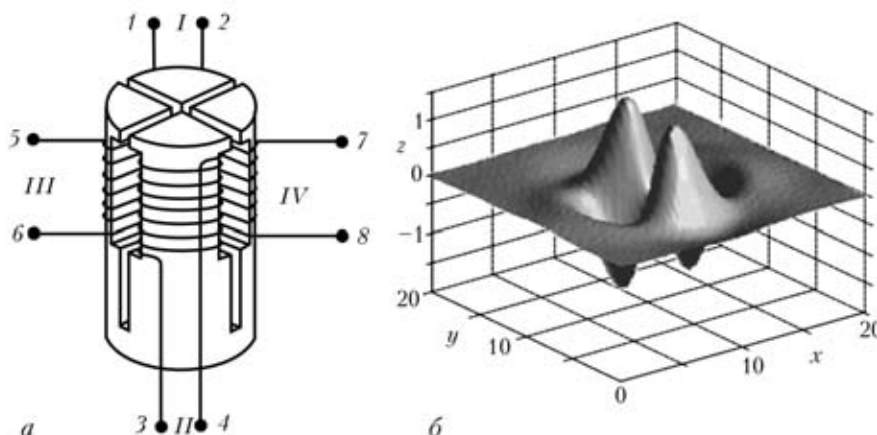


Рис. 10. Мультидифференциальный ВТП с малой базой размещения обмоток (а) и распределение сигнала мультидифференциального ВТП от локального дефекта (б)



(50Гц...10,0 кГц), среднем (10,0...500,0 кГц) и высоком (500,0 кГц...6,0 МГц) диапазонах рабочих частот. Исследования показали, что особенностями этих ВТП, благодаря которым удалось решить ряд новых задач, являются: высокая чувствительность трещинам и локальным дефектам типа поры; хорошее подавление первичного электромагнитного поля и ослабление влияния зазора; высокая разрешающая способность; высокая глубина контроля; высокая чувствительность при контроле через диэлектрический слой и небольшие размеры [43–47]. На их основе ведущими фирмами, такими как Фраунгофер институт неразрушающего контроля (Саарбрюкен, Германия), «КонтрольТехник» (Швармштедт, Германия), НПФ «Промприлад» и ОКБТ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, разработано ряд эффективных систем автоматизированного контроля [48–51].

## Выводы

1. Проведен сравнительный анализ современных накладных ВТП. Выделены новые классификационные признаки накладных ВТП, на основе которых предложена их расширенная классификация.

2. Правомочность предложенной классификации накладных ВТП подтверждена примерами из научно-технической и патентной литературы.

3. Среди перспективных конструкций выделены анаксиальные ВТП с внешними ИО, а также мультидифференциальные ВТП, которые осуществляют операцию двойного дифференцирования. Представлены их особенности и примеры эффективного применения для решения сложных задач неразрушающего контроля.

1. *Неразрушающий контроль металлов и изделий*: Справочник / П. И. Беда, Б. И. Выборнов, Ю. А. Глазков и др. / Под ред. Г. С. Самойловича. — М.: Машиностроение, 1976. — 456 с.
2. *Дорофеев А. Л., Казаманов Ю. Г.* Электромагнитная дефектоскопия. — М.: Машиностроение, 1980. — 232 с.
3. *Дякин В. В., Сандовский В. А.* Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей. — М.: Наука, 1981. — 136 с.
4. *Герасимов В. Г., Клюев В. В., Шатерников В. Е.* Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 272 с.
5. *Соболев В. С., Шкарлет Ю. М.* Накладные и экранные датчики. — Новосибирск: Наука, 1967. — 144 с.
6. *Неразрушающий контроль и диагностика*: Справочник / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1995. — 487 с.
7. *Неразрушающий контроль*: В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль: Практ. пособие / В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, В. В. Сухоруков / Под ред. В. В. Сухорукова. — М.: Высш. шк., 1992. — 312 с.
8. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посібник* / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О. П. Остап, В. М. Федірко, В. М. Учанін та ін. — Львів: Сполом, 2007. — 1068 с.
9. *Зацепин Н. Н., Гусак Н. О.* Применение некоторых электромагнитных накладных преобразователей для контро-

ля изделий без разрушения // *Неразруш. методы и средства контроля и их применение в промышленности.* — Минск: Наука и техника, 1973. — С. 153–177.

10. *Тетерко А. Я.* Исследование электромагнитного поля подповерхностных дефектов и разработка средств электромагнитной дефектоскопии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: НИИ Интроскопии, 1977. — 23 с.
11. *Учанин В. Н.* Анализ эффективности вихретоковых преобразователей с ферритовыми сердечниками // *Материалы 15-й Межд. конф.* — «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». — Ялта–Киев: УИЦ — «НАУКА. ТЕХНОЛОГИЯ», 2007. — С. 126–128.
12. *А. с. 359504 СССР. МКИ G 01b27/86.* Устройство для контроля толщины гальванических покрытий / В. Г. Пахомов, Б. Д. Попович, А. Л. Рубин, А. В. Шарко. — № 1434916/25-28; Заявл. 05.05.70; Оpubл. 03.12.72, Бюл. № 35. — 2 с.
13. *А. с. 911310 СССР. МКИ G 01 N 27/90.* Способ настройки электромагнитных преобразователей / А. Я. Тетерко, Я. К. Бебкович, П. П. Диегуц, В. Н. Учанин и др. — 2972522/25-28; Заявл. 04.08.80; Оpubл. 07.03.82, Бюл. № 9. — 3 с.
14. *Пат. 4716366 США, МКИ G01B7/14.* Eddy current distance signal apparatus with temperature change compensation means / T. Hosoe, S. Ando, Y. Kawase; 749941; Заявл. 27.06.85; Оpubл. 29.12.87; НКИ 324/207. — 8 с.
15. *Учанин В. М., Гозуля В. М., Луценко Г. Г.* Дослідження вихрострумових методів оцінки глибини довгих тріщин в феромагнітних матеріалах // *Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів.* — Вип. 8: Неруйнівний контроль та діагностика неоднорідних об'єктів. — Львів: ФМІ НАНУ, 2003. — С. 76–83.
16. *А. с. 508735 СССР. МКИ G 01 n 27/86.* Электромагнитный преобразователь для неразрушающего контроля ферромагнитных материалов / Н. Н. Зацепин, Н. О. Гусак, А. В. Чернышев. — № 2016136/25-28; Заявл. 17.04.74; Оpubл. 30.03.76, Бюл. № 12. — 3 с.
17. *А. с. 649997 СССР. МКИ G 01 N 27/86.* Вихретоковое устройство для неразрушающего контроля изделий / В. В. Клюев, В. П. Курозаев, Ю. М. Шкарлет. — № 2310958/25-28; Заявл. 06.01.76; Оpubл. 28.02.79, Бюл. № 8. — 2 с.
18. *А. с. 418787 СССР. МКИ G 01 n 27/86.* Токовихревой датчик для неразрушающего контроля / А. А. Астафьев. — № 1793592/25-28; Заявл. 30.05.72; Оpubл. 05.03.74, Бюл. № 9. — 2 с.
19. *Пат. 3495166 США, МКИ G 01 r 3312.* Eddy current crack detector systems using crossed coils / D. Lorenzi, H. Migel, D. O'Connor; 629541; Заявл. 10.04.67; Оpubл. 10.02.70; НКИ 324-37. — 11 с.
20. *Hoshikawa Y., Koyama K.* A new eddy current probe with minimal liftoff noise and phase information on discontinuity depth // *Materials Evaluation.* — 2003. — № 3. — С. 423–427.
21. *А. с. 616574 СССР. МКИ G 01 n 27/86.* Накладной вихретоковый преобразователь к дефектоскопу / В. И. Рогачев, В. Л. Сорокин, Л. И. Трахтенберг, П. Н. Шкатов. — № 2453346/25-28; Заявл. 17.02.77; Оpubл. 25.07.78, Бюл. № 27. — 2 с.
22. *Контроль структуры и толщины металлических изделий с использованием анаксиальных преобразователей* / Б. И. Блажкевич, Г. Н. Макаров, Л. Л. Либакский, Ю. М. Шумков // *Физ.-хим. механика материалов.* — 1974. — № 3. — С. 89–94.
23. *Vigness I., Dinger I., Gunn H.* Eddy current type flaw detectors for nonmagnetic metals // *J. Appl. Phys.* — 1942. — № 13. — P. 377–383.
24. *Пат. 3611120 США, МКИ G 01r33/12.* Eddy current testing systems with means to compensate for probe to work piece spacing / F. Forster; 14752; Заявл. 26.02.70; Оpubл. 05.10.71; НКИ 324/37. — 13 с.
25. *Уменьшение чувствительности к влиянию зазора при контроле импульсным вихретоковым методом и использованием двухступенчатых дифференциальных датчиков* / Л. Шу, Х. Сон-лин, Ж. Вей, Ю. Пенг // *Дефектоскопия.* — 2008. — № 2. — С. 84–93.



26. *А. с. 622000 СССР. МКИ G 01n27/86.* Накладной вихре-токовый преобразователь к дефектоскопу / Э. В. Чуприяк, В. И. Бекузаров. — № 2469315/25-28; Заявл. 04.04.77; Опубл. 30.08.78, Бюл. № 32. — 3 с.
27. *А. с. 789730 СССР. МКИ G 01N27/90.* Способ многочастотного вихре-токового контроля и устройство для его осуществления / Ю. З. Билик, И. А. Ройтбург, М. З. Слущкая. — № 2611760/25-28; Заявл. 04.05.78; Опубл. 23.12.80, Бюл. № 47. — 4 с.
28. *А. с. 763773 СССР. МКИ G 01N27/90.* Вихре-токовый преобразователь / В. А. Денисов, В. А. Шарков, В. Д. Фалик, Е. Е. Шатерников. — № 2606600/25-28; Заявл. 28.03.78; Опубл. 15.09.80, Бюл. № 34. — 4 с.
29. *А. с. 436276 СССР. МКИ G 01N27/86.* Токовихревой модуляционный датчик / А. Я. Тетерко, В. Н. Учанин, П. П. Диегун. — № 18465101; Заявл. 14.11.72; Опубл. 15.07.74, Бюл. № 26. — 2 с.
30. *Учанин В. Н.* Исследование и разработка вихре-токового метода и средств обнаружения и оценки дефектов в материалах деталей летательных аппаратов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.11. — М.: ЦНИИТМАШ, 1982. — 21 с.
31. *А. с. 390431 СССР. МКИ G 01n27/86.* Накладной датчик к токовихревому дефектоскопу / А. В. Демин, В. Г. Мазаев, В. К. Попов. — № 1633718/25-28; Заявл. 15.03.71; Опубл. 11.07.73, Бюл. № 30. — 2 с.
32. *А. с. 577450 СССР. МКИ G 01N27/86.* Накладной датчик к токовихревому дефектоскопу / А. В. Демин, Д. К. Комогорцев, В. Г. Мазаев, В. К. Попов. — № 2382824/25-28; Заявл. 12.07.76; Опубл. 25.10.77, Бюл. № 39. — 2 с.
33. *А. с. 616574 СССР. МКИ G 01N27/86.* Накладной вихре-токовый преобразователь к дефектоскопу / В. И. Рогачев, В. Л. Сорокин, Л. И. Трахтенберг, П. И. Шкатов. — № 2453346/25-28; Заявл. 17.02.77; Опубл. 25.07.78, Бюл. № 27. — 2 с.
34. *Пат. № 2541772 (Франция).* G 01 N 27/90. Procédé et dispositif pour l'examen non destructif de junctions rivetées ou analogues au moyen d'une sonde à courants de Foucault / J.-L. Arnaud, M. Floret. — № 8303043; Заявл. 24.02.1984. Опубл. 31.08.84. — 22 с.
35. *Особенности конструирования дефектоскопов с датчиками градиентометрического типа / А. Я. Тетерко, К. А. Калганов, В. Н. Учанин и др. // Промышленное применение электромагнитных методов контроля. — М.: Изд-во МДНТП, 1974. — С. 79–85.*
36. *Тетерко А. Я., Учанин В. Н., Дорофеев А. Л.* Контроль дефектов под обшивкой // Новые физические методы неразрушающего контроля качества продукции. — М.: МДНТП, 1977. — С. 30–35.
37. *А. с. 868555 СССР, МКИ G 01 N 27/90.* Вихре-токовый преобразователь / А. Я. Тетерко, В. Н. Учанин, Ю. М. Кричевец, Ю. С. Грабский. — № 2874984/25-28; Заявл. 28.01.80; Опубл. 30.09.81, Бюл. № 36. — 2 с.
38. *А. с. 1767409 СССР, МКИ G 01 N 27/90.* Вихре-токовый преобразователь / В. Н. Учанин, Ю. С. Грабский. — № 4869272/28; Заявл. 19.07.90; Опубл. 07.10.92, Бюл. № 37. — 3 с.
39. *Учанин В. Н.* Вихре-токовый контроль сварных соединений // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 4. — С. 71–80.
40. *Panasjuk V. V., Teterko A. J., Uchanin V. N.* Eddy current detection of fatigue and corrosion defects and their parameters estimation // Tenth world conference on NDT. — 1982. Vol. 4. — P. 40–47.
41. *Выявление дефектов в неразъемных конструкциях / В. Н. Учанин, А. Л. Дорофеев, Ю. Г. Казамапов и др. // Авиационные материалы. — Вып. 6: Дефектоскопия металлов. — М.: ВИАМ, 1979. — С. 59–64.*
42. *Mottl Z.* The Quantitative Relations Between True and Standard Depth of Penetration for Air Cored Probe Coils in Eddy Current Testing / NDT International. — 1990. — 23, № 1. — P. 11–18.
43. *Учанин В. Н.* Вихре-токовые мультидифференциальные преобразователи и их применение // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2006. — № 3. — С. 34–41.
44. *Учанин В. Н.* Вихре-токовые методы выявления дефектов в зоне заклепок многослойных авиационных конструкций // Там же. — 2006. — № 2. — С. 3–12.
45. *Mook G., Hesse J., Uchanin V.* Deep Penetrating Eddy Currents and Probes // Materials Testing. — 2007. — 49, № 5. — P. 258–264.
46. *Uchanin V., Mook G., Stepinski T.* The investigation of deep penetrating high resolution EC probes for subsurface flaw detection and sizing // Proc. 8-th Europ. conf. for NDT, Barcelona. — 2002. — 312 p.
47. *Учанин В. Н., Семочкин С. В.* Разработка и исследование вихре-токовых преобразователей для контроля узлов самолетов фирмы «Боинг» в условиях эксплуатации // Праці 6-ї Нац. наук.-техн. конф. «Неруйнівний контроль і техн. діагностика». — Киев: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2009. — С. 347–350.
48. *Учанин В. Н.* Развитие вихре-токовых методов контроля: задачи, решения, перспективы // Мат. 5-ї Нац. наук.-техн. конф. і виставки «Неруйнівний контроль та техн. діагностика» (НКТД-2006). — Київ, 2006. — С. 46–54.
49. *Uchanin V., Lutcenko G., Nikonenko A.* Automated Eddy Current System for Flaw Detection and Sizing during In-service Stainless Steel Tube Inspection // 9-th Europ. conf. on NDT. — Berlin, 2006. — (www.ndt.net).
50. *Разработка вихре-токового тракта системы комплексного автоматизированного контроля железнодорожных осей / Г. Г. Луценко, В. Н. Учанин, А. В. Джаганян и др. // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. — Вип. 13: Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів та конструкцій. — Львів: ФМІ НАН України, 2008. — С. 27–36.*
51. *Разработка системы автоматизированного вихре-токового контроля перемычек коллекторов атомных станций / В. Л. Найда, В. Н. Учанин, А. А. Мозжухин и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 3. — С. 21–24.*



# СПОСІБ ВИЯВЛЕННЯ ПЛОЩИННИХ ВІДБИВАЧІВ, ОРІЄНТОВАНИХ В НАПРЯМІ, БЛИЗЬКОМУ ДО НАПРЯМУ ПОШИРЕННЯ ПОЗДОВЖНІХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ

## 1. Експериментальне вивчення можливості виявлення площинних дефектів з орієнтацією, близькою до орієнтації акустичної осі перетворювача

І. Б. КОЛБІН, Ю. О. ВОЛКОВ

*Виявлення площинних дефектів, орієнтованих у напрямі нормалі до поверхні вводу поздовжніх ультразвукових хвиль, було досить складною задачею, рішення якої до останнього часу не вдавалося знайти у багатьох випадках, наприклад, при контролі зварних з'єднань багатошарових посудин. Результати проведених експериментів дозволяють стверджувати, що дана проблема вирішується, якщо при умові наявності на контрольованій ділянці площинного відбивача використовувати ефект появи серії періодичних сигналів, час поширення яких перевищує час поширення донного сигналу.*

*Detection of plane defects oriented in the direction of the normal to the surface of application of longitudinal ultrasonic waves was a rather complicated problem. Until recently, it was not possible to solve it in many cases, for instance in monitoring welded joints in multilayered vessels. Results of the conducted experiments allow stating that this problem is solved, if under the conditions of the presence of a plane reflector in the monitored region, the effect of appearance of a series of periodical signals with the propagation time not greater than the propagation time of back-wall reflection signal is used.*

В різних галузях промисловості застосовують посудини для зберігання рідких та газоподібних середовищ. Серед них найбільше поширені такі, що мають монолітні обичайки. У випадках, коли умови експлуатації екстремальні (наявність високих значень тиску та температури, високої циклічності навантажень) застосовують посудини з багатошаровими обичайками, які забезпечують більшу надійність і збільшують термін експлуатації.

Незважаючи на високу надійність і у багатошарових обичайках посудин можуть утворюватися деякі специфічні і в той же час небезпечні дефекти. Так, на етапі виготовлення їх зварних з'єднань (ЗЗ) — попереднього наплавлення кромки обичайок — існує вірогідність виникнення площинних дефектів — несплавлень. В технічній документації на виготовлення та контроль цих посудин [1], [2] встановлено максимально допустиму площу таких несплавлень — не більше 3 мм<sup>2</sup>. На певному етапі експлуатації з невиданих після контролю несплавлень еквівалентною площею меншою 3 мм<sup>2</sup> під впливом циклічних навантажень можуть утворитися тріщини.

Подальше зростання тріщини (під впливом тих же навантажень) приводить до утворення зони відриву шару обичайки (рис. 1). Завдяки конструктивним особливостям швів такого типу (кут нахилу кромки ЗЗ становить 6°), орієнтація площини вірогідної тріщини та напрям нормалі до поверхні обичайки майже співпадають. Зростання утворених площинних дефектів у напрямі вертикалі обмежене зазорами між сусідніми шарами обичайки,

в горизонтальному напрямі можливості для збільшення їх розмірів нічим не обмежені.

До останнього часу існували проблеми, пов'язані з достовірною оцінкою технічного стану багатошарових посудин і в першу чергу зі знаходженням оптимального способу для виявлення вірогідних площинних дефектів у їх ЗЗ. Застосувати для цього радіаційний метод неможливо через високу трудомісткість та низьку достовірність при виявленні вірогідних площинних дефектів. Застосовуючи відомі способи ультразвукового (УЗ) контролю поперечними хвилями, наприклад, описані в [3], неможливо отримати інформацію стосовно зони ЗЗ, до якої примикають внутрішні шари обичайки.

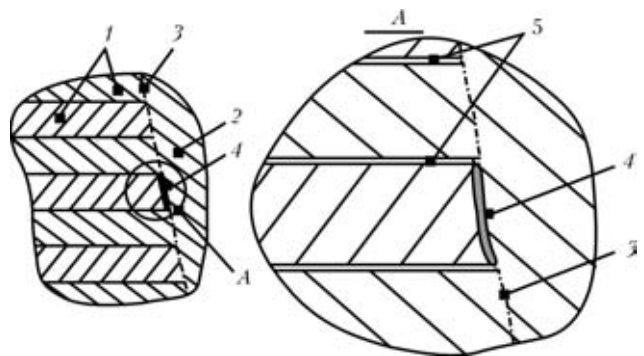


Рис. 1. Зона відриву шару рулонної обичайки, утворена у зварному з'єднанні багатошарової посудини: 1 — шари рулонної обичайки; 2 — зона наплавленого металу; 3 — межа сплавлення основного і наплавленого металу; 4 — площинний дефект (зона відриву рулонної обичайки); 5 — зазори між шарами рулонної обичайки



Серед способів УЗ прямим перетворювачем, призначених для виявлення у ЗЗ та інших деталях тих площинних дефектів, що мають орієнтацію, близьку до напрямку акустичної осі перетворювача, на час проведення досліджень не було відомо жодного, який би дозволяв виявляти такі дефекти у багатошарових ЗЗ посудин. Наприклад, для цього не можна застосувати спосіб виявлення вертикально орієнтованих площинних дефектів, оснований на зменшенні амплітуди донного сигналу прямого перетворювача, розміщеного над дефектом ([3], с. 50). Зважаючи на конструктивні особливості ЗЗ багатошарових посудин — довільну конфігурацію поверхонь швів на різних ділянках, технічно досить важко забезпечити однаковий стан (конфігурацію і шорсткість) в межах зовнішньої та протилежної їй внутрішньої поверхні контрольованого ЗЗ. А наявність суттєвих варіацій параметрів стану цих поверхонь приводять до неможливості відстеження закономірності зміни амплітуди донного сигналу на ділянці з вірогідним площинним дефектом.

Незважаючи на недоліки відомих способів УЗ контролю, було вирішено вести пошук рішення проблеми, базуючись на можливостях та ефектах, які можна отримати при введенні поздовжніх ультразвукових хвиль у напрямі нормалі до поверхні ЗЗ. Після проведення експериментальних досліджень було знайдено специфічний ефект, який виникає при локації площинних відбивачів поздовжніми хвилями.

Експерименти проводили на спеціальному еталоні (його конструкція та зображення наведені в роботі [4]. Відбивачі еталона — плоскодонні от-

вори з овальною формою дна, виготовлено відповідно до найбільш вірогідного варіанту виникнення у вище згаданих ЗЗ площинних дефектів (їх площини мали нахил  $6^\circ$  відносно нормалі до поверхні вводу). На нашу думку, такі відбивачі найбільш достовірно імітують зони відриву рулонних обичайок. Їх розміри становили: в напрямі горизонтальної осі 20; в напрямі нормалі до поверхні вводу 5 мм. Крім того, в деяких випадках дослідження проводили, роблячи поверхню вводу бокову поверхню еталона (при цьому розміри площини відбивача становили: 5 мм — в горизонтальному напрямі та 20 мм — в напрямі нормалі до поверхні вводу).

Використовуючи зазначений еталон та дефектоскоп УД 2-70 з комплектом прямих перетворювачів провели експериментальне вивчення тих ефектів, які виникають при поширенні поздовжніх хвиль в зоні площинних відбивачів, коли площини останніх орієнтовані в напрямі, близькому до напрямку акустичної осі (рис. 2).

В першу чергу визначили вплив орієнтації площини дефекту на величину прийнятих корисних сигналів. Конструкція еталона та чергове використання у якості поверхні вводу двох його взаємно протилежних поверхонь дозволили створити наступні кути між площинами відбивачів та акустичною віссю перетворювача:  $6^\circ$  проти годинникової стрілки (рис. 2, а) та  $6^\circ$  за годинниковою стрілкою (рис. 2, б). З рисунка видно, що коли використовувати геометро-оптичне уявлення щодо поширення ультразвукових хвиль в твердих матеріалах, то для отримання максимального луна-сигналу найбільш сприятливою орієнтацією площини

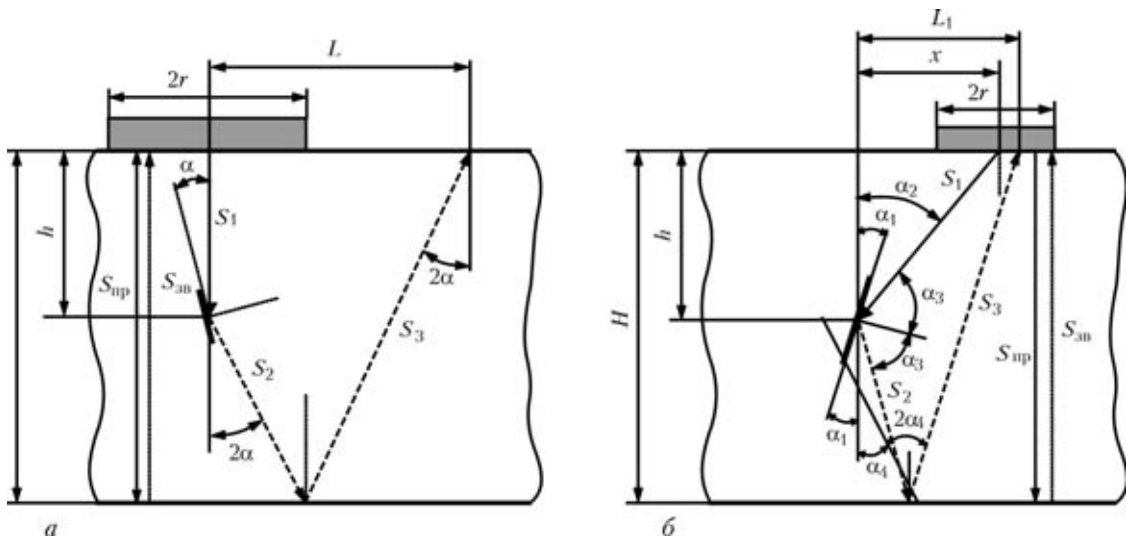


Рис. 2. Схеми поширення поздовжніх хвиль в робочому еталоні у випадку їх падіння на площину відбивача, яка відхилена проти (а) та за годинниковою стрілкою відносно акустичної осі (б):  $h$  — глибина залягання відбивача;  $H$  — товщина еталона;  $r$  — радіус перетворювача;  $x$  — відстань від центру перетворювача до проекції центру відбивача на робочу поверхню;  $L, L_1$  — відстані від центру відбивача до точки падіння на поверхню вводу променя, відбитого від площини відбивача та донної поверхні;  $S_1 \dots S_3$  — відрізки шляху, пройденого УЗ сигналами вздовж променів, відбитих від поверхні відбивача та донної поверхні;  $S_{пр}, S_{зв}$  — відрізки шляху, вздовж якого поширюється донний сигнал;  $\alpha, \alpha_1$  — кути нахилу площини відбивача відносно нормалі до робочої поверхні;  $\alpha_2$  — кут між променем та нормаллю до поверхні вводу;  $\alpha_3$  — кут падіння променя на площину відбивача;  $\alpha_4$  — кут падіння променя на донну поверхню



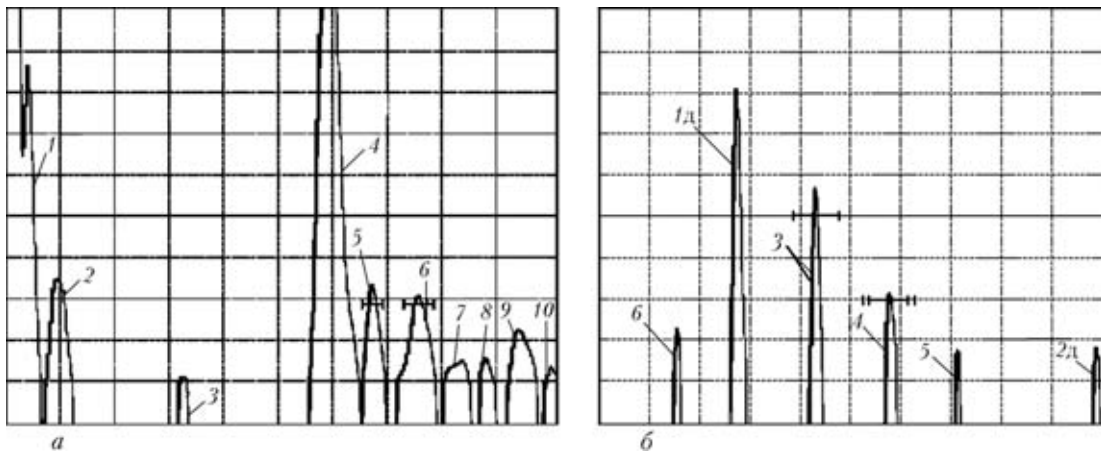


Рис. 3. Послідовність індикацій на екрані дефектоскопа УД2-70 при локації перетворювачем П111-5-К6: *а* — площинного відбивача висотою 5 мм, розміщеного на глибині 43 мм (параметри апаратури: затримка 1 мм; діапазон 78 мм; режим вимірювання товщини 1-2;  $H = 6,0$  мм; 1 — індикація зондуючого сигналу; 2, 3 — індикація, що належить шуму; 4 — індикація сигналу, відбитого від бокової поверхні плоскодонного відбивача; 5–10 — індикації, що належать послідовності періодичних сигналів); *б* — площинного відбивача висотою 20 мм, розміщеного на глибині 35 мм (параметри апаратури: затримка 60 мм; діапазон 130 мм; режим вимірювання товщини 1-2;  $H = 19,4$  мм; 1д, 2д — індикації першого та другого донного сигналів; 3–5 — індикації, що належать послідовності періодичних сигналів; 6 — індикація сигналу, двічі відбитого від бокової поверхні відбивача)

відбивача є поворот відносно акустичної осі на невеликий кут в напрямі за годинниковою стрілкою.

Але отримані експериментальні дані не підтвердили припущення щодо можливості реєстрації сигналу, який виникає в результаті дії геометрооптичного закону послідовного відбивання хвиль від відбивача та донної поверхні. У всіх можливих випадках орієнтації відбивача (як зображених на рис. 2, так і у випадку паралельної орієнтації площини дефекту відносно акустичної осі) реєстрували періодичну послідовність індикацій сигналів, амплітуда яких монотонно зменшувалася по мірі віддалення від початку розгортки (рис. 3). Сигнали реєструвалися незалежно від того, на якій глибині від поверхні вводу знаходився відбивач. і в будь-якому випадку індикації цих сигналів були розміщені на розгортці правіше індикації, що належала донному сигналу (або сигналу, відбитому від бокової поверхні плоскодонного відбивача). Як правило, в кожному з зазначених вище випадків можна було розрізнити три або більше сигналів (в деяких випадках до шести) — залежно від наявності шумів та їх амплітуди.

Визначення часу поширення кожного з сигналів дало змогу стверджувати, що вони не пов'язані з відбиттям від бокової поверхні відбивачів еталону (рис. 3, *а*).

Для всіх наведених вище випадків характерним було те, що величина затримки між будь-якими двома сусідніми періодичними сигналами мала однакове фіксоване значення, що свідчить про наявність певного періодичного механізму утворення таких сигналів. Результати експериментів, показані на рис. 3 дозволяють стверджувати, що часовий інтервал між періодичними сигналами

змінюється в залежності від параметрів відбивачів, використовуваних у даному випадку.

Аналіз отриманих даних проводили з використанням табличного відображення результатів. Нижче наведено таблицю з параметрами тих періодичних сигналів, які отримані з допомогою трьох різних перетворювачів з застосуванням відбивачів висотою 5 мм, нахилених під кутом  $6^\circ$  за годинниковою стрілкою відносно акустичної осі. Подібні до зображених в цій таблиці результатів (з невеликими відмінностями, про які буде сказано нижче) отримано і при застосуванні відбивачів висотою 20 мм, площини яких були паралельними до акустичної осі перетворювача. В таблиці наведено отримані значення амплітуд сигналів (у від'ємних децибелах)  $A$ , та значення відстані  $H$  (в міліметрах), яка відповідає часовому інтервалу поширення цього сигналу відносно зондуючого.

Зважаючи на те, що в зоні поширення ультразвукових хвиль знаходились лише три типа відбивачів: дно плоскодонного отвору, його бокова поверхня та донна поверхня еталона, можна стверджувати, що отримані сигнали можуть бути лише результатом тих процесів, які пов'язані з однією з відбиваючих поверхонь або їх сукупністю. Встановлено, що при розміщенні перетворювача в зоні з плоскодонним відбивачем висотою 5 мм (його ширина становила 20 мм), енергетичні характеристики донного сигналу змінювалися, але на порівняно незначну величину: амплітуда, що відповідає положенню перетворювача над відбивачем та амплітуда при зміщенні перетворювача в бік від першого положення, відрізнялися між собою так, що перша була менша за останню на величину від 1 до 3 дБ. І навпаки, при розміщенні перетворювача в зоні з відбивачем висотою 20 мм (його

Значення параметрів сигналів, отриманих в результаті локації площинних відбивачів висотою 5 мм поздовжніми хвилями

Тип перетворювача, частота $f_{\text{пр}}$ , МГц, амплітуда донного сигналу $A_d$ , дБ	Порядковий номер сигналу	Амплітуда $A$ , уявна глибина $H$	Значення параметрів сигналів $A$ та $H$ для розміщених на різній глибині відбивачів:			Донний сигнал (в положенні перетворювача над дальнім відбивачем), дБ
			Ближній відбивач ( $h_6 = 20$ мм)	Середній відбивач ( $h_c = 43$ мм)	Дальній відбивач ( $h_d = 80$ мм)	
П111-1,25-К20, $f_{\text{пр}} = 1,25$ МГц, $A_d = 67$ дБ	1	$A$	88,0	93	88	70
		$H$	124,5	126,5	122	
	2	$A$	91,0	88,5	90	
		$H$	153	144	144,5	
	3	$A$	86	80	Даних немає	
		$H$	183	153	—"	
П111-2,5-Кн, $f_{\text{пр}} = 2,5$ МГц, $A_d = 12$ дБ	1	$A$	39	46	33	13,5
		$H$	124	122,5	122,5	
	2	$A$	49,5	26	39	
		$H$	142	152,5	144,5	
	3	$A$	33	44	48	
		$H$	182,5	183	172,5	
П111-5-К20, $f_{\text{пр}} = 5$ МГц, $A_d = 38$ дБ	1	$A$	74	63,5	76	40
		$H$	112	110	109	
	2	$A$	63	63	50	
		$H$	124	123	123	
	3	$A$	62,5	47	67	
		$H$	155	153	154	

Примітки. 1. Пояснення відсутності даних щодо сигналу №3 наводяться в тексті. 2. Донний сигнал в положенні перетворювача над дальнім відбивачем

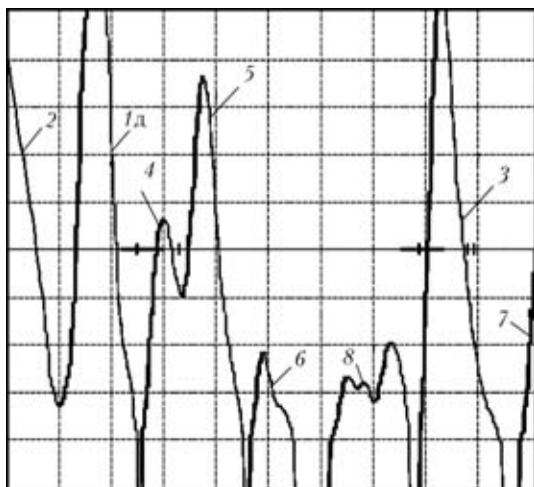


Рис. 4. Картина на екрані дефектоскопа УД 2-70, що ілюструє злиття та екранування сигналів різних типів (параметри апаратури: діапазон 51 мм; режим вимірювання товщини 0-1;  $H = 106$  мм; затримка 94 мм); 1д — індикація першого донного сигналу; 2 — індикація сигналу, двократно відбитого від бокової поверхні відбивача; 3 — індикація сигналу, трикратно відбитого від бокової поверхні відбивача; 4-7 — індикації, що належать послідовності періодичних сигналів; 8 — індикація комплексного сигналу, що складається з послідовності періодичних сигналів та шумів

ширина 5 мм) зафіксовано більш суттєву різницю цих двох сигналів — від 4 до 9 дБ.

До таблиці були занесені тільки ті дані, що стосуються корисних періодичних сигналів, які

надходили з уявної глибини, більшої за відстань до донної поверхні, та мали амплітуду, що дозволяла проводити їх розрізнення на фоні шуму та інших заважаючих сигналів. Саме тому в окремих випадках внесені до таблиці дані щодо відстані до відбивача (уявної глибини його залягання) не мають очікуваної періодичності, тобто часовий інтервал між будь-якими двома сусідніми сигналами не завжди становить однакове постійне (в межах похибки вимірювань) значення. Це можна спостерігати на рис. 4: амплітуда деяких корисних сигналів майже не відрізняється від амплітуди розміщених поруч сигналів шуму, що не дозволяє проводити їх розрізнення (наприклад, індикація 8 має комплексну природу, оскільки відображає не тільки корисний сигнал, але і сигнали-шуми, і вони не розрізняються між собою). Крім того, деякі корисні сигнали можуть екрануватися іншими сигналами, наприклад, тими, що виникають завдяки багаторазовому відбиванню пучка променів від бокової поверхні площинного відбивача в еталоні (індикація 3 відображає тричі відбитий від бокової поверхні відбивача сигнал, який внаслідок збігу часових параметрів з корисним сигналом поглинає останній). Крім того, індикації деяких сусідніх сигналів (наприклад, 4 та 5), не підпадають під загально застосований кри-



терій їх розрізнення і, як наслідок, фіксуються як один сигнал.

Щоб усвідомлено застосовувати ефект виникнення серії періодичних сигналів при проходженні поздовжніх хвиль в зоні площинного відбивача, необхідно дати теоретичне пояснення отриманим результатам. Це дозволить проводити з його допомогою контроль різних об'єктів (і в тому числі таких складних, як 33 багатошарових обичайок посудин).

*До настоящего времени обнаружение и идентификация плоскостных дефектов, ориентация которых совпадает или почти совпадает с направлением нормали к контролируемой поверхности, было достаточно сложной задачей. А в случае контроля сварных соединений многослойных толстостенных изделий, например, таких, как швы рулонных обечаек сосудов высокого давления, применяемых в нефтегазовой и химической отраслях промышленности, эта задача не имела технологичных и экономически оправданных решений.*

*Цель данной работы — нахождение достаточно простого и экономичного способа обнаружения и идентификации плоскостных дефектов, имеющих вертикальную или близкую к ней ориентацию (относительно доступной для контроля поверхности изделия). В первую очередь внимание было сконцентрировано на моделях плоскостных дефектов, которые могут появиться в швах рулонных обечаек толстостенных сосудов. Исследования проводили с использованием продольных акустических колебаний, излучаемых прямыми преобразователями. В случае нахождения преобразователя в зоне над моделью плоскостного дефекта был зафиксирован эффект появления серии периодических сигналов с временными параметрами, превышающими значение аналогичных параметров всегда сопутствующих им донного сигнала или сигнала от боковой поверхности модели дефекта.*

*Изучена закономерность появления таких периодических сигналов (для этого изменяли значение ориентации плоскостных отражателей:  $-6$ ,  $0$  и  $+6^\circ$  и их размеры в направлении распространения продольных волн: 5 и 20 мм). Эксперименты*

*показали: сигналы появляются в любом случае, независимо от угла наклона плоскостей отражателей, но их периодичность следования и относительная величина зависят от размера плоскости в направлении распространения объемных продольных волн.*

*В результате теоретического рассмотрения особенностей зафиксированных периодических сигналов было установлено, что причиной их возникновения являются дифракционные явления, в результате которых вдоль плоскости отражателя распространяются поверхностно-продольные волны, обладающие свойством повторно трансформироваться в продольные объемные волны на его краях. Сравнительно высокий (т. е. достаточный для фиксации без применения специальных технологий) уровень дифракционных сигналов можно объяснить тем, что в зоне, непосредственно прилегающей к поверхности отражателя, возникает эффект их усиления за счет интерференции поверхностно-продольных волн с объемными продольными.*

*Описанные выше особенности сигналов, возникающих при прохождении продольных волн в направлении, близком к направлению плоскости отражателей, могут служить для практического обнаружения и приблизительной оценки размеров плоскостных дефектов, что особенно актуально в случае неблагоприятной конфигурации элементов контролируемых изделий (например, в швах многослойных обечаек сосудов).*

1. ОСТ 26-01-221-86. Сосуды и аппараты многослойные рулонированные стальные высокого давления. — Общие технические условия.
2. ОСТ 26-01-163-84. Сосуды многослойные рулонированные стальные высокого давления. Методика ультразвукового контроля сварных соединений.
3. Методы акустического контроля металлов / Н. П. Алешин, В. Е. Белый, А. Х. Вовилкин и др. — М.: Машиностроение, 1989. — 456 с.
4. Пат. України № 78345, МПК (2006) G01N 29/14. Спосіб комплексного діагностування зварних з'єднань посудин та еталон-імітатор зон відриву рулонних обичайок для реалізації цього способу. — 15.03.2007. Бюл. № 3, 2007 р.
5. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. Справ. — М.: Машиностроение, 1991. — 750 с.

УНДГаз,  
Харків

Надійшла до редакції  
23.01.2010

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ

А. А. СМОЛИНА, А. А. ПОГОРЕЛОВ

*Сформулирована задача количественной оценки остаточных напряжений (ОН) в рамках плоской модели. Предложена методика количественной оценки, основанная на измерении коэрцитивной силы материала напряженной конструкции. Проведена экспериментальная проверка методики на примере контроля ОН в железнодорожных колесах.*

*The problem of quantitative assessment of residual stresses (RS) in terms of a plane model is defined. A procedure of quantitative assessment is proposed based on measurement of coercive force of stressed structure material. Experimental verification of the procedure is performed for the case of control of RS in railway wheels.*

При рассмотрении методов неразрушающего контроля контроль остаточных напряжений (ОН) можно выделить в самостоятельную область. Изучением данной проблемы занимаются различные исследовательские группы [1–15]. Обзор основных способов определения таких напряжений приведен в работе [7]. Технологическими процессами, в которых желательна количественное определение ОН, являются термообработка металлоконструкций [16], вибростабилизирующая обработка [17] и контроль напряжений при естественном старении изделий. Также возможна сортировка по величине ОН готовой продукции и полуфабрикатов в процессе изготовления изделия.

Одним из распространенных способов определения ОН в ферромагнитных материалах является магнитный метод контроля, в частности, метод магнитной структуроскопии и магнитошумовой. Как правило, эти методы носят качественный характер и позволяют выявить аномальные участки напряженного состояния на поверхности конструкции. Данные методы наименее трудозатратны и не требуют особых условий реализации.

В настоящей статье предлагается методика количественной оценки ОН при измерении коэрцитивной силы контролируемого участка изделия. Возможность данной оценки возникает при совместном применении магнитного и тензометрических методов. Некоторые этапы разработки данной методики описаны в работах [13–15].

Согласно методике определяются два параметра  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  — соответственно максимальные растягивающее и сжимающее напряжения в контролируемой области.

**Физический смысл параметров  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$ .** В недеформированном теле расположение молекул соответствует состоянию его теплового равновесия. При деформации расположение молекул меняется и тело выводится из первоначального состояния [18]. В трехмерном пространстве воз-

никновение сил, стремящихся вернуть тело в состояние равновесия, обычно представляют в виде тензора. Считается, что тензор симметричен:

$$\sigma_{ik} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}, \sigma_{ik} = \sigma_{ki}.$$

Симметричный тензор в точке может быть приведен к диагональному виду [19]. На практике часто рассматривается плоская задача нахождения ОН [20]. Таким образом, тензор напряжения может принять вид:

$$\sigma_{пл} = \begin{bmatrix} \sigma_{\max} & 0 \\ 0 & \sigma_{\min} \end{bmatrix}.$$

С точки зрения физики  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  представляют главные компоненты тензора напряжения при рассмотрении плоской задачи.

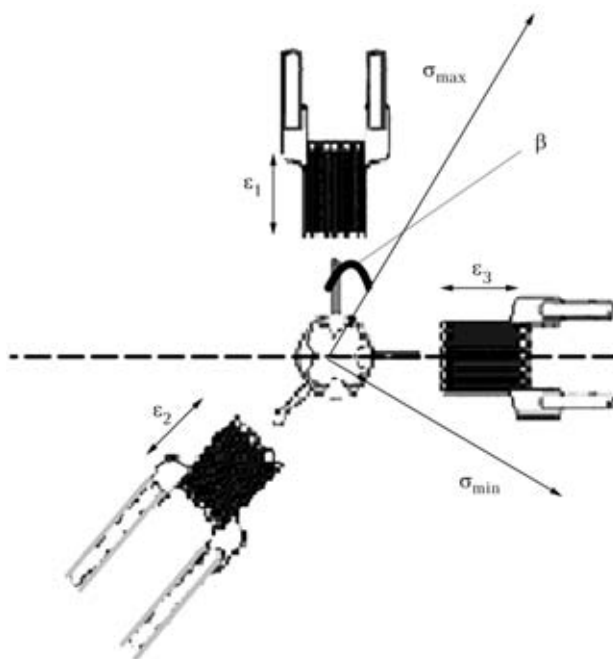


Рис. 1. Модель распределения напряжений на плоскости



На рис. 1 представлено схематическое изображение параметров  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  [20].

**Описание методики определения ОН.** ОН при частичной деструкции вызывают деформацию в материале. Согласно стандарту [20], при тензометрическом методе отверстия связь между деформациями и напряжением (см. рис. 1) имеет вид:

$$\epsilon_r = (\bar{A} + \bar{B} \cos 2\beta) \sigma_{\max} + (\bar{A} - \bar{B} \cos 2\beta) \sigma_{\min}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_r$  — деформация в  $r$ -м направлении;  $\beta$  — угол, отклонение направления распространения  $\sigma_{\max}$  от чувствительного элемента, измеряющего деформацию  $\epsilon_1$ ;  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$  — калибровочные константы.

Как отмечено в работе [18], значение коэрцитивной силы, измеряемое с помощью П-образного намагничивающего устройства, имеет корреляцию с деформацией, направленной перпендикулярно оси намагничивания в измеряемой области.

В соответствии с приведенным выше предположением, связь коэрцитивной силы и напряжений будет иметь вид:

$$H_{cr} = (C + D \cos 2\beta) \sigma_{\max} + (C - D \cos 2\beta) \sigma_{\min}, \quad (2)$$

где  $H_{cr}$  — значение коэрцитивной силы;  $C$ ,  $D$  — калибровочные константы.

Измерение коэрцитивной силы проводится в трех направлениях, по аналогии с тензометрическим методом отверстий.

Тогда значения  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  вычисляются по формуле:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{\max} \\ \sigma_{\min} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C-D & C+D \\ C+D & C-D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_+ \\ S_- \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arctg\left(\frac{t}{q}\right), \quad (4)$$

где  $S_+ = p + \sqrt{q^2 + t^2}$ ,  $S_- = p - \sqrt{q^2 + t^2}$ ,

$$p = \frac{Hc_3 + Hc_1}{2}, \quad q = \frac{Hc_3 - Hc_1}{2}, \quad t = \frac{Hc_3 + Hc_1 - 2Hc_2}{2},$$

$Hc_1$ ,  $Hc_2$ ,  $Hc_3$  — результаты измерения коэрцитивной силы.

Значение калибровочных постоянных  $C$  и  $D$  может быть определено в соответствии с выражением:

$$\begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{\max} + \sigma_{\min} & \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \\ \sigma_{\max} + \sigma_{\min} & \sigma_{\min} - \sigma_{\max} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_+ \\ S_- \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где значения  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  находятся любым деструктивным методом в той же области, в которой осуществляется магнитный контроль (при эксперименте для нахождения применялся тензометрический метод отверстия [20]).

**Проведение эксперимента.** Эксперимент проводили на железнодорожном колесе. Поверхность колеса разделили на 14 секторов. Первоначально проводили измерение коэрцитивной силы в трех направлениях для каждого сектора. Для измерения использовали магнитный структуроскоп КРМ-Ц-К2М. Время проведения полного измерения на одном секторе не превышало двух минут. Полученные значения коэрцитивной силы представлены в табл. 1.

Для определения значений  $C$  и  $D$  в секторе №1 были вычислены величины  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  с помощью тензометрического метода отверстий [19].

В табл. 2 представлены результаты количественной оценки напряжений в колесе, определенные в соответствии с формулами (3) и (4).

Значения калибровочных констант  $C$  и  $D$ , вычисленных по формуле (5), равны:  $C = 4,0176 \cdot 10^{-7}$ ;  $D = -4,2294 \cdot 10^{-10}$ .

Для проверки результатов количественной оценки напряжений, полученных на основании магнитных измерений, в секторах № 3 и 10 были получены оценки напряжений тензометрическим методом отверстий [19].

**Таблица 1.** Результаты измерения коэрцитивной силы

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$Hc_1$ , А/см	8,4	8,25	8,4	8,55	8,4	8,65	8,45	8,35	8,1	8,35	8,3	8,5	8,4	-
$Hc_2$ , А/см	8,25	8,25	8,15	8,3	8,3	8,4	8,35	8,25	8,25	8,2	8,3	8,2	8,25	-
$Hc_3$ , А/см	8,0	8,0	7,9	8,1	8,05	8,05	8,35	8,25	8,25	8,2	-	8,2	8,25	-

*Примечание.* В секторе 14 по техническим причинам измерения не проводили

**Таблица 2.** Результаты количественной оценки напряжения

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\sigma_{\max}$ , МПа	254	219	306	278	235	370	315	197	254	161	-	312	291
$\sigma_{\min}$ , МПа	-234	-199	-285	-257	-214	-349	-294	-177	-234	-140	-	-291	-27
$\beta^\circ$	7	23	0	-3	12	5	15	9	38	-6	-	-6	9

*Примечание.* В секторах 11 и 14 по техническим причинам измерения не проводили

Таблица 3. Сравнение результатов количественных оценок

Параметр	Сектор 1	Сектор 3	Сектор 10
$\sigma_{\max}$ , МПа	254/254	295/306	118/161
$\sigma_{\min}$ , МПа	-234/-234	-285/-285	-133/-140
$\beta^\circ$	0/7	0/0	-1/-6

Примечание. Перед чертой — результаты измерения тензорным методом, за чертой — методом магнитной структуроскопии.

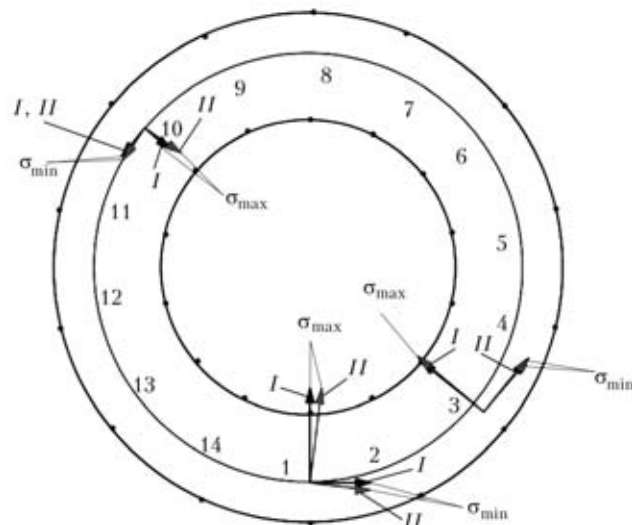


Рис. 2. Распределение напряжений на железнодорожном колесе: I – векторное изображение напряжений, определенных тензометрическим методом отверстий; II – векторное изображение напряжений, определенных методом магнитной структуроскопии

Результаты значений напряжений, полученных двумя методами в трех секторах, представлены в табл. 3.

На рис. 2 схематически изображены в векторном виде значения напряжений, полученных тензометрическим методом отверстий и методом магнитной структуроскопии.

Тензометрический метод отверстий требует значительно больших трудозатрат и времени, чем метод магнитной структуроскопии, поэтому сравнительные измерения тензометрическим методом отверстий проводили всего в трех секторах.

Как видно из сравнительных результатов количественных оценок (см. табл. 3), средняя погрешность оценки напряжения не превышает 10 %.

## Выводы

Предложена методика количественной оценки ОН, основанная на измерении коэрцитивной силы материала.

Предложена плоская модель ОН и сформулирована задача количественной оценки данных напряжений.

Для проверки методики был проведен эксперимент на железнодорожном колесе. Сравнение результатов оценки напряжений осуществляли путем контроля напряженного состояния тензо-

метрическим методом отверстий. Средняя погрешность определения оценок напряженного состояния составила около 10 %.

Выполненные исследования и проведенный эксперимент показали, что с помощью метода магнитной структуроскопии можно проводить количественную оценку напряжений в ферромагнитных конструкциях простой формы в производственных условиях.

1. Мужижкий М. Ф., Попов Б. Е., Безлюдько Г. Я. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций подъемных сооружений и сосудов, работающих под давлением // Дефектоскопия. — 2001. — № 1. — С. 38–46.
2. Новиков В. Ф., Яценко Т. А., Бахарев М. С. Зависимость коэрцитивной силы малоуглеродистых сталей от одноосных напряжений (Ч. 1) // Там же. — 2001. — № 11. — С. 51–57.
3. Оценка текущего состояния и остаточного ресурса прокатных валков на основе магнитного (по коэрцитивной силе) метода неразрушающего контроля / Г. Я. Безлюдько, В. Ф. Мужижкий, Л. А. Крутикова и др. // Там же. — 2002. — № 4. — С. 3–9.
4. Новиков В. Ф., Яценко Т. А., Бахарев М. С. Зависимость коэрцитивной силы от одноосных напряжений (Ч. 2) // Там же. — 2002. — № 4. — С. 10–17.
5. Бида Г. В. Магнитные характеристики тела — параметры неразрушающего контроля качества отпуска закаленных сталей (Обзор) // Там же. — 2002. — № 6. — С. 19–33.
6. Костин В. Н., Кадров А. В., Кусков А. Е. Оценка упругих и пластических деформаций ферритоперлитовых сталей по магнитным свойствам вещества // Там же. — 2005. — № 10. — С. 13–22.
7. Венгринович В. Л., Дмитриевич Д. В. Байесовский подход к неразрушающему контролю напряженно-деформированного состояния // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 4. — С. 45–53.
8. Лобанов Л. М., Бондаренко А. Ю., Бондаренко Ю. К. Оценка сварных соединений конструкций магнитным (коэрцитивным) методом для прогнозирования индивидуального остаточного ресурса // Там же. — 2004. — № 1. — С. 3–8.
9. Безлюдько Г. Я. Практика оценки состояния сварных швов по измерениям магнитной характеристики коэрцитивной силы металла // Там же. — 2004. — № 1. — С. 20–22.
10. Magnetic behavior of plain carbon steels as a function of applied stress and strain conditions / E. S. Gorcunov, S. V. Smirnov, S. V. Zadvorkin // Тез. 9-й Европ. конф. по НК в Берлине сентябрь 2006 (ECNDT).
11. Practice of Monitoring of the Stressed Condition, Fatigue of Welded Joints as Per Measurements of Magnetic Characteristic — Coercive Force / V. F. Matyuk, M. N. Delendikh, A. A. Osipov // Тез. 9-й Европ. конф. по НК в Берлине, сентябрь 2006 (ECNDT).
12. Kruticova L., Kazuykevich I., Bezlyudkko G. Ya. Magnetic Diagnosis of Metallurgical Equipment Recourse Considering a roll as an Example // Тез. 9-й Европ. конф. по НК в Берлине сентябрь 2006 (ECNDT).
13. Смолина А. А., Погорелов А. А. Задача контроля остаточных напряжений при совместном использовании магнитных методов и прямых методов тензометрии // Тез. 14-й Междунар. науч.-техн. конф. «Электромагнитные и акустические методы неразрушающего контроля материалов и изделий» (ЛЕОТЕСТ — 2009).
14. Смолина А. А., Погорелов А. А. Определение остаточных напряжений с помощью обобщения тензометрического метода отверстий и метода магнитной структуроскопии // Тез. 6-й Нац. науч.-техн. конф. «Неразрушающий контроль и научно-техническая диагностика» июнь 2009 (УкрНДТ).



15. Смолина А. А., Погорелов А. А., Богун Н. А. Проблемные вопросы измерения остаточных напряжений методом магнитной коэрцитиметрии // Зб. наук. праць 13-ї Міжнар. наук.-техн. конф. Серія «Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів» (ЛЕО-ТЕСТ — 2008).
16. Вишняков Я. Д., Пискарев В. Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. — М.: Металлургия, 1989. — 254 с.
17. Дрыга А. И. Вибростабилизирующая обработка сварных и литых деталей в машиностроении. — Краматорск: ДГМА, 2008. — 160 с.
18. Теоретическая физика. В 10-ти т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц // Теория упругости. Т. VII. — М.: Наука, 1987. — 248 с.
19. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1973. — 832 с.
20. ASTM E — 837-01<sup>E1</sup>. Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method.

ОАО УкрНИИТМ,  
Днепропетровск

Поступила в редакцию  
12.08.2009



## WCNDT 2012 – 18-я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА И КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ NDT

**Время проведения:** 18.04.2012 - 20.04.2012

**Место проведения:** Ю.А.Р., Дурбан

**Темы:** Неразрушающий контроль NDT

**Организатор и принимающая сторона**  
WCNDT 2012 – Институт НК ЮАР (SAINT)

### Отраслевая направленность конгресса WCNDT:

- Авиакосмическая, железнодорожная, автомобильная, судостроительная отрасли
- Нефтегазодобывающая, трубопроводная
- Архитектура и мостостроение
- Атомная промышленность, электроэнергетика
- Материалы (черные и цветные металлы, композиты, керамика, полимеры)
- Горное машиностроение
- Сертификация, тренинг
- Обработка данных, сенсоры
- Надежность систем контроля
- Стандартизация и др.

**Методы тестирования:** Радиографическое (RT), Ультразвуковое (UT), Акустико-эмиссионные (АТ), Инфракрасное термографическое (ТТ), Капиллярное (LT), Магнитно-порошковое (MT), Проникающее (PT), Индукционное (ET), Визуальное (VT) и другие

**WCNDT 2008** прошел в Шанхае в октябре. И хотя конференция и выставка изначально планировались к проведению в августе и были перенесены на октябрь из-за ужасного землетрясения, в ней приняли участие 764 делегата, причем 530 приехали из **50 стран мира**.

Нельзя как-то особо выделить какие-то отдельные сессии, посещаемость была везде хорошей, но, как обычно, наибольший интерес вызвали темы ультразвуковых фазированных решеток.

Что следует отметить, так это значительный интерес к выставке, как со стороны делегатов конференции, так и со стороны посетителей. **Всего 202 компании и организации экспонировали здесь свою продукцию и услуги** и только в первый день выставку посетили 3000 специалистов.

**Параллельно с конференцией прошли:** Генеральная ассамблея ICNDT, встречи комитета НК по ISOTC-135 и комитета политики и общих вопросов PGP-ICNDT. На ассамблее ICNDT был избран новый президент Майк Фарлей (MikeFarley) заменивший Дугласа Маршалла (DouglasMarshall). Также на этой встрече Германское общество NDT(DGZfP) было признано принимающей организацией **очередного форума 19 WCNDT 2016, который пройдет в Мюнхене**.

Но, прежде чем заглядывать так далеко в будущее, обращаем внимание, что 18-й WCNDT пройдет в ЮАР в апреле 2012 года. Презентацию **WCNDT 2012** провел президент Манфред Йоханнес (ManfredJohannes), также на церемонии закрытия форума в Шанхае была представлена 13-я азиатско-тихоокеанская конференция по неразрушающему контролю японского общества **APCNDT 2009** в Японии и 10-я европейская конференция по неразрушающему контролю **ECNDT 2010** в России.

## РАЗМЕР ЗЕРНА И КОРРЕЛЯЦИЯ ПРОЧНОСТНЫХ, ПЛАСТИЧЕСКИХ И ВЯЗКИХ СВОЙСТВ С КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛОЙ ФЕРРИТО-ПЕРЛИТНЫХ СТАЛЕЙ

Г. В. БИДА

*Между прочностными, пластическими, вязкими свойствами низкоуглеродистых и низколегированных сталей и коэрцитивной силы (КС) существует значимая корреляция, главную роль в которой играет размер зерна феррита. Предложен вариант интерпретации зависимости КС поликристаллических ферромагнетиков от размера зерна, суть которого состоит в том, что влияние собственно размера зерна на величину КС таких ферромагнетиков ничтожно мало. Он влияет на КС опосредованно через зависящие от него параметры доменной структуры. Измельчение зерна обуславливает увеличение числа доменов и, следовательно, числа доменных границ (ДГ) в поликристалле, а это влечет изменение характера распределения и увеличение плотности дефектов внутренней структуры в объеме смещающихся через зерна единичных ДГ (или «суммарной» ДГ), что приводит к увеличению КС поликристалла.*

*There exists a significant correlation between the strength, ductility, and toughness properties of low-carbon and low-alloyed steels and coercive force (CF), in which ferrite grain has the main role. A variant of interpretation of the dependence of polycrystalline ferromagnetic CF is proposed, the essence of which consists in that the influence of grain size proper on the value of CF of such ferromagnetics is negligibly small. It influences the FC indirectly through the domain structure parameters, dependent on it. Grain refinement causes an increase of the number of domains, and, therefore, number of domain boundaries (DB) in the polycrystal, and this leads to a change of the nature of distribution and increase of the density of internal structure defects in the volume of individual DB (or "summary" DB) shifting through the grains, thus resulting in an increase of polycrystal CF.*

При формировании уровня механических, вязких и хладостойких свойств низкоуглеродистых и низколегированных сталей в горячекатаном состоянии размер ферритного зерна играет одну из главных ролей. Металлурги в первую очередь стремятся получить мелкое зерно при оптимальном сочетании других структурных факторов [1, 2]. Существует известное соотношение Петча-Холла-Лоу [3–5], с помощью которого описывается зависимость нижнего предела текучести  $\sigma_T$  от обратной величины квадратного корня из диаметра полиэдрического зерна  $d_3$ . То же можно сказать о напряжении хрупкого разрушения  $\sigma_f$ :

$$\sigma_T = \sigma_0 + k_y d_3^{-1/2}, \quad \sigma_f = k_f d_3^{-1/2}, \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  — напряжение решеточного трения;  $k_y$ ,  $k_f$  — коэффициенты, зависящие от вида стали и условий деформирования ( $k_f > k_y$ ).

От размера зерна зависит и критическая температура хрупкости (порог хладноломкости)  $T_k$  сталей. Найдены эмпирические соотношения между  $T_k$  и  $d_3$ , между  $T_k$  и  $d_3^*$  [6]:

$$T_k = T_0 + k \ln d_3^{-1/2}, \quad T_k = D \ln d_3^{*1/2}, \quad (2)$$

где  $D$  — константа;  $k < 0$ ;  $d_3^*$  — размер зерна, при котором напряжение разрушения равно пределу текучести.

Мелкое зерно обеспечивает большую площадь суммарной межзеренной границы, что при одной и той же загрязненности металла способствует меньшей доле примесей на единицу этой площади и меньшему охрупчиванию металла, особенно при низких температурах.

Коэрцитивная сила широко применяется для неразрушающего контроля (НК) прочностных, пластических и вязких свойств стального проката [7–10] (рис. 1). Она линейно возрастает при увеличении прочностных свойств и убывает при увеличении пластичности. Параллельно линиям регрессии на расстоянии удвоенных (при доверительной вероятности 0,95) средних квадратических отклонений  $2S_y$  экспериментальных точек на рисунке показаны нижние доверительные границы (НДГ) таких отклонений. Параллельно оси абсцисс пунктиром обозначены нижние границы соответствия (НГС) прочностных и пластических свойств листов требованиям упомянутых выше нормативных документов. Точки пересечения пунктирных линий с НДГ определяют доверительный интервал ДИ2 показаний коэрцитивметра, в пределах которого с доверительной вероятностью 0,95 можно контролировать механические свойства листов. Доверительный интервал ДИ1 определен с учетом верхней границы соответствия ГОСТу для временного сопротивления при разрыве  $\sigma_b$ . Ударная вязкость с КС связана нелинейно (рис. 2). При температурах, существенно выше порога хладноломкости, ее корреляция



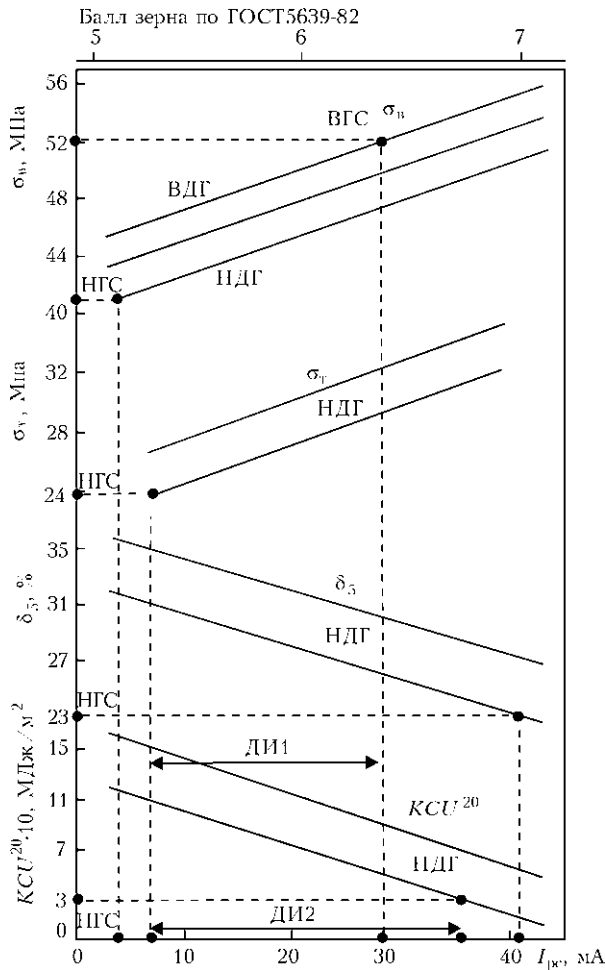


Рис. 1. Корреляция между механическими свойствами  $\sigma_n$ ,  $\sigma_t$ ,  $\delta_5$ ,  $KCU^{20}$  и показаниями коэрцитиметра  $I_{кз}$  для листов 20

с КС аналогична корреляции пластических свойств. С приближением к порогу хладноломкости уменьшение ударной вязкости сопровождается уменьшением КС, в чем немаловажную роль играет похожая на (1) и (2) ее зависимость  $H_c \sim 1/d_3$  от размера зерна. Физические и математические модели, объясняющие зависимости механических, вязких и хладостойких свойств от размера зерна, разработаны достаточно полно. Вместе с тем математические модели, адекватно описывающие такую зависимость КС как для железа и сталей с ферритной или феррито-перлитной структурой, так и других ферромагнитных поликристаллических материалов, разработаны меньше.

Классические модели магнитного гистерезиса, предложенные в работах [11–14], [15–20], [21–24] и учитывающие взаимодействие единичной доменной границы с единичным дефектом, не описывают зависимости коэрцитивной силы  $H_c$  от размера зерна  $d_3$  в поликристаллических ферромагнетиках. Вместе с тем, многочисленные экспериментальные результаты подтверждают такую зависимость [25–36].

Рассмотрим имеющиеся работы по данному вопросу.

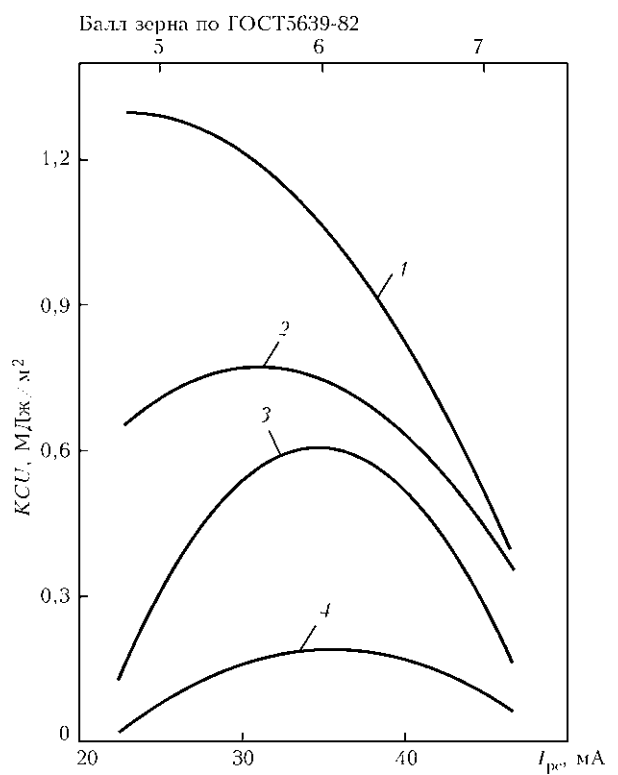


Рис. 2. Корреляционные связи с показаниями коэрцитиметра ударной вязкости стали Ст3сп, определенной при температурах: 1 —  $T = +20$ ; 2 —  $-20$ ; 3 —  $-40$ ; 4 —  $-60^\circ\text{C}$  (ВДГ, НДГ и НГС те же, что и на рис 1)

В работе [25] объясняют зависимость магнитных свойств ( в том числе КС поликристаллов) от размера зерна тем, что периферийная часть зерен имеет искаженную кристаллическую решетку и  $H_c$  там выше, чем в теле зерна. При мелких зернах «удельный вес» искаженных зон существенный, что приводит к росту  $H_c$ , а при больших размерах — незначителен по сравнению с неискаженной частью зерна и они меньше влияют на магнитные свойства и, следовательно, на КС поликристалла.

Ширина типичной большеугловой межкристаллитной границы составляет несколько атомных порядков [37]. Искажения приграничных зон в зернах однофазных поликристаллов представляют собой скопления дислокаций и также не составляют значительной доли в объеме зерна. Поэтому приведенный выше механизм влияния размеров зерен на КС через искажения приграничных зон в зерне имеет место, главным образом, у мелкозернистого металла.

Расчетный вариант зависимости  $H_c$  от  $d_3$  предложен в работе [31]. При этом использовано известное выражение Доринга для поля старта [28, 29]:

$$H_{сз} = \frac{3 \pi \gamma_{180}}{4 M_s d_{зар}}, \quad (3)$$

где  $\gamma_{180}$  — плотность поверхностной энергии 180-градусной доменной границы (ДГ);  $M_s$  — намагниченность насыщения;  $d_{зар}$  — диаметр зародыша.

В работе принято, что сильно удлиненные зародыши перемагничивания возникают на границах зерен и далее растут. При этом у каждой границы зерна возникает только один домен с обратной намагниченностью. Когда домен достигает размера зерна, происходит перемагничивание поликристалла, поэтому в выражении (3) для  $H_c$  он отождествил размер зародыша  $d_{\text{зар}}$ , способного к дальнейшему росту, с диаметром зерна ( $d_{\text{зар}} \cong d_3$ ). При распределении намагниченности в зернах по всем пространственным направлениям формула (3) примет вид [31]:

$$H_c = \frac{3}{2} \frac{3 \pi \gamma_{180}}{4 M_s d_3}, \quad (4)$$

и при  $\gamma_{180} \approx 1,5$  эрг/см<sup>2</sup> и  $M_s = 1700$  Гс для железа было получено выражение:

$$H_c = 3,1 \cdot 10^{-3} d_3^{-1} \text{ (см}^{-1}\text{)}, \quad (5)$$

связывающее КС с размером зерна и качественно подтверждающее экспериментальные данные.

В работе [37] полагают, что сопротивление смещению ДГ в сферическом зерне обусловлено увеличением поверхностного натяжения при ее растущей площади. ДГ, пересекающая центр сферы, отличается максимальной площадью при минимальной полной энергии системы: приложенное поле — поверхностное натяжение ДГ. Сопротивление смещению ДГ могут оказывать также магнитные полюсы, возникающие по обе стороны границы зерна.

Расчет [37] полностью повторяет методику вычисления  $H_c$  при задержке ДГ крупным неферромагнитным включением сферической формы [17, 46]. Здесь также учитывается, что при смещении ДГ изменяется площадь ее поверхности и, следовательно, поверхностное натяжение. Разница состоит в том, что при смещении через сферическое образование — неферромагнитное включение — площадь ДГ изменяется «изнутри», а при смещении в теле зерна ее площадь изменяется «снаружи». Таким образом, в обоих случаях вычисляют максимальное магнитное поле, необходимое для смещения ДГ от центра сферы (минимум энергии) до ее периферии (максимум энергии). При этом в [37] пренебрегают магнитостатической энергией, что, по мнению авторов, оправдано окружением рассматриваемого зерна тем же материалом с той же намагниченностью насыщения.

Здесь предлагается еще одна трактовка обратной зависимости  $H_c$  от размера зерна, учитывающая влияние на эту зависимость внутренней структуры зерна. При этом отметим, что наши

рассуждения относятся к реально встречающимся размерам зерен у низкоуглеродистых и низколегированных сталей в горячекатаном или нормализованном состоянии. Обычно реальный размах баллов по ГОСТ 5639–82 от 9 до 5, что соответствует изменению  $d_3$  от примерно 0,015 до 0,06 мм. Напомним также, что для железа ширина магнитного домена  $L_z \sim 10^{-3}$  мм, а толщина 180-градусной ДГ  $\delta_{180} \sim 10^{-5}$  мм [39, 40, 45].

В статистических моделях магнитного гистерезиса [39–49] предполагается, что величина  $H_c$  магнитомягких материалов формируется не за счет трудности зарождения доменов с обратной намагниченностью, а за счет задержки необратимого смещения 180-градусных ДГ локальными скоплениями<sup>1</sup> в теле границы дефектов кристаллического строения (ДКС) — флуктуациями числа неферромагнитных включений (НВ), числа и объемов локальных напряженных областей, напряжений, обусловленных краевыми и винтовыми дислокациями и др. [40–49]) вследствие их статистического распределения в кристалле. Равномерно (но нерегулярно) распределенные в теле кристалла дефекты междоменную границу не задерживают, поскольку в любом положении она пересекает практически одно и то же их количество. Задержку смещения оказывают также полюсы, возникающие на границах НВ.

Приведем обобщенную формулу для КС [46]:

$$H_c \approx \frac{(\ln q)^{1/2}}{\sqrt{2} M_c (L_x L_y)^{1/2} \cos \varphi} \times \left[ \left( 5,78 \alpha_b \gamma_{180}^2 + 15,36 M_s^2 \alpha_b \frac{d_b^7}{\delta_{180}^5} \right)^{1/2} + 0,6 |\lambda| G b (l_d \delta_{180} r)^{1/2} \right]. \quad (6)$$

Здесь  $d_b$ ,  $\alpha_b$  — средний диаметр и объемная концентрация неферромагнитных включений;  $\varphi$  — угол между магнитным полем и намагниченностью в домене;  $G$ ,  $b$  — модуль упругости и модуль вектора Бюргерса;  $l_d$  — элемент длины дислокации, параллельный плоскости ДГ;  $|\lambda|$  — константа изотропной магнитострикции (она характерна для поликристаллических материалов и ее можно оценить из выражения  $|\lambda| = 0,2(2\lambda_{<100>} + 3\lambda_{<111>})$ , где  $\lambda_{[100]}$ ,  $\lambda_{[111]}$  — константы магнитострикции в кристаллографических направлениях  $<100>$  и  $<111>$  [46, 51]).

Поскольку в расчетной модели домены имеют форму параллелепипедов со сторонами  $L_x$ ,  $L_y$ ,  $L_z$ , а при перемагничивании ДГ смещается в направлении  $\pm z$ , произведение  $L_x L_y = S_\sigma$  является площадью поверхности ДГ.

В выражении (6) первая сумма в квадратных скобках отражает общее влияние на  $H_c$  неферро-

<sup>1</sup>Под «скоплениями» подразумевается флуктуация числа дефектов в пределах всего объема ДГ, а не локальное скопление по типу облаков Коттрела [50].

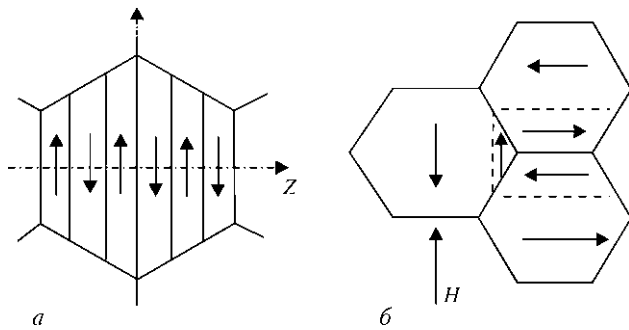


Рис. 3. Схематическое изображение разбиения кристаллита (зерна) на магнитные домены (а) и схема соприкасающихся трех полиэдрических зерен, содержащих по два домена (б) (пунктиром изображена ДГ)

магнитных включений (увеличения поверхностного натяжения ДГ при ее срыве с включения — первое слагаемое, плюс роль магнитных полюсов на поверхности включения, также задерживающих ДГ — второе), третье слагаемое определяет влияние напряжений, обусловленных дислокациями плотностью  $r$ . Из него и работ [40–49] следует, что КС  $H_c$  кристалла независимо от вида дефектов и формы их взаимодействия с ДГ обратно пропорциональна корню квадратному из средней площади<sup>2</sup> ДГ  $H_c \sim 1/\sqrt{L_x L_y} = 1/\sqrt{S_\delta}$ .

Рассмотрим поликристаллический материал и ответим на вопрос, что есть корень квадратный из площади ДГ для такого материала.

Автор работы [52] предложил, что если полиэдрические кристаллиты (зерна поликристалла) ориентированы хаотически и при этом направления осей легкого намагничивания смежных зерен образуют достаточно большие углы, то тогда каждый кристаллит будет вести себя как монокристалл, изолированный от соседних кристаллитов. Он будет делиться на плоскопараллельные домены.

На рис. 3, а схематически показано сечение полиэдрического зерна. Площади, перпендикулярные плоскости рисунка, и соответствующие изображенным на нем вертикальным линиям, есть площади ДГ, поэтому можно сказать, что корень из средней площади ДГ  $\bar{S}_\delta^{-1/2}$  пропорционален среднему размеру зерна  $\bar{d}_3$ . Тогда при усреднении площади ДГ  $S_\delta$  и размера зерен  $d_3$  по всему поликристаллу из (4) и работ [38–47] можно также получить экспериментальную зависимость  $H_c \sim \bar{S}_\delta^{-1/2} \sim \bar{d}_3^{-1}$ . На рис. 3, б показан один из вариантов перехода ДГ в соседнее зерно в случае двух доменов в зерне.

По аналогии с работой [30] уточним вычисленную по (6) численную зависимость  $H_c(\bar{d}_3)$  для железа. Имеющиеся расчеты [40–49] не учитывают варианты чистого (бездефектного) кристалла,

поскольку в этом случае  $H_c \cong 0$ . Поэтому оценим количественную связь  $H_c(\bar{d}_3)$  для отожженного железа, используя известный из литературы [39, 51] факт, что для него минимальная плотность дислокаций  $r = 10^8 \text{ см}^{-2}$ . При  $\alpha_B = 0$ ,  $M_s = 1710 \text{ Гс}$ ,  $\delta_{180} = 650 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ ,  $|\lambda| = 7 \cdot 10^{-6}$ ,  $b = 2,9 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ ,  $G = 21 \cdot 10^{11} \text{ дин/см}^2$  [32],  $L_z = 10^{-3} \text{ см}$ ,  $\cos\varphi = 0,834$  [38, 41, 45, 53, 54]:

$$H_c [\text{Э}] = 0,000065 \bar{d}_3^{-1} [\text{см}^{-1}]. \quad (7)$$

Из выражения (6), полученного при учете минимальной плотности дислокаций в отожженном железе и при отсутствии неферромагнитных включений следует, что коэффициент при  $\bar{d}_3$  крайне мал. Поскольку задерживать смещение ДГ могут лишь дефекты, находящиеся в основном в теле зерна, следовательно, размер зерна непосредственно на КС поликристалла не влияет. Но из экспериментов известно, что зависимость  $H_c$  от  $\bar{d}_3$  значительная (особенно при  $\bar{d}_3 < 0,5 \text{ мм}$  [25–34]). Следовательно, размер зерна влияет на КС поликристалла опосредованно. Каким образом?

Согласно работам [52, 54] ширина магнитного домена  $L_z$  (расстояния между линиями на рис. 1) связана с размером кристалла зависимостями, которые для трехосного кристалла с положительной константой анизотропии и для одноосного кристалла имеют вид

$$L_z \sim L_0^{1/2}. \quad (8)$$

Из выражения (8), полученного для крупных монокристаллов, следует, что ширина домена пропорциональна корню квадратному из размера монокристалла, или (согласно работе [52]) того образования, которое делится на домены — размера зерна:

$$L_z \sim (L_0)^{1/2} \sim (d_3)^{1/2}. \quad (9)$$

Поскольку для плоскопараллельных доменов их число в зерне обратно пропорционально ширине домена, то из выражения (9) следует, что число доменов, а следовательно, и число ДГ в зерне обратно пропорционально корню квадратному из его диаметра: чем мельче зерно, тем больше в поликристалле зерен и ДГ.

Отметим следующий факт: чем больше количество ДГ в зернах, тем больше площадь условной «суммарной» границы  $S_\Delta$  (просуммированной по всем ДГ в зерне и по всем зернам в поликристалле), тем больше ДКС встречает она при смещении<sup>3</sup>. При одной и той же объемной концентрации дефектов их плотность в «суммарной» границе мелкозернистого поликристалла выше, чем у крупнозернистого. Если ДКС в поликристалле распределены хаотически, то флуктуации их числа сильнее будут влиять на «суммарную» ДГ. А это приводит к большей задержке участков суммар-

<sup>2</sup>Как видно из сказанного, данный факт установлен в работах [40–49] давно, но авторы не обратили на него внимания.

<sup>3</sup>Полагаем, что в области КС смещаются практически все границы в поликристалле.



ной границы ДКС и повышению КС поликристалла.

Тело зерна — это матрица, в которой происходят все процессы намагничивания и перемагничивания ферромагнетика. В реальных условиях оно не бывает абсолютно бездефектным и смещение ДГ при перемагничивании задерживают находящиеся именно в нем ДКС. Если диаметр зерна во много раз превосходит размер однодоменности, то измельчение зерна приводит к увеличению числа доменов, а, значит, числа ДГ в поликристалле и, следовательно, к повышению вероятности встречи ДГ как с конкретными дефектами, так и их «скоплениями».

### Выводы

Размер зерна влияет на процессы перемагничивания и КС опосредованно — через общую плотность дефектов в теле как единичных, так и «суммарной» междоменной границы ДГ. Другими словами, от размеров зерна зависит плотность дефектов, пересекаемых «суммарной» границей и в конечном итоге определяющая КС поликристалла. При этом на КС влияет увеличение поверхностного натяжения за счет изменяющейся площади при прохождении через тело зерна и возможным появлением магнитных зарядов на границах соседних зерен.

1. *Лейкин И. М., Литвиненко Д. А., Рудченко А. В.* Производство и свойства низколегированных сталей. — М.: Металлургия, 1972. — 256 с.
2. *Пиккеринг Ф. Б.* Физическое металловедение и разработка сталей. — М.: Металлургия, 1982. — 184 с.
3. *Petch N. J.* The cleavage strength of polycrystals // *J. Iron Steel In-te.* — 1953. — **174**. — P. 25–44.
4. *Hall E. O.* The deformation and ageing of mild steel: III-discussions of results // *Proc. Phys. Soc.* — 1951. — **64-B**. — P. 747–759.
5. *Low J. R.* In: Relation of properties to microstructure. Cleveland: ASM, 1954. — P. 163–178.
6. *Норман С. Столофф.* Влияние легирования на характеристики разрушения / Разрушение. — Т.6. — М.: Металлургия, 1976. — С. 11–89.
7. *Буда Г. В., Горкунов Э. С., Шевнин В. М.* Магнитный контроль механических свойств проката. — Екатеринбург: УрО РАН, 2002. — 252 с.
8. *Буда Г. В., Камардин В. М.* Неразрушающий контроль вязких свойств проката // Дефектоскопия. — 1991. — № 7. — С. 10–21.
9. *Буда Г. В.* Неразрушающий контроль механических свойств стального проката (Обзор). I. Контроль прочностных и пластических свойств // Там же. — 2005. №5. — С. 39–53.
10. *Буда Г. В.* Неразрушающий контроль механических свойств стального проката (Обзор). 2. Контроль вязких свойств // Там же. — 2005. — № 5. — С. 54–76.
11. *Kersten M., Gottschalt P.* Einige Versuche über den Einfluss von Eigenspannungen auf Koerzitivkraft und kritische Feldstärke der Barkhausensprünge // *Zs. f. techn. Phys.* — 1940. — № 12. — P. 345–352.
12. *Kersten M.* Grundlagen einer Theorie der ferromagnetischen Hysterese und der Koerzitivkraft. Leipzig: Verlag Hirzel, 1943. — 56 s.
13. *Kersten M.* Zur Theorie der ferromagnetischen Hysterese und Anfangspermeabilität // *Phys. Zs.* — 1943. — № 3/4. — S. 63–67.
14. *Kersten M.* Über die Bedeutung der Versetzungsdichte für die Theorie der Koerzitivkraft rekristallisierter Werkstoffe // *Zs. f. angew. Phys.* — 1956. — **8**, № 10. — S. 497–502.
15. *Кондорский Е. И.* К вопросу о природе КС и необратимых изменений при намагничивании // *ЖЭТФ.* — 1937. — № 9-10. — С. 1117–1131.
16. *Кондорский Е. И.* О гистерезисе ферромагнетиков // Там же. — 1940. — № 10. — С. 420–440.
17. *Кондорский Е. И.* К вопросу о теории КС сталей // Там же. — 1948. — **63**, № 6. — С. 507–510.
18. *Кондорский Е. И.* К теории КС мягких сталей // Там же. — 1949. — **63**, № 1. — С. 37–40.
19. *Кондорский Е. И.* К теории КС и магнитной восприимчивости ферромагнитных порошков (в зависимости от плотности упаковки) // Там же. — 1951. — **80**, № 2. — С. 197–200.
20. *Кондорский Е. И.* Природа высокой КС мелкодисперсных ферромагнетиков в теории доменной структуры // *Изв. АН СССР. Сер. физика.* — 1952. — **16**, № 4. — С. 398–411.
21. *Neel L.* Effect des cavités et des inclusions sur le champ coercitif // *Cahiers de Physique.* — 1944. — № 25. — P. 21–44. (Пер. в кн.: Физика магнитных областей / Под ред. С. В. Вонсовского. — М.: Иностран. лит., 1951. — С. 215–239).
22. *Neel L.* Bases d'une nouvelle théorie générale du champ coercitif // *Ann. Univ. Grenoble.* — 1947. — **22**. — P. 299–343.
23. *Neel L.* Magnetisme, le champ coercitif d'une roüdre ferromagnétique cubique à grain anisotropies // *Comptes Rendus.* — 1947. — **224**. — P. 1550–1560.
24. *Neel L.* Nouvelle théorie du champ coercitif // *Physica.* — 1949. — **15**, № 1-2. — P. 225–234.
25. *Yensen T. D.* Magnetic properties of the ternary alloys Fe-Si-C // *TAJEE.* — 1924. — **43**. — P. 145–151.
26. *Yensen T. D., Ziegler N. A.* Magnetic properties of iron as affected by carbon, oxygen and grain size // *TASM.* — 1935. — **23**. — P. 556–576.
27. *Dahl O., Pawlek F., Pfaffenberger J.* Die magnetischen Eigenschaften elektrolytisch erzeugter Eisenbleche (Abhängigkeit von Korngröße, Blechdicke und Arsenzusatz). — Archiv f. d. Eisenhüttenwesen, 1935. — P. 103–112.
28. *Becker R., Doring W.* Ferromagnetismus. — Berlin: Springer Verlag, 1939. — P. 339–357.
29. *Вонсовский С. В., Шур Я. С.* Ферромагнетизм. — М.; Л.: Гостехиздат, 1948. — 816 с.
30. *Sizzo G. J.* Über dem Zusammenhang zwischen Korngröße und magnetischen Eigenschaften bei rein Eisen // *Zs. f. Phys.* — 1948. — № 13. — P. 557–562.
31. *Mager A.* Über den Einfluss der Korngröße auf die Koerzitivkraft // *Ann. d. Phys.* — 1952. — **11** № 1. — P. 15–16.
32. *Гудинаф Дж.* Теория возникновения областей самопроизвольной намагниченности и КС в поликристаллических ферромагнетиках // Сб. Магнитная структура ферромагнетиков. — М.: Иностран. лит., 1959. — С. 19–57.
33. *Подвойский Л.Н., Паусов А. И.* Применение математической статистики для оценки КС от величины зерна // *Завод. лаб.* — 1959. — № 6. — С. 753–756.
34. *Жетвин Н.И., Тунков В. П., Перцев М. А.* Технически чистое железо. — М.: Металлургиздат, 1962. — 199 с.
35. *Производство низкоуглеродистого железа /* П. Б. Гутнов, Б. Н. Сухотин, И. Я. Сокол и др. — М.: Металлургия, 1973. — 376 с.
36. *Kneller E.* Fine particle theory. In: *Magnetism and Metallurgy.* — New York and London: Academic Press, 1969. — S. 365–471.
37. *High-voltage Lorentz electron microscopy studies of domain structures and magnetization processes in pearlitic steels /* M. G. Hetherington, J. P. Jakubovics, J. A. Szpunar, B. K. Tanner // *Philosophical Magazine B.* — 1987. — **56**, № 5. — P. 561–577.
38. *Ван Флек Л. Х.* Микроструктура // Физическое металловедение. Вып. 2 / Под ред. П. Канна. — М.: Мир, 1968. — С. 402–437.
39. *Kneller E.* Ferromagnetismus. — Berlin, Gottingen, Heidelberg: Springer-Verlag, 1962. — 792 s.
40. *Dijkstra L. I., Wert S.* Effekt of Inclusion of Coerzitive Force of Iron // *Phys. Rev.* — 1950. — **79**, № 6. — P. 979–985.



41. Вицена Ф. По поводу связи КС ферромагнетиков с внутренними напряжениями // Чехосл. физ. журн. — 1954. — № 4. — С. 419–438.
42. Вицена Ф. О влиянии дислокаций на КС ферромагнетиков // Там же. — 1955. — № 4. — С. 480–501.
43. Malek Z. Die Abhängigkeit der Koerzitivkraft von der plastischen Deformation // Czech. J. of Physics. — 1957. — 7, № 2. — P. 152–168.
44. Malek Z. A study of the Influence of Dislokations on Some of the Magnetic Properties of Permalloy alloy // Ibid. — 1959. — № 9. — S. 613–626.
45. Kroupa F., Malek Z. Der Einfluss der plastischen Verformung durch Kaltwalzen auf die Koerzitivkraft // Ibid. — 1959. — № 9. — S. 627–637.
46. Trauble H. Magnetisierungskurve und magnetische Hysterese ferromagnetischer Einkristalle // In Moderne Probleme der Metallphysik, 2, Springer-Verlag / Ed. A. Seeger. — Berlin-Heidelberg-New York, 1996. — S. 157–475.
47. Pfeiffer K.-H. Mikromagnetische Behandlung zwischen Verstetzungen und Blochwänden // Phys. Stat. Sol. — 1967. — 20, № 1. — S. 395–411.
48. Pfeiffer K.-H. Mikromagnetische Behandlung zwischen Verstetzungen und Blochwänden // Ibid. — 1967. — 21, № 2. — S. 837–856.
49. Pfeiffer K.-H. Zur Theorie der Koerzitivfeldstärke und Anfangssuszeptibilität // Ibid. — 1967. — 21, № 2. — S. 857–872.
50. Кульман-Вилсдорф Д. Дислокации // Физическое металловедение. — Вып. 3. — М.: Мир, 1968. — С. 9–84.
51. Шульце Г. Металлофизика. — М.: Мир, 1971. — 503 с.
52. Киттель Ч. Физическая теория ферромагнитных областей самопроизвольной намагниченности // Физика магнитных областей / Под ред. С. В. Вонсовского. — М.: Иностран. лит., 1951. — С. 20–116.
53. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. — М.: Металлургия, 1974. — 400 с.
54. Бозорт Р. Ферромагнетизм. — М.: ИИЛ, 1956. — 784 с.
55. Канн Р. У. Возврат и рекристаллизация // Физическое металловедение. — Вып. 3 / Под ред. Р. Канна. — М.: Мир, 1965. — С. 371–442.

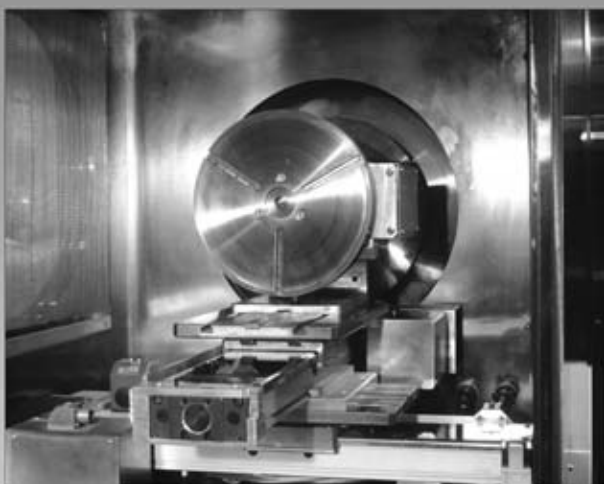
Ин-т физики металлов УрОРАН,  
Екатеринбург

Поступила в редакцию  
16.02.2010

## Разработано в ИЭС

### Малогобаритные установки для ЭЛС в приборостроении

Десять установок СВ-112/103 с внутренними размерами вакуумной камеры 640x640x640 мм введены в промышленную эксплуатацию.  
Время вакуумирования до  $5 \cdot 10^{-4}$  мм рт.ст. составляет меньше 5 мин.



Установка СВ-112 комплектуется стационарной пушкой мощностью до 15 кВт, двухкоординатным столом (X-X' и Y-Y', перемещение 200 мм), универсальным вращателем и задней бабкой

## ВЫБОР ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН

В. А. СИДОРОВ, А. Е. СУШКО

*Появление современных систем стационарного контроля для металлургического оборудования требует разработки новых подходов к оценке технического состояния, учитывающих нестационарность нагружения. В статье обоснован выбор комплекса диагностических параметров для контроля состояния комбинированных редукторов сортовых прокатных станов.*

*Appearance of modern systems of stationary control for metallurgical equipment requires development of new approaches to assessment of the technical condition, allowing for the non-stationary nature of loading. The paper substantiates selection of a set of diagnostic parameters for monitoring the condition of combined reducers of section mills.*

Современный сортовой прокатный стан включает от 15 до 30 клеток, имеющих индивидуальный или групповой привод. Мощность привода прокатной клетки 300...1000 кВт, частота вращения входного вала 300...1000 об/мин, частота вращения выходных валов 10...1000 об/мин, а для чистовых блоков мелкосортных станов может составлять 1000...10000 об/мин. Часто используется схема привода с комбинированным редуктором, совмещающим функции редуктора и шестеренной клетки. Конструкция комбинированных редукторов ограничивает доступ к некоторым узлам механизма (рис. 1) для определения их технического состояния.

Высокая степень автоматизации, насыщенность механическим оборудованием требует изменения подходов к обеспечению эксплуатационной надежности данного оборудования. Требование необходимости безотказной работы комплекса металлургических машин в данном случае не может быть решено традиционными методами периодических осмотров и диагностирования. Необходимо использование стационарных систем диагностирования с использованием комплекса диагностических параметров. Оценка технического состояния металлургического оборудования, работающего при неопределенном нестационарном нагружении, не может проводиться методами, которые используются для роторных машин, работающих в длительном режиме.

Особенности диагностирования и проявлений технического состояния механического оборудования металлургических предприятий рассматривали в работах [1–4]. Появление современных систем стационарного контроля для металлургического оборудования требует разработки новых подходов к оценке технического состояния.

В работе рассмотрен вопрос выбора диагностических параметров для стационарных систем

контроля механического оборудования, в частности, комбинированных редукторов сортовых прокатных станов.

Необходимость постоянного контроля оборудования прокатных станов обосновывается скоростью развития повреждения при наиболее неблагоприятном стечении обстоятельств — ошибок эксплуатации и приложении внештатных технологических нагрузок.

Относительно металлургических машин скорость развития повреждений не может быть определена путем проведения активного эксперимента на действующем оборудовании или модели. Математическое моделирование неисправных состояний также не может быть использовано из-за отсутствия исходных данных, необходимых для расчетных моделей. Это предполагает рассмотрение любой внештатной ситуации как пассивного эксперимента с последующим анализом зафиксированных данных.

Прекращение подачи смазочного материала к узлам комбинированного редуктора привода вертикальных валков прокатной клетки среднесорто-



Рис. 1. Общий вид привода прокатной клетки с комбинированным редуктором

вого стана привело к внеплановой остановке стана. По результатам анализа токовых и частотных графиков развития повреждений отмечены два периода: период устойчивой работы в течение часа (рис. 2, а) и период развития повреждения (рис. 2, б). Реализация первого периода стала возможной из-за наличия масляной пленки на поверхности контактирующих деталей. Развитие повреждения происходило быстро, в течение трех минут и привело к повреждению зубьев конической передачи из-за смещения валов при износе подшипников.

Иницирующим событием в данном случае послужило увеличение частоты вращения приводного двигателя на 7,5 об/мин. Это подтверждает необходимость использования для описания развития повреждения теории катастроф (марковских процессов). Плавное изменение параметров системы (отработка существующей на контактирующих поверхностях масляной пленки) приводит к скачкообразному изменению физических процессов в зоне контакта. В данном случае переход от граничного трения ( $\mu = 0,01$ ) к сухому трению ( $\mu = 0,1$ ). Иницирующее событие (повышение частоты вращения на 7,5 об/мин) к такому эффекту привести не могло.

Наличие режима холостого хода связано с паузами по 5 с между прокаткой слитков. Последовательное увеличение тока холостого хода в 1,3, а затем в 2 раза стало первым признаком повреждения. Токковая нагрузка рабочего хода и размах частоты вращения начали изменяться на 1 мин позже. Следует выделить две стадии в развитии повреждения: увеличение размаха частоты вращения двигателя от 1,0 до 3,9 об/мин (ток холостого хода при этом увеличился с 3,7 до 12,5 %); стабилизация размаха частоты вращения на уровне 3,3 об/мин (ток холостого хода при этом продолжал увеличиваться до 19,6 %).

Предполагая исходное состояние удовлетворительным, имеем два перехода в техническом сос-

тоянии — сначала к плохому, а затем к аварийному состоянию. Ток рабочего хода увеличивался на значение холостого хода. Исходя из приведенных данных, можно сделать следующий выбор диагностических параметров: ток холостого хода — определяет техническое состояние механического оборудования; размах частоты вращения — изменение или стабилизация данного параметра определяет границы технического состояния; можно высказать предположение об изменении технического состояния при увеличении значений тока холостого хода и размаха частоты вращения в 2,6 раза — аналогично различию, принятому в стандартах, регламентирующих значения вибрационных параметров.

Решение поставленной диагностической задачи следует продолжить изучением свойств объекта контроля — механической системы металлургической машины. Как для любой механической системы в качестве диагностических параметров можно использовать [5]:

- анализ шума: акустического и механических колебаний;
- анализ параметров вибрации;
- анализ параметров температуры;
- результаты визуального осмотра.

Учитывая субъективность принятия решений при визуальном осмотре и анализе шумов механизма и необходимость постоянного контроля за изменением технического состояния, для стационарной системы следует принять параметры вибрации и температуры.

Параметры температуры, подлежащие контролю: температура в локальных контрольных точках; скорость изменения температуры в контрольных точках; изменение разности температуры на входе и выходе системы смазывания редуктора привода прокатной клетки.

Необходимость использования дополнительного диагностического параметра (температуры) при

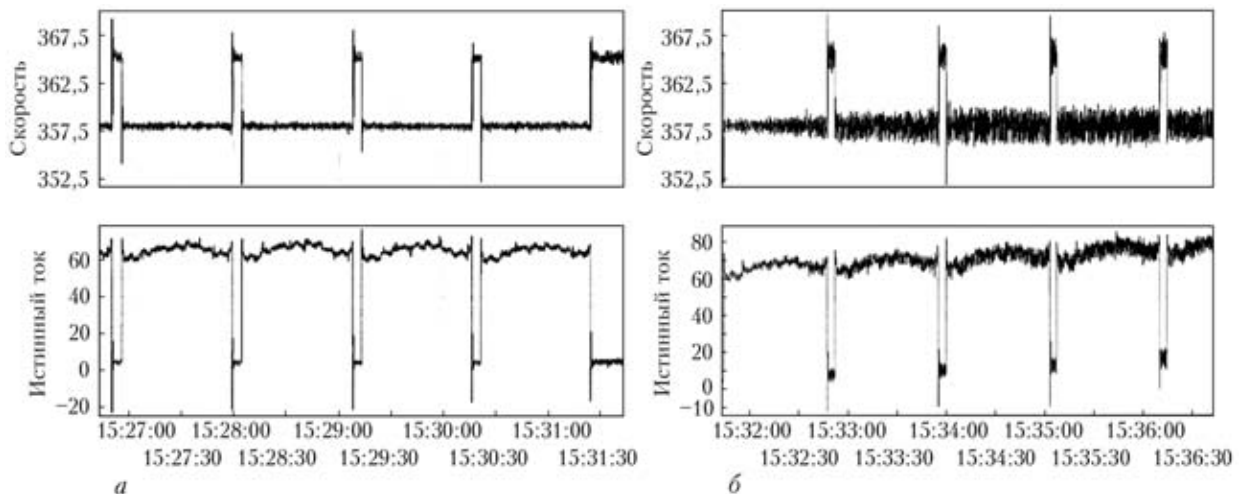


Рис. 2. Изменение токовых параметров и частоты вращения при номинальном режиме (а) и при развитии повреждения (б)

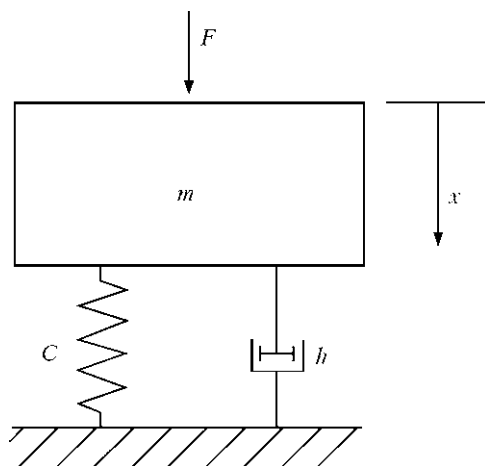


Рис. 3. Одномассовая расчетная модель для изучения механических колебаний

контроле механической системы объясняется наличием повреждений, снижающих значения параметров вибрации при своем развитии. Например, проворачивание наружного кольца подшипника в корпусе, уменьшение зазоров в подшипнике.

Основной источник информации о внутреннем состоянии механического оборудования — механические колебания. Диагностическая модель может быть представлена одномассовой расчетной моделью (рис. 3) с параметрами: масса  $m$ , жесткость  $C$ , коэффициент демпфирования  $h$ . Колебания массы  $m$  возможны при воздействии силы  $F$ , переменной относительно направления колебаний.

Параметры колебательного процесса определяются уравнением [6]:

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + Cx = F.$$

На основании приведенного выше уравнения проведен анализ возможных изменений в колебательном процессе при возникновении повреждений в механической системе: параметры колебаний могут измениться при изменении приложенной силы, массы, жесткости и коэффициента демпфирования; изменение приложенной силы приведет к изменению токовой нагрузки на двигатель, что должно быть зафиксировано; значительное изменение массы при износе для металлургических машин недопустимо, поэтому полагаем массу  $m$  — величиной, имеющей постоянное значение; изменение жесткости  $C$  одновременно приведет к изменению коэффициента демпфирования  $h$ . Это может произойти как постепенно, при ослаблении резьбовых соединений, ослаблении посадки элементов, так и внезапно, при возникновении трещин в корпусных деталях; изменение технического состояния приведет к изменению комплекса параметров вибрации механизма.

Традиционное решение контроля вибрационных параметров механизмов роторного типа, работающих в длительном режиме при постоянных

нагрузках, заключается в наблюдении за постоянством вибрационных параметров. Механическое оборудование прокатных станов работает в нестационарных скоростных режимах и при непостоянной силовой нагрузке, обусловленной различием в технологическом режиме нагрева и прокатки. Поэтому принципы контроля технического состояния металлургических машин должны отличаться наблюдением за изменением скорости нарастания параметров.

Следовательно, диагностическая система постоянного контроля должна быть ориентирована на возможность предупреждения быстроразвивающихся повреждений и позволять диагностировать развитие повреждений. Для этого необходим контроль минимум двух параметров: виброскорости и виброускорения. Необходимо зафиксировать внешние воздействия на механическую систему: частоты вращения двигателя — определяющий скоростной режим работы; ток рабочего хода — для определения степени перегрузки механизма.

Параметры вибрации, подлежащие контролю: виброскорость, среднеквадратичное значение в частотном диапазоне 2...500 Гц — для контроля энергии вибрации; виброускорение, пиковое и среднеквадратичные значения в частотном диапазоне 10...5000 Гц — для контроля развития повреждений; спектральная и временная форма вибрационных сигналов — для распознавания неисправностей.

Частотные диапазоны должны быть согласованы с информативными частотами возможных повреждений.

Распознавание неисправностей с использованием спектрального анализа затрудняется неоднозначностью проявления неисправностей при различных частотах вращения и при различной нагрузке. Изменение нагрузки на двигатель также изменяет вид спектрограммы. Стационарная система, работая в режиме накопления информации (обучения), может определить зависимости между входными воздействиями и выходными реакциями, что необходимо предусмотреть в алгоритме функционирования.

Нелинейные зависимости, наличие зон неустойчивости и стабилизации позволяет утверждать, что в механическом оборудовании наряду с детерминированными процессами присутствуют и стохастические. Стабильность вероятностных характеристик последних определяется техническим состоянием системы. Амплитуда составляющих виброскорости и стабильность значений виброускорения могут быть связаны с изменением скоростного режима или технического состояния комбинированного редуктора. Решение данной задачи заключается в определении неизменности вибрационных параметров при снижении частоты вращения.



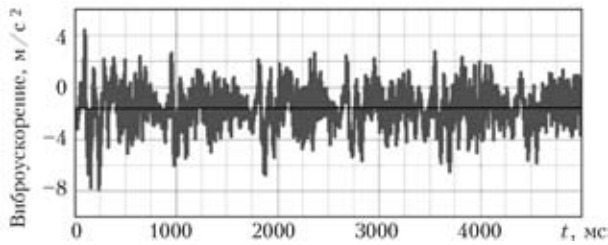


Рис. 4. Пример временной реализации вибрационного сигнала

Практически исправный механизм будет иметь минимальный уровень вибрации с минимальными случайными отклонениями отдельных параметров. Ухудшение состояния приводит к увеличению вероятностных характеристик случайных отклонений — происходит накопление малых повреждений и выбор дальнейшего развития повреждения. Когда выбор сделан, возрастают значения детерминированных процессов и уменьшаются изменения случайных отклонений. Закономерности развития повреждений, имея общее проявление, различными для каждого механизма, что усложняет задачу распознавания технического состояния.

Решение может быть получено при разделении задачи контроля технического состояния и диагностирования вида повреждения. В этом случае может быть использован анализ временной реализации вибрационного сигнала (рис. 4). Сравнительный анализ изменения состояния редуктора привода прокатной клети проведен по выборкам вибрационного сигнала в двух контрольных точках при работе

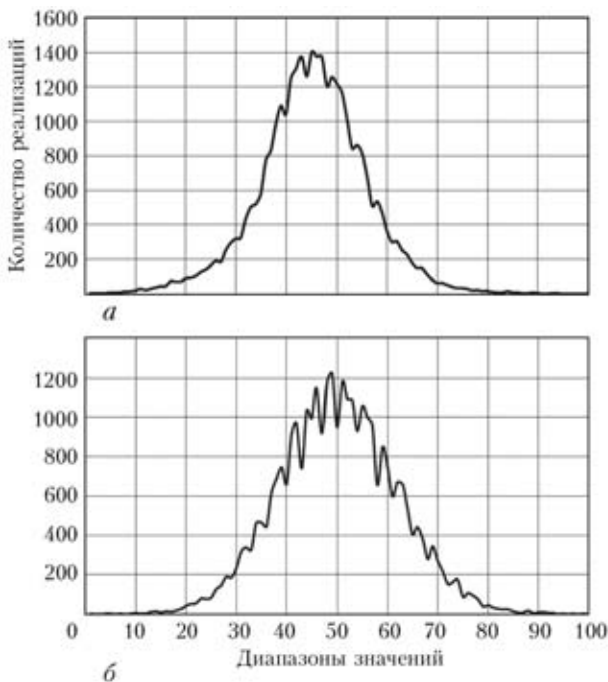


Рис. 5. Распределение количества реализаций по диапазонам измерения по контрольной точке А в режиме холостого хода 19.07.09.7:00 (а) (6,06 — максимум; -7,86 — минимум; 13,92 — размах) и 29.08.09.10:18 (б) (-6,94 — максимум; -14,14 — минимум; 7,2 — размах)

в режиме холостого хода (рис. 5) и режиме рабочего хода, зафиксированных с периодом 1 месяц. Каждая реализация содержит 32000 значений в коротком временном интервале. Определены закономерности распределения количества реализаций относительно диапазонов измерений.

Отражение изменения в техническом состоянии связано с изменением или стабильностью размаха колебаний и с изменением положения максимального количества реализаций относительно диапазона значений.

В приведенном примере произошло смещение положения максимального количества реализаций от диапазона 40...50 % в диапазон 50...60 %. Согласно предположениям, приведенным в работе [7], это свидетельствует об ухудшении технического состояния.

При работе в переходном режиме разгона, остановки эффективно использование комбинированных зависимостей внешних воздействий и реакций системы. Например, использовать в качестве параметров характеристики электродвигателя: ток якоря и частоту вращения, в качестве функции отклика — виброускорение корпуса шестеренной клети во время прокатки металла (рис. 6). Анализ

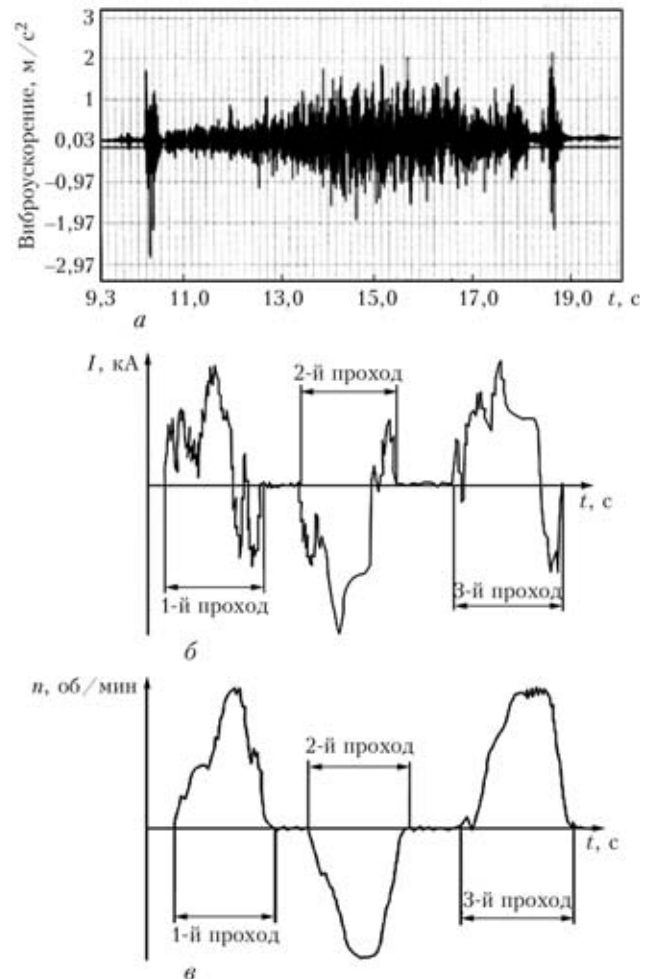


Рис. 6. Временные реализации сигнала виброускорения второго прохода (а); тока якоря (б); частоты вращения ротора (в)

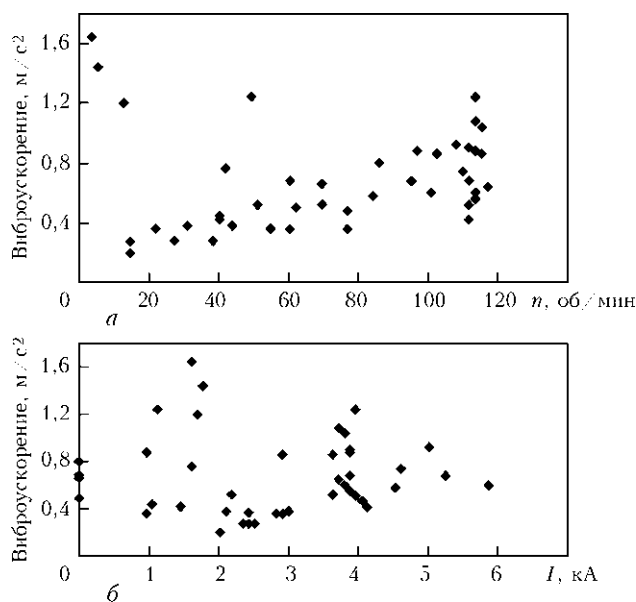


Рис. 7. Диаграммы рассеяния, построенные по координатам: виброускорение — частота вращения (а); виброускорение — ток (б)

полученных данных указывает на значительные изменения нагрузки привода и скорости (так, нагрузка в течение первого прохода дважды имеет отрицательное значение). Этим и характеризуется любой переходный процесс, независимо от причины возникновения (пробуксовка валков, отклонения в технологии прокатки). Изменения токовых характеристик приводят к изменению механических колебаний в функции, связанной с техническим состоянием системы.

Построенные диаграммы рассеяния (рис. 7) между такими текущими значениями параметров, как виброускорение, частота вращения и токовые характеристики в едином временном масштабе позволяют предположить наличие между виброускорением и частотой вращения связь, близкую к линейной, с рассеянием относительно центра. Между значениями виброускорения и тока однозначная связь отсутствует, что согласуется с выводами работы [8].

Предлагаемый перечень диагностических параметров включает внешние воздействия и реакции системы: частоту вращения двигателя; токовую нагрузку двигателя; параметры вибрации — виброскорость и виброускорение; параметры температуры.

Эффективным дополнением может быть стационарная или переносная аппаратура для визуального

осмотра внутренних элементов механизма, позволяющая выполнить уточнение характера повреждений во время текущих ремонтов и профилактик, подтвердив правильность поставленного диагноза. Эффективность функционирования системы определяется степенью использования информации о техническом состоянии. Сообщения о текущем состоянии должны стать постоянной информацией для эксплуатационного персонала.

## Выводы

В работе стационарной диагностической системы необходимо выделить два уровня задач: задачи контроля, решаемые введением пороговых значений, и задачи диагностирования, решаемые определением диагностических признаков возможных ремонтных воздействий. Необходимым является использование комплексных показателей и набора диагностических правил для распознавания изменения технического состояния.

Дальнейшие исследования позволят сформировать алгоритм распознавания технического состояния механического оборудования металлургических предприятий на основе адаптируемых подходов, учитывающих многообразие возможных проявлений.

1. Сидоров В. А., Ошовская Е. В. Особенности проявления и выявления поломок металлургических машин / Захист металургійних машин від поломок. — Мариуполь, 2000. — Вып. 5. — С. 14–19.
2. Диагностирование механического оборудования металлургических предприятий / В. Я. Седуш, В. М. Кравченко, В. А. Сидоров, Е. В. Ошовская. — Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2004. — 100 с.
3. Сушко А. Е., Демин М. А. Вибродиагностика в системах технического обслуживания по фактическому состоянию оборудования металлургических производств. — Вибрация машин: измерение, снижение, защита. — 2005. — № 1. — С. 6–9.
4. Радчик И. И., Рябков В. М., Сушко А. Е. Комплексный подход к вопросам надежности работы основного и вспомогательного оборудования современного металлургического производства // Оборудование. Технический альманах. — 2006. — № 1. — С. 24–28.
5. Кравченко В. М., Сидоров В. А., Седуш В. Я. Техническое диагностирование механического оборудования. — Уч. пособие. — Донецк: ООО «ЮгоВосток, Лтд», 2009. — 459 с.
6. Иорши Ю. И. Виброметрия. Измерение вибрации и ударов. Общая теория, методы и приборы. — М.: Машгиз, 1963. — 771 с.
7. Барков А. В., Баркова Н. А., Азовцев А. Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. — С.-Пб.: Изд. центр С.-Пб.ГМТУ, 2000. — 169 с.
8. Явленский А. К., Явленский К. Н. Теория динамики и диагностики систем трения качения. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. — 184 с.

## ПРОБЛЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ БУКСОВОГО УЗЛА КОЛЕСНОЙ ПАРЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

В. А. ТИМОФЕЕВ

*Анализируется парадоксальная ситуация в железнодорожном транспорте — непреднамеренная фальсификация НК наиболее ответственного узла подвижного состава — буксового подшипника. На примере Главного управления вагонного хозяйства показан начальный момент запуска механизма запланированного железнодорожном происшествии и приемлемые пути решения этой проблемы в отрасли.*

*A paradoxical situation in railway transportation is analyzed, namely unintended falsification of NDT of the most critical component of the rolling stock - the axle bearing. The initial moment of triggering the mechanism of planned railway accident and acceptable ways of solving this problem in the industry are shown in the case of Chief Administration of the Carriage Stock.*

Состояние колесных пар, буксовых узлов, надежная работа буксовых подшипников имеют особое значение для безопасности железнодорожного движения и скорости доставки грузов. Работа неисправной колесной пары и ее узлов может завершиться не только неплановой остановкой состава, но и аварией и даже катастрофой.

В зависимости от веса перевозимого груза от момента отказа буксового подшипника до его полного разрушения и излома шейки оси достаточно 7...30 км пробега колесной пары [1]. Поэтому для объективной оценки состояния буксовых узлов параметры комплексов неразрушающего контроля (НК) должны соответствовать действующим национальным и европейским стандартам.

В данной работе рассматривается только НК наиболее ответственного в плане безопасности движения узла вагона, локомотива, а именно буксового узла колесной пары и оборудование для его реализации.

Для НК буксовых узлов в отечественной и зарубежной практике применяются три основных метода контроля: ультразвуковой, вихретоковый и магнитопорошковый.

Ультразвуковой контроль (УЗ) как новый метод позволяет повысить степень автоматизации, контроля, частично исключить субъективный фактор оператора.

Но стоимость комплексов для контроля буксового узла достаточно высока — до двух миллионов гривен. Опыт эксплуатации их незначительный, существуют проблемы в методологии проектирования и эксплуатации, а также технические проблемы, рассмотрение которых выходит за рамки статьи.

Внедрять в производство комплексы необходимо постепенно, опытными партиями, центра-

лизованно анализируя и накапливая информацию с целью исключения недоработанных моделей.

Так, финансово состоятельные организации за последние несколько лет внедрили ультразвуковые комплексы фирмы «Микроакустика» (вагонные депо Козятин, Жмеринка, Дарница, Конотоп), УЗ модульную установку СНК КП-8, разработки УкрНИИНК (депо Дебальцево), комплекс фирмы «Робокон» (ВЧД Козятин).

Вихретоковый контроль буксовых узлов не получил широкого распространения и применяется на отдельных предприятиях для НК роликоподшипников.

Магнитопорошковый контроль вообще и контроль узлов буксового подшипника в частности является самым распространенным, простым, дешевым и обеспечивает уровень раскрытия дефекта — до 1 мкм [2] (для сравнения, действующие ультразвуковые системы — до 2 мкм [1], т. е. магнитопорошковый метод НК в два раза чувствительнее ультразвукового).

По имеющимся данным для контроля узлов буксового подшипника в подчиненных Главному управлению вагонного хозяйства вагоноремонтных заводах используются только магнитопорошковые системы НК (дефектоскопы проектов 6733Б, РЭ2677, производства СССР, и более современные МД 14ПКМ, производства СКБ «Неркон» Украина). По экспертным оценкам до 90 % всех предприятий Укрзализныци для контроля узлов буксового подшипника используют магнитопорошковый метод и, возможно, указанные выше специализированные дефектоскопы.

Большие объемы применения магнитопорошкового метода объясняются его высокой чувствительностью к поверхностным трещиноподобным дефектам наглядностью результатов по сравнению с ультразвуковой аппаратурой, небольшой стоимостью,



простотой конструкции и высочайшей надежностью. Этим методом обнаруживаются усталостные трещины в начальной стадии их появления, успешно контролируется состояние изношенности и напряженного состояния металла [2].

В то время, как импортная техника магнитопорошкового контроля, особенно универсальные системы, продолжает развиваться быстрыми темпами, национальные разработки на основе этого метода контроля не проводятся. Последняя разработка указанных выше специализированных дефектоскопов проводилась около 15 лет назад.

Современная элементная база позволяет создать новые или модернизировать устаревшие универсальные и специализированные установки магнитопорошкового контроля (в частности, деталей буксового узла) гораздо выше по объективности, наглядности и качеству эксплуатационных параметров, чем ультразвуковые.

Результаты магнитопорошкового контроля могут регистрироваться в виде изображения на мониторе. К ним можно применить все известные технические возможности обработки оптических изображений с измерением размеров, координат, протоколированием результатов контроля, выдачей паспорта колесной пары. К сожалению, отечественные разработчики этим не занимаются.

Однако модернизация и(или) замена специализированных установок магнитопорошкового контроля деталей буксового узла колесной пары на большинстве ремонтных предприятий Укрзалізнички необходима и по другой, более серьезной, причине.

Можно предположить, причем с довольно большой вероятностью, что магнитопорошковые специализированные установки для контроля деталей буксового узла колесной пары типов 6733Б, МД 14ПКМ, возможно и других, неизвестных нам, типов, применяемые на предприятиях по ремонту подвижного состава всех видов в Укрзалізнички, не соответствуют действующим нормативным документам по НК, а именно:

ГОСТ 21105–87. Контроль неразрушающий, магнитопорошковый метод (далее ГОСТ 21105–87);

ДСТУ ISO 9934-1–2005. Магнитопорошковая дефектоскопия. Ч. 1. Общие понятия. (Аналог евростандарта ISO 9934-1.2001) (далее ДСТУ ISO 9934-1–2005);

ДСТУ ISO 9934-3–2005. Неразрушающие испытания. Магнитопорошковая дефектоскопия. Ч. 3. Оборудование. (Аналог евростандарта ISO 9934-3–2002) (далее ДСТУ ISO 9934-3–2005);

ЦВ-0052. Інструкція з неруйнівного контролю деталей та вузлів вагонів магнітопорошковим, вихрострумовим та ферозондовим методами та з випробування на розтягання (далее ЦВ-0052).

Параметры указанных установок в несколько раз ниже требуемых, поэтому НК деталей буксо-

вого узла и в первую очередь внутренних и наружных колец подшипников напрессованных и ненапрессованных на ось не выполняется, а в лучшем случае непреднамеренно фальсифицируется. Для подтверждения этого тезиса проанализируем паспортные характеристики двух установок: 6733Б (разработчик ВНИИ ЖД СССР, 1980-х годов выпуска) и МД 14ПКМ (разработчик ГСКБ «Неркон», г. Днепропетровск, производится до настоящего времени). Сравним их режимы с требуемыми нормами, установленными ГОСТ, ДСТУ и ЦВ-0052 и с реально измеренными.

Существует два режима магнитопорошкового контроля: способ остаточной намагниченности (СОН) и способ приложенного поля (СПП). Выбор способа контроля зависит от магнитных свойств контролируемого материала и требуемой чувствительности контроля.

Контроль в режиме СПП проводится в следующих случаях: контролируемая деталь выполнена из магнитомягкого материала; контролируемая деталь имеет сложную форму или малое удлинение; при контроле небольших участков крупногабаритной техники и т. д.

Такие технологические операции при режиме СПП, как намагничивание, нанесение индикатора, осмотр выполняются одновременно, а это не всегда удобно. Кроме того, в приложенном поле не всегда обеспечивается более высокая чувствительность, чем в режиме остаточной намагниченности (СОН). Это объясняется тем, что в СПП магнитный индикатор осаждается по волокнам металла, в местах структурной неоднородности, по рискам, в местах резкого изменения конфигурации детали.

Контроль в режиме СОН проводят в случаях, если деталь выполнена из магнитотвердого материала, имеющего коэрцитивную силу  $H_c > 9,5$  А/см [2], а намагничивающее устройство позволяет создать поле с напряженностью, близкой к техническому насыщению ( $H_m$ ).

Контроль СОН имеет ряд существенных достоинств: возможность нанесения индикатора в течение часа после намагничивания; простота расшифровки, так как индикатор в меньшей степени оседает по рискам, наклепу; обеспечивается более высокая производительность контроля и т. д. Поэтому если нет ограничений на его применение, предпочтительнее использовать именно СОН.

Обе установки 6733Б и МД 14ПКМ при контроле внутренних колец подшипников буксового узла, напрессованных на ось колесной пары, работают в режиме остаточной намагниченности (СОН).

Установка 6733Б для циркулярного намагничивания внутренних колец подшипников буксового узла, напрессованных на ось колесной пары, использует энергию конденсаторной батареи (не менее 5 импульсов) до 3 кА.

МД 14ПКМ для намагничивания этой же детали использует действительное значение тока одной полярности (несколько периодов выпрямленного напряжения). Номинальный ток намагничивания 2,5 кА, напряжение — до 10 В.

Кольца подшипников изготавливаются из стали ШХ 15СГ по ТУ 14-1-923-74, магнитные свойства которой (остаточная индукция  $B_r = 0,79$  Тл, коэрцитивная сила  $H_c = 36$  А/см, напряженность поля насыщения 180 А/см [2] позволяют проводить их магнитопорошковый контроль способом СОН. Шероховатости поверхности колец ( $Ra < 2,5$  мкм) позволяют получить необходимый высший уровень условной чувствительности А, т. е. гарантируется минимальная ширина раскрытия условного дефекта до 2 мкм.

Однако надо иметь в виду, что данные по магнитным свойствам конструктивных сталей приведены для собственно металла, получены не на конкретных деталях, а на тороидальных образцах без посадочных зазоров. Реально, на практике, избежать зазоров невозможно. Кроме того, магнитные свойства материала колец подшипников существенно зависят от первичной термообработки при изготовлении и эксплуатационных термообработках при снятии колец с оси и напрессовке их на ось. Поэтому практически остаточная индукция  $B_r$  зависимости от выше перечисленных факторов изменяется в пределах 0,79...0,88 Тл, что дает возможность применять СОН с достижением условного уровня чувствительности А в соответствии с ГОСТ 21105-87 и ДСТУ ISO 9934-1-2005 при намагничивании колец полем напряженностью  $H = 180...200$  А/см.

Таким образом, поле с  $H = 180$  А/см надо рассматривать как минимальную характеристику установки магнитопорошкового контроля колец подшипников буксового узла колесной пары для определения хотя бы теоретической ее пригодности для эксплуатации в системе безопасности железнодорожного движения. Этот минимальный норматив и был использован для дальнейших исследований.

В соответствии с Приложением 2 к ГОСТ 21105-87 режим СОН для колец подшипников буксового узла, изготовленных из стали ШХ 15, возможен. Причем для полного технического насыщения необходимо создать  $B_r = 0,79$  Тл, а для обеспечения режима А минимальная остаточная индукция составит 0,69 Тл (рис. 1).

В соответствии с п. 1 Приложения 4 ГОСТ 21105-87 определяют напряженность поля намагничивания по кривым намагничивания материала объекта контроля с учетом необходимости его технического насыщения. Как видно из кривых намагничивания, в режиме СОН для колец из стали ШХ 15 для полного технического насы-

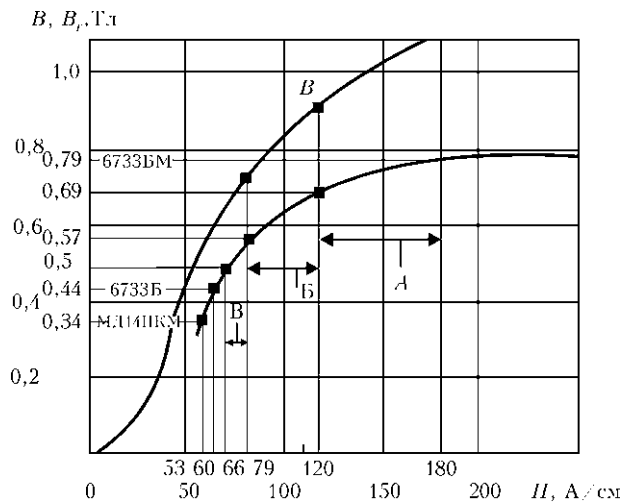


Рис. 1. Кривые намагничивания и остаточной индукции стали ШХ 15СГ по ТУ14-1-923-74 (А, Б, В — уровни чувствительности)

щения необходимо приложить поле напряженностью 180 А/см.

В этом режиме для колец из этой же стали для обеспечения режима чувствительности А достаточно приложить минимальное поле напряженностью 120 А/см.

В отечественной инструкции по НК — ЦВ-0052, в табл. 5.3 приведены способы контроля и напряженность намагничивающего поля для деталей вагонов. Для колец подшипников установлена напряженность поля в режиме СОН — 180 А/см, т. е. до полного технического насыщения.

В соответствии с Приложением 5 ГОСТ 21105-87 для намагничивания внутренних колец подшипников диаметром 157 мм, одетых на ось в режиме СОН, требуется для обеспечения чувствительности А намагничивающий ток от 5,7 до 8,5 кА. Примерно такую же расчетную норму дает и ДСТУ ISO 9934-1-2005.

Дефектоскоп проекта 6733Б по своим техническим характеристикам обеспечивает импульсный ток до 3,0 кА. Создаваемая при этом напряженность составит в идеальном случае 60 А/см при  $B_r = 0,44$  Тл (по кривым намагничивания), что не соответствует ни одному из уровней чувствительности, определенных Приложением 2 ГОСТ 21105-87 (рис. 1).

Для МД 14ПКМ, действующий ток которого составляет 2,5 кА, показатели еще хуже, а именно  $H \approx 53$  А/см или  $B_r = 0,34$  Тл.

На рис. 1 приведены кривые намагничивания стали ШХ 15 в режиме СОН. На рис. 2 — пересчет остаточной индукции, соответствующей конкретному уровню чувствительности по Приложению 2 ГОСТ 21105-87.

В режиме СОН модернизированный дефектоскоп 6733 БМ удовлетворяет требованиям нормативных документов (точка 1), дефектоскопы

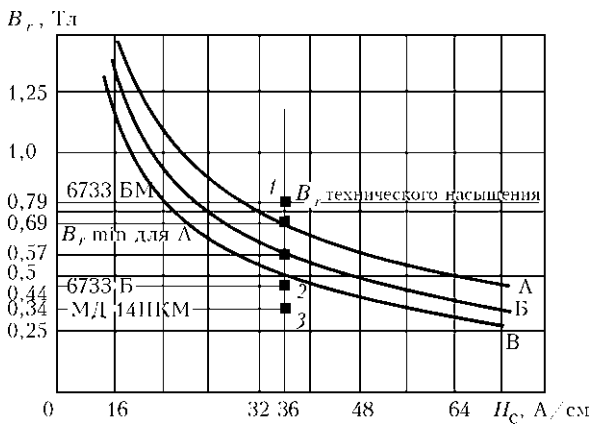


Рис. 2. Режимы намагничивания по ГОСТ 21105–87 способом остаточной напряженности (А,В,В — уровни чувствительности)

6733 Б, МД 14ПКМ не удовлетворяют требованиям нормативных документов (точки 2, 3).

Из анализа кривых намагничивания следует:

1. Для достижения уровня чувствительности А необходимо намагничивающее поле с  $H = (120...180)$  А/см, при этом остаточная индукция составит  $B_r = (0,69...0,79)$  Тл.
2. Достижение уровня Б–Н = (79...120) А/см при  $B_r = (0,57...0,69)$  Тл.
3. Достижение уровня В–Н = (66...79) А/см при  $B_r = (0,5...0,57)$  Тл.
4. Рассматриваемые дефектоскопы, очевидно, не обеспечивают ни один из уровней чувствительности, определенных ГОСТ 21105–87, ДСТУ ISO 9934-3–2005: 6733 Б–Н = 60 А/см,  $B_r = 0,44$  Тл; МД 14ПКМ —  $H = 53$  А/см,  $B_r = 0,34$  Тл.

5. Модернизированный дефектоскоп 6733 БМ соответствует ГОСТ 21005–87, ДСТУ ISO 9934-3–2005 —  $H = (200...220)$  А/см,  $B_r = 0,79$  Тл.

6. Дефектоскопы 6733Б и МД 14ПКМ теоретически могут выявить микротрещины шириной раскрытия 20...30 мкм, которые хорошо различимы в десятикратную лупу и без использования технических средств.

Установка 6733Б конструктивно не предназначена для контроля в режиме СПП. МД 14ПКМ по данным технического описания и инструкции по

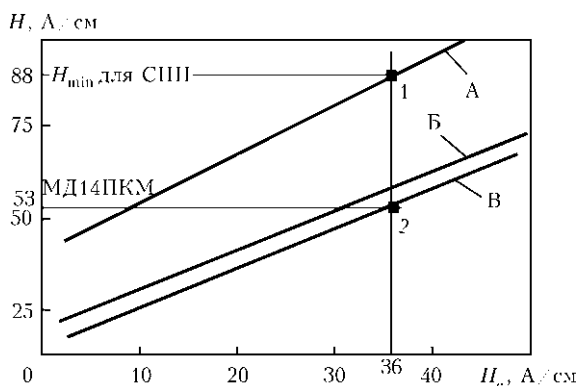


Рис. 3. Режимы намагничивания до ГОСТ 21105–87 способом СПП: (А, Б, В — уровни чувствительности)

эксплуатации, работает в режиме СОН. Однако по своей конструкции, усложнив работу оператора (поскольку намагничивание, полив суспензией, поворот колесной пары и контроль проводится одновременно) в нарушение ЦБ-0052 режим СПП может обеспечить. На рис. 3 показан расчет режимов намагничивания установки МД 14ПКМ в режиме СПП. Очевидно, даже в режиме СПП, теоретически, он не удовлетворяет требованиям ГОСТ 21105–87 и ДСТУ ISO 9934-1–2005 (точка 2).

На отдельных предприятиях Укрзалізниця с целью сопоставления теоретических исследований с практикой были проведены измерения напряженности магнитного поля при контроле внутренних колец подшипников, напрессованных на ось колесной пары на установках 6733Б, МД 14ПКМ. Результаты измерений, в серии испытаний, показали создаваемую установками напряженность от 30 до 50 А/см, что также не соответствует нормативным документам.

Измерения напряженности поля проводили по методике электротехнической лаборатории предприятия, согласованной и одобренной Украинским НИИ неразрушающего контроля и Межотраслевым учебно-аттестационным центром ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Суть методики измерения следующая: чувствительный элемент миллисеслометра МТУ-1 устанавливается на наружную поверхность внутренних колец подшипников, напрессованных на ось колесной пары, перпендикулярно силовым линиям поля. Подвод сети питания посредством контактных головок, измерения проводили при действии поля. Установка чувствительного элемента по указанной методике показана на рис. 4.

Существует еще одна методика измерения напряженности поля на кольцах подшипников буксового узла, разработанная СКБ «Неркон». Вероятно, эту методику используют все остальные предприятия Укрзалізниця, иначе ситуацию с НК буксового узла невозможно объяснить.

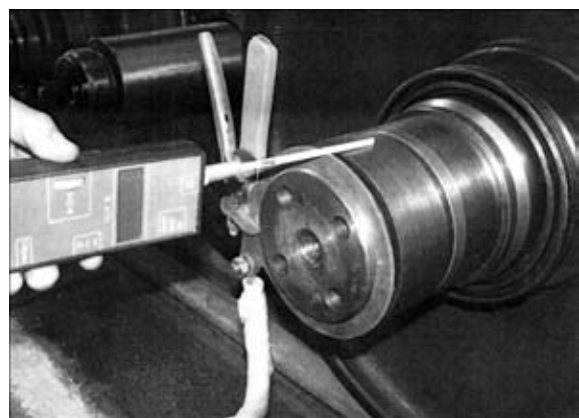


Рис. 4. Положение чувствительного элемента при измерении напряженности по методике предприятия ОДО «Попаснянский вагоноремонтный завод»

Суть методики измерения поля, разработанной СКБ «Неркон», следующая: на наружной поверхности кольца подшипника делается пропилен по размерам чувствительного элемента миллитеслометра, кольцо запрессовывается на ось колесной пары, в паз вставляется чувствительный элемент и при действии поля проводится измерение. Внешний вид чувствительного элемента на кольце (реально кольцо напрессовано на ось) показан на рис. 5.

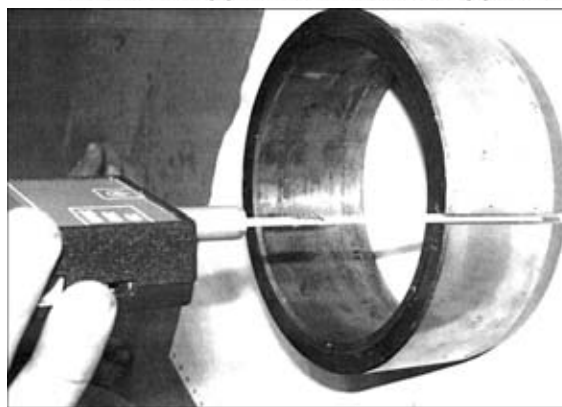


Рис. 5. Положение чувствительного элемента при измерении напряженности по методике ГСКБ «Неркон»

Это недопустимо по следующим причинам: изменение геометрии контролируемой детали приводит к искажению магнитного поля в месте внесения изменений, поэтому такие результаты измерений нельзя признать объективными и распространять на другие зоны детали (в данном случае — на всю поверхность кольца); в месте распила образуются полюса, поле которых, как показали измерения, на порядок больше реального поля на поверхности кольца; напряженность магнитного поля является одним из основных параметров, определяющих чувствительность магнитопорошкового контроля и обязательно должна указываться в протоколе (заключении) по результатам контроля каждой детали. В этом случае при измерении напряженности поля по методике ГСКБ следует делать пазы на каждом кольце, что несовместимо с возможностью его дальнейшей эксплуатации, т. е. такая технология измерений неприменима с точки зрения обеспечения сохранности (целостности) детали и условий применения НК.

Результаты исследования электротехнической лаборатории предприятия подтвердили научные организации, к которым она обращалась. Так, например, Межотраслевой учебно-аттестационный центр Института им. Е. О. Патона НАНУ отмечает, что для достижения высокого уровня чувствительности  $A$  ток намагничивания 25 кА установки (дефектоскопа) МД 14ПКМ недостаточен.

ОАО ВНИИЖТ (Россия) отметил, что при контроле СОН кольца подшипников должны быть намагничены до технического насыщения, т. е. на их поверхности должна обеспечиваться тангенсоидальная составляющая напряженности магнитного поля  $H_m = 180$  А/см (во время пропускания тока по оси колесной пары), при этом по оси колесной пары необходимо пропустить ток порядка 8,5 кА.

Каковы должны быть организационные и технические решения в данной ситуации, когда подавляющее большинство предприятий Укрзалізниця использует магнитопорошковый метод контроля деталей буксового узла и, в частности, колец подшипников? Заменить ли в массовом порядке установки, простые и дешевые, магнитопорошкового контроля на ультразвуковые, дорогие, сложные и возможно, не лучше старых? Так,

судя по работе [1], комплексы фирм «Робокон» и «Микроакустика» не позволяют провести контроль внутренних колец подшипников, напрессованных на ось колесной пары, что предусмотрено техпроцессом ремонта вагонов. По всей вероятности на этой операции выходного контроля работают установки старого поколения. Поэтому, на наш взгляд, ультразвуковое оборудование все-таки не позволяет комплексно решить проблему контроля всех деталей буксового узла в целом и их тиражирование, возможно, экономически не всегда выгодно. А время идет, предприятия проводят ремонт подвижного состава, имитируя контроль буксового узла, в результате безопасность движения снижается.

В условиях современной финансово-экономической ситуации в стране потребуется не менее 10 лет для замены старых установок на современные и не обязательно на ультразвуковые. Например, ВНИИ ЖД России взамен установки 6733Б выпускает установку магнитопорошкового контроля Р8617, обеспечивающую напряженность поля не менее 180 А/см, с минимальным раскрытием дефекта до 2 мкм.

На наш взгляд, более рационально пойти по пути модернизации существующих установок. Так, предприятие, располагая двумя установками 6733Б, несколько месяцев тому назад провело модернизацию одной из них. Внешний вид модернизированного блока управления показан на рис. 6–8.

Целью модернизации являлось повышение технических параметров циркулярного намагничивания до современных норм, определенных ведомственными документами, национальными и европейскими стандартами. Обновлению подвергся блок управления, в котором доведена до нормы мощность намагничивающего импульса и введены элементы автоматики технологического процесса и его контроля.

Испытания установки показали положительный результат. Измеренная напряженность магнитного поля на поверхности колец подшипников

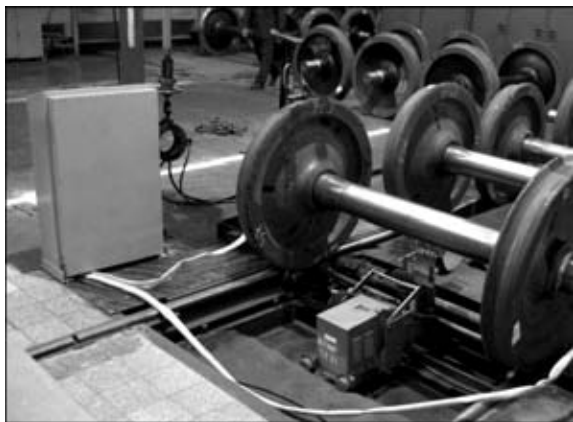


Рис. 6. Общий вид модернизированной установки (проект 6733БМ)

составила в серии испытаний 200...220 А/см. Сметная стоимость работ составила 6800 грн, из них 2500 — зарплата и 2300 — накладные расходы. Дефектоскоп исправен и соответствует нормативной документации.

Установка МД 14ПКМ использует, на наш взгляд, для намагничивания столь крупногабаритных узлов как колесная пара с напрессованными кольцами подшипников тупиковый метод — намагничивание действующим током, а это большие габариты и мощность источника питания (24 кВА) при существующих недостаточных параметрах, а также высокая стоимость. Для достижения требуемой напряженности 180 А/см мощность его трансформатора составила бы около 100 кВА, а это технически неприемлемо.

Модернизация МД 14ПКМ заключалась бы в изменении принципа его работы, перехода от намагничивания действующим током к намагничиванию накопительным методом конденсаторной батареи. Технически это свелось бы к замене



Рис. 7. Общий вид модернизированного блока управления



Рис. 8. Лицевая панель блока управления

штатного блока управления на блок, используемый в модернизированной установке 6733БМ.

Существующая в Украине классификация средств НК в плане метрологического обеспечения, непосредственно влияющих на безопасность движения, не поддается, по нашему мнению, логическому обоснованию.

Так, ультразвуковые системы УД2-70 и вихре-токовые ВД-30НС включены в Государственный реестр средств измерительной техники и подлежат периодической государственной поверке. Логично, метрологическое обеспечение контроля деталей, особо влияющих на безопасность движения, существует, система государственного контроля качества работает.

Магнитопорошковые системы НК, выполняющие те же функции (выявить микротрещину), на тех же деталях буксового узла метрологическому обеспечению, по непонятным причинам, не подлежат. На наш взгляд, это игнорирование Государственной системы качества.

По всей вероятности, системы магнитопорошкового контроля должны быть однозначно отнесены к испытательному оборудованию и включены в ведомственный реестр, со всеми вытекающими последствиями. В этом случае все становится на свои места, метрологическое обеспечение их автоматически восстанавливается.

Действующим нормативным документом в Украине (другой информацией не располагаем) по аттестации испытательного оборудования является ГОСТ 24555-81 «Порядок аттестации испытательного оборудования. Основные положения», который, на наш взгляд, однозначно определяет необходимость метрологического обеспечения таких установок, а именно первичную (заводскую), внеочередные (в случае необходимости) и периодические аттестации на предприятиях, эксплуатирующих установки.

В ведомственном нормативном документе НД 32УЗ-ЦТЕХ-0043-2004 «Настанова про порядок проведення атестації випробувального обладнання та перелік випробувального обладнання, яке



використовується на залізничному транспорті України» в розділі 10 вказаний перелік іспитального обладнання, яке використовується на залізничному транспорті України, в розділі «Локомотивне господарство» № 123 включений стенд (установка) магнітопорошкового контролю роликів і знятих колес підшипників буксового вузла Р2667-000-00, а аналогічні установки магнітопорошкового контролю, такі як МД 14ПКМ, 6733Б, не включені. Крім того, існують певні супереччя в п.п. 4.5–4.10. Таким чином, НД 32УЗ-ЦТЕХ-0043–2004 не дає однозначної відповіді на питання про необхідність атестації установок магнітопорошкового контролю.

Далі, в ЦВ-0052 встановлюється періодична (раз в 6 місяців) не атестація, а перевірка технічного стану вказаного обладнання. А якщо не потрібно метрологічна атестація установок, то не потрібні і атестовані стандартні зразки з нормованим дефектом в 2 мкм. В кінцевому рахунку відсутній контроль ісправності установок в реальних умовах взаємодії з нормованими дефектними об'єктами.

На наш погляд, необхідно привести перераховані ведомствених документи в відповідність з первинним нормативним документом — ГОСТ 24555–81.

Виходячи з створеного положення з контролем буксового вузла, можна передбачити, що на кінець 2007 — початок 2008 рр., а можливо ситуація після перших сигналів не змінилася, в Україні не існує в наявності стандартних зразків колес підшипників буксового вузла з дефектом в 2 мкм не тільки на ремонтних підприємствах, де ЦВ-0052 допускає їх відсутність, але і на підприємствах-виробниках засобів контролю, де вони повинні бути в обов'язковому порядку [3, 4].

Стандартні зразки колес підшипників коштують недорого, але вони не обов'язкові на кожному підприємстві, достатньо їх наявність в метрологічних центрах кожної залізничної дороги, оскільки періодичність атестації складає рік і більше.

ОАО «РЖД» цю проблему вирішило в відповідності з ГОСТ 24555–81. Перевірка виявляемості дефектів (умовної чутливості контролю) здійснюється з допомогою атестованих стандартних зразків (колес підшип-

ників) з поверхневими штучними дефектами в 2 мкм, внесених в відомий реєстр засобів вимірювання.

## Висновки

1. Порушення системи якості, заданої первинними нормативними документами, в даному випадку ГОСТ 21105–87, ГОСТ 24555–81, ДСТУ ISO 9934-1,2,3–2005, неминусово призводить в кращому випадку до непередбаченої фальсифікації НК і є початковим моментом для спрацьовування механізму залізнично-транспортного происшествя. Виникла серйозна необхідність привести ведомствених документи ЦВ-0052, НД 32УЗ-ЦТЕХ-0043–2004 в відповідність з вказаними вище первинними нормативними документами.

2. Є сенс систематизувати інформацію в галузі по типам і характеристикам магнітопорошkových засобів НК деталей буксового вузла, провести внеочередную їх атестацію і, ймовірно, прийняти рішення про їх модернізацію.

3. Для внеочередной і періодичної атестації засобів контролю в галузі необхідно мати стандартні зразки деталей буксового вузла хоча б по кількості метрологічних центрів залізничних доріг і Головних управлінь, проводячих ремонт всіх видів подвижного складу.

4. Розглянуті магнітопорошковые установки контролю деталей буксового вузла забезпечують чутливість до 20 мкм, при нормативній до 2 мкм, тому не можуть бути визнані годними по призначенню.

5. Для підвищення чутливості на порядок і переведення вказаної техніки в категорію годної по призначенню найбільш ефективною її модернізація, що і було зроблено в ОДО «Попаснянський вагоноремонтний завод» з мінімальними витратами.

1. *Кривобок В. І.* Передовий досвід ремонту колесних пар і буксових вузлів на вагоноремонтних підприємствах Юго-Западної залізничної дороги // Вагонний парк. — 2008. — № 4. — С. 19–22.
2. *Троїцький В. А.* Магнітопорошковий контроль зварних з'єдинень і деталей машин. — Київ: Фенікс, 2002. — 299 с.
3. *ГОСТ 21105–87.* Контроль невідрушувачий. Магнітопорошковий метод.
4. *ГОСТ 24555–81.* Порядок атестації іспитального обладнання. Основні положення.

ОДО «Попаснянський вагоноремонтний завод»

Поступила в редакцію  
10.11.2008



## ОБУЧЕНИЕ И АТТЕСТАЦИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ

Качество — основное требование, которое наиболее часто покупатели предъявляют к продукции, будь-то товар или услуги. Качественный товар, несмотря на более высокую стоимость, всегда намного быстрее находит своего покупателя нежели обычный.

В последнее время с ростом промышленного производства в Украине одновременно растут и требования к качеству выпускаемой продукции. А чем же собственно наиболее часто проверяется качество промышленной продукции? Конечно же, неразрушающими методами контроля. Неразрушающие методы контроля качества промышленной продукции могут применяться как на стадии изготовления, так и в процессе эксплуатации выпускаемой продукции. Поэтому особенно актуальным становится вопрос о высокой квалификации тех специалистов, которые контролируют качество промышленной продукции неразрушающими методами контроля.

При ООО «Совместное украинско-германское предприятие «ТЮФ НОРД-ДИЭКС», г. Днепрпетровск, в мае этого года открыты учебный и аттестационный центры по неразрушающему контролю (УЦНК и АЦНК), которые работают в системе сертификации персонала, выполняющего неразрушающий контроль объектов повышенной опасности, поднадзорных Госгорпромнадзору Украины.

Учебный и аттестационный центры по НК ООО СП «ТЮФ НОРД-ДИЭКС» аккредитованы Органом по сертификации персонала в области неразрушающего контроля объектов, поднадзорных Госгорпромнадзору Украины, ГП УЦПС «Промбезопасность» и имеют все необходимые разрешительные документы на право проведения обучения и аттестации специалистов по следующим методам неразрушающего контроля:

Метод НК	Производственные секторы согласно НПАОП 0.00-6.14-97	
	Группа I	Группа II
Ультразвуковой (УТ)	1, 2, 3, 4, 5	6, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15
Визуально-оптический (ВТ)	1, 2, 3, 4, 5	6, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15
Магнитопорошковый (МТ)	1, 2, 3, 4, 5	6, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15
Капиллярный (РТ)	1, 2, 3, 4, 5	6, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15

УЦНК и АЦНК укомплектованы самыми современными приборами и оборудованием по неразрушающему контролю ведущих отечественных и иностранных производителей; обладают всей необходимой нормативной и методической документацией по НК, а также учебными и экзаменационными образцами, которые представляют собой реальные фрагменты, детали или узлы механизмов объектов повышенной опасности, что позволяет специалистам получать определенный опыт проведения практического неразрушающего контроля уже непосредственно в процессе обучения и аттестации.

Преподаватели и экзаменаторы Центров — это ведущие высококвалифицированные специалисты по НК, которые имеют сертификаты специалистов по НК II и III уровней квалификации в соответствии с НПАОП 0.00-6.14-97, а также большой опыт преподавательской и практической деятельности в области неразрушающего контроля и технической диагностики объектов повышенной опасности.

Если Вы заинтересованы в высокой квалификации Ваших специалистов по неразрушающему контролю, хотите быть уверены в надлежащем качестве вашей продукции, а значит ее конкурентоспособности, мы ждем Ваших заявок!

А. Ю. Нестеренко

**Наш адрес:** г. Днепрпетровск, пер. Джинчарадзе, 8, ООО СП «ТЮФ НОРД-ДИЭКС», 49040

**Тел./факс:**  
(0562) 36-87-03, (0562) 36-87-04;

**Наш сайт:**  
<http://www.tuev-dieks.com>;

**E-mail:**  
[tnd@tuev-dieks.com](mailto:tnd@tuev-dieks.com).



## УКРАЇНСЬКОМУ ТОВАРИСТВУ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ — 20 РОКІВ

16 листопада 1990 р. на Установчій конференції було створено Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики – творчу громадську організацію, яка об'єднує на добровільних засадах науковців, інженерів, викладачів та робітників-новаторів різних установ та підприємств, професійна діяльність яких пов'язана з неруйнівним контролем та технічною діагностикою. Товариство створене з ініціативи ряду спеціалістів Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАНУ, Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут» за підтримки президента Національної академії наук України академіка Б.Є.Патона та президента Спільки наукових та інженерних об'єднань України академіка В.І. Трефілова. Конференція прийняла Статут Товариства, обрала правління та голову. Товариство зареєстроване в Міністерстві юстиції України як всеукраїнське об'єднання.

Сьогодні колективними членами УТ НКТД є біля 200 організацій, діяльність яких пов'язана з неруйнівним контролем та технічною діагностикою. Серед них ДКБ «Південне» ім. М.К. Янгеля, ВАТ «Запоріжсталь», ВАТ «Дніпроспецсталь ім. А.М. Кузьміна», Запорізький титано-магнієвий комбінат, Нижньодніпровський трубопрокатний завод, Одеський припортовий завод, Чернівецький машинобудівний завод, АТ «Мотор-Січ», Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання ім. М.В. Фрунзе, ВАТ «Севєродонецьке об'єднання «Азот», Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАНУ, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, ВАТ «Новомосковський трубний завод», ВАТ «Металургійний комбінат «Азовсталь» та багато інших. Головною метою Товариства є консолідація зусиль науково-технічних працівників та новаторів виробництва для розвитку

їх творчої та ділової активності, реалізації свободи творчості та обміну інформацією, розширення співробітництва та міжнародних контактів, комплексного вирішення проблем підвищення якості та надійності промислових виробів і споруд, захисту творчих та інших спільних інтересів.

На останній звітній конференції в 2009 р. обговорено роботу Товариства та обрано новий склад Правління. Головою Товариства переобрано проф. Троїцького В.О., зав. відділом ІЕЗ ім. Є.О. Патона; заступниками – проф. Карпаша О.М., проректора Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу; Мозгового О.В., директора Придніпровського АЦНК та канд. техн. наук Казакевича Л.М., директора НВФ «ІФХ-Колор». Ученим секретарем Товариства обрано Шекеро А.Л., провідного інженера ІЕЗ ім. Є.О. Патона.

Регіональні відділення Товариства працюють в Києві, Харкові, Дніпропетровську, Запоріжжі, Львові, Івано-Франківську та в Автономній Республіці Крим.

Активістами Товариства проведені організаційні роботи по створенню Технічного комітету із стандартизації «Технічна діагностика і неруйнівний контроль» – ТК-78. Комітет створено спільним наказом Національної академії наук України, Державного комітету по стандартизації, метрології і сертифікації та Державного комітету України по нагляду за охороною праці (№ 60/106/48 від 31 травня 1993 р.). Головою ТК-78 призначено академіка Б.Є. Патона.

Надзвичайно важливе значення для України має організація системи сертифікації персоналу, зайнятого в неруйнівному контролі за процедурами, гармонізованими з європейськими та міжнародними стандартами. Цьому питанню УТ НКТД приділяє першочергову увагу. На сьогодні створена база для повного переходу до сертифікації персоналу з НК



Фотоархів УТ НКТД. Установча конференція УТ НКТД 16 листопада 1990 р.



Науково-технічна конференція в Криму (2008 р.)

згідно з міжнародними нормами. УТ НКТД та ТК-78 провели роботу з гармонізації стандарту EN 473-2000 «Кваліфікація і сертифікація персоналу в галузі НК. Основні принципи» і сприяли його введенню в дію в Україні (ДСТУ EN 473-2001).

В 1994 р. з ініціативи УТ НКТД спільним наказом № 172/64/106/221 від 7 липня 1994 р. Міністерства освіти України, Національної академії наук України, Державного комітету України по нагляду за охороною праці і Державного комітету України по нагляду в атомній промисловості був створений Національний атестаційний комітет України з неруйнівного контролю (НАКУНК). Головним завданням НАКУНК була організація системи сертифікації персоналу в країні, яка відповідала б міжнародним стандартам. Зусиллями активістів УТ НКТД були розроблені нормативні документи з сертифікації персоналу в нафтогазовій промисловості, на трубних заводах, для об'єктів підвищеної небезпеки. Сьогодні в Україні працюють п'ять органів сертифікації персоналу, атестаційні і учбові центри в Києві, Харкові, Дніпропетровську, Запоріжжі, Івано-Франківську, Одесі. Роботи з розвитку системи сертифікації в галузі неруйнівного контролю продовжуються.

З 2006 р. органи сертифікації персоналу проходять акредитацію в Національному агентстві України з акредитації. Центр сертифікації при УТ НКТД пройшов процедуру акредитації в 2007 р. і отримав Атестат акредитації як орган з сертифікації персоналу в галузі неруйнівного контролю.

Товариство сприяє виданню фахового науково-технічного журналу «Технічна діагностика і неруйнівний контроль», готуючи до публікації статті, повідомлення, інформацію та ін. З 1998 р. УТ НКТД самостійно видає інформаційний бюлетень «НК-Інформ».

Одним з головних напрямків роботи УТ НКТД є організація і проведення конференцій, семінарів та виставок. Вже стали традиційними зимова кон-

ференція в с. Славське, Львівської обл. (основний організатор – Центр «Леотест-Медіум»), осіння конференція в Ялті (основний організатор – Український інформаційний центр «НАУКА. ТЕХНІКА. ТЕХНОЛОГІЯ»), виставки та конференції, що організуються Асоціацією «ОКО», НВФ «Ультракон», НВФ «Діагностичні прилади», НВП «Машинобудування», Івано-Франківським національним технічним університетом нафти і газу, семінари за участі представників провідних західноєвропейських фірм. Значними подіями в галузі НК стали Національні українські науково-технічні конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика», організатором яких є УТ НКТД. Такі конференції відбулись в 1994, 1997, 2000, 2003, 2006 та 2009 рр.

Значну увагу правління УТ НКТД приділяє контактам та співробітництву з товариствами інших країн. В 1995 р. УТ НКТД прийнято до складу Європейського комітету з неруйнівного контролю. В 1998 р. УТ НКТД став співзасновником Європейської федерації з неруйнівного контролю (EFNNDT), до якої входять товариства з неруйнівного контролю 27 країн Європи. УТ НКТД є членом Міжнародного комітету з неруйнівного контролю (ICNNDT). Укладено ряд угод про співробітництво з товариствами Росії, Білорусі, Молдови, Польщі, Чехії, Болгарії, Хорватії, Німеччини, Великобританії, Італії, Данії, США та ін. На запрошення УТ НКТД Україну відвідав Президент Міжнародного комітету з неруйнівного контролю Джузеппе Нардоні.

Делегації УТ НКТД приймають участь в європейських і всесвітніх конференціях з НК. Великі групи спеціалістів відвідали конференції та виставки в Копенгагені (7<sup>th</sup> EFNNDT-1998), Римі (15<sup>th</sup> WCNDT-2000), Барселоні (8<sup>th</sup> EFNNDT-2002), Монреалі (16<sup>th</sup> WCNDT-2004), Берліні (9<sup>th</sup> EFNNDT-2006), Шанхаї (17<sup>th</sup> WCNDT-2008), Москві (10<sup>th</sup> EFNNDT-2010).

В секретаріаті УТ НКТД, що працює в ІЕЗ ім. С.О. Патона НАНУ – корпус 6 (вул. Боженка, 17, тел.: +38044 287-26-66, +38044 271-22-49, e-mail: usndt@ukr.net; www.usndt.com.ua), Ви можете ознайомитись з новинами в галузі неруйнівного контролю та технічної діагностики, програмами конференцій, семінарів та виставок, періодичними виданнями, книгами тощо. Ви також зможете одержати консультації з питань неруйнівного контролю та технічної діагностики, обговорити шляхи вирішення конкретних питань практичного технічного контролю, вступити до Товариства.

*Троїцький В.О., Посипайко Ю.М., Шекеро А.Л.  
ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України*



## 18-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ»

С 4 по 8 октября 2010 г. в Ялте состоялась 18-я Международная конференция и выставка «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики», организованная Украинским информационным центром «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ» (Киев) и НПП «Машиностроение» (Днепропетровск) при поддержке обществ неразрушающего контроля и технической диагностики Украины, РФ и Республики Беларусь.

**Генеральный спонсор конференции – МЧТПП «Онико» (Киев), спонсоры – НПП «Машиностроение», НПП «Интрон-СЕТ».**

В работе конференции приняли участие более 200 специалистов из Украины, России, Республики Беларусь, Великобритании, Германии, Болгарии, Чехии, Латвии, Литвы, Узбекистана, Молдовы.

Открыл конференцию заместитель директора ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ академик НАН Украины **Л.М. Лобанов**. В своем докладе «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации конструкций» он рассказал об исследованиях в области НКТД, выполненных в последние годы в рамках целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин». Целью программы являлась разработка методологических основ прогнозирования остаточного ресурса конструкций, создания методов, технических средств и технологий для оценки технического состояния и продления срока эксплуатации техногенно и экологически опасных объектов.

Руководитель отдела ИЭС, председатель УО НКТД проф. В.А. Троицкий выступил с докладами «Перспективные научные направления развития технологий неразрушающего контроля» и «Українському товариству неруйнівного контролю та технічної діагностики – 20 років».

Известный специалист в области магнитных методов контроля проф. Ю.К. Федосенко, заведующий отделом НИИИК МНПО «Спектр» (Москва) рассказал о современных тенденциях развития НКТД по итогам 10-й Европейской конференции по неразрушающему контролю.

Председатель Болгарского общества неразрушающего контроля проф. М. Миховский поделился со слушателями научными новостями из жизни ученых и специалистов Болгарии.

Научный сотрудник британского института сварки (TWI) докт. Peter Mudge выступил с докладом «Разработка технологии для выявления критически опасных трещин и коррозионного пора-

жения корпусов судов в рамках выполнения Европейского научного проекта «Ship-Inspector», а руководитель департамента компании «General Electric sending&inspection technologies» рассказал о новых разработках и серийном оборудовании этой ведущей в мире фирмы, специализирующейся в области неразрушающего контроля и объединившей компании Krautkramer, Nukem, Seifert, Agfa NDT и др.

Всего на конференции было представлено 10 пленарных и 108 секционных докладов.

На конференции работало 6 секций: *ультразвуковой контроль ответственных объектов с использованием современных технологий ультразвукового контроля TOFD, LRUT, UTRA* (руководители: проф. В.А. Троицкий, Митко Миховски, Peter Mudge, Phil Catton); *современные методы и средства НК в промышленности* (руководители: И.П. Белокур, О.Н. Будадин); *сертификация специалистов НК в соответствии с требованиями международных и национальных стандартов* (руководители: Л.Г. Лукьянова, Н.Г. Белый (Украина), А. Алексиев (Болгария), Н.Г. Медведевских (Беларусь), А.В. Муллин (Россия); *диагностика состояния промышленных объектов* (руководители: П.П. Телишко, С.И. Буйло, Ю.Б. Еськов, Ю.К. Бондаренко); *неразрушающий контроль и техническая диагностика оборудования АЭС, находящихся в эксплуатации* (руководители: Л.С. Ожигов, Е.М. Афанасьев); *диагностика и ремонт металлургического оборудования* (руководители: М.А. Демин, Н.Н. Изюмский, А.В. Мозговой (Украина), А.А. Третьак (Россия).

Доклады конференции опубликованы в сборнике (электронный вариант), ознакомиться с которым можно в секретариате УО НКТД и в УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ».

По единодушному мнению участников — конференция прошла успешно. Оргкомитет сделал всё возможное для того, чтобы её участники могли плодотворно работать, обмениваться информацией, мнениями, узнать новое.

Участники конференции могли общаться не только на заседаниях, но и после них, поскольку все проживали в гостинице «Дружба».

*Оргкомитет приглашает принять участие в 19-й Международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики», которая состоится в Ялте в начале октября 2011 г.*

Посыпайко Ю.Н.,  
ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины



Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины  
НИИ лазерной техники и технологии  
НТУУ «Киевский политехнический институт»  
Международная ассоциация «Сварка»  
Местный благотворительный фонд «Содружество сварщиков»

## Пятая международная конференция **ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ**

24-27 мая 2011 г.  
Украина, Крым, пос. Кацивели

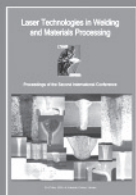
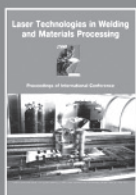
**Председатели программного комитета**  
академик Б.Е. Патон  
проф. В.С. Коваленко

### Тематика конференции

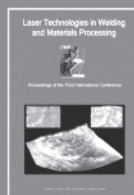
*Лазерная  
сварка, резка,  
наплавка, термообработка,  
нанесение покрытий,  
прототипирование.*

*Лазеры в медицине и биологии.  
Гибридные технологии и  
технологии, базирующиеся  
на других высококонцентрированных  
источниках энергии.*

### ОБОРУДОВАНИЕ ♦ ТЕХНОЛОГИИ ♦ МОДЕЛИРОВАНИЕ

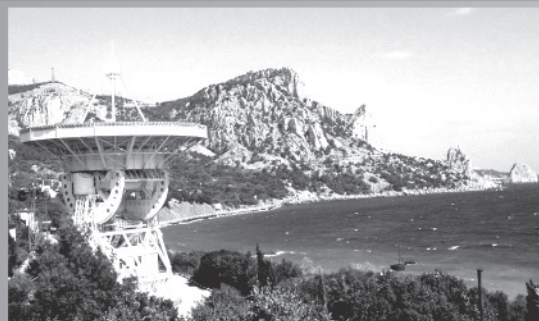
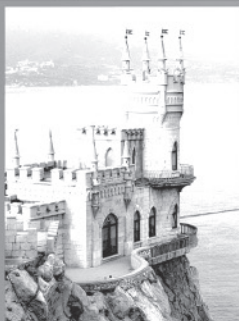


Труды конференций  
2003, 2005, 2007, 2009 гг.



### Основные даты

Окончание приема тезисов — 21 марта 2011 г. Подтверждение участия — 11 апреля 2011 г.  
Рабочий язык конференции английский (будет обеспечен синхронный перевод с русского на английский)



### АДРЕС ОРГКОМИТЕТА:

Украина, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11  
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины  
Тел.: (38044) 529-26-23; факс: (38044) 529-26-23, 287-46-77  
E-mail: journal@paton.kiev.ua, kovalenko.volodymyr@gmail.com; http://www.paton.kiev.ua



## Поздравляем юбиляра!

Коллектив Института электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, правление Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики, редколлегия журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» сердечно поздравляют с восьмидесятилетием **Виктора Александровича Цечалы!**

Вся трудовая деятельность В.А. Цечалы после окончания в 1953 г. физического факультета Киевского государственного университета им. Тараса Шевченко неразрывно связана с неразрушающим контролем и технической диагностикой сварных соединений и металлоконструкций.

В Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, где он проработал более 20 лет, под его руководством и при непосредственном участии была создана лаборатория неразрушающего контроля. На основании выполненных им и коллективом лаборатории исследований были разработаны новые технологии и аппаратура для ультразвукового и радиационного контроля различных объектов: сосудов, работающих под давлением, труб большого диаметра, топливных баков, ракет и др.; теоретически был обоснован сегментный отражатель как модель дефекта для эталонирования чувствительности УЗ контроля и многое другое.

За долгие годы профессиональной деятельности В.А.Цечалем, человеком творческого полета и доброй души, было внедрено в жизнь много перспективных планов и решено много важных вопросов. Он – один из тех специалистов, чей вклад в общее дело развития неразрушающего контроля и технической диагностики всегда остается необычайно высоким.

В.А. Цечаль является автором более 120 научных и методических работ — это монографии, статьи, изобретения, ГОСТы, ОСТы, пособия, РД, РТМ и др.

Более 20 лет в системе монтажных и специальных строительных работ Виктор Александрович занимается разработкой и внедрением методик неразрушающего контроля сварных соединений различных конструкций и нормативных документов, ведет большую работу по подготовке кадров, возглавляет Аттестационный центр ТК «Спецмонтаж».

В.А. Цечаль является специалистом третьего уровня квалификации по ультразвуковому, радиационному, магнитному и капиллярному методам неразрушающего контроля.

В повседневной жизни Виктор Александрович – исключительно деятельный, талантливый и приятный в общении человек. Он является обладателем редкого поэтического дара, который многие годы приносит радость своим друзьям и коллегам, заслуженно пользуется уважением и любовью всех, с кем ему приходится работать и общаться.

Уважаемый Виктор Александрович!

Говорят, что 80 лет – это возраст, когда человек овладевает тем, на чем основаны истинные достижения, познает то, чему не смог научиться, и начинает видеть то, о чем даже не догадывался. Это тот возраст, когда умный человек становится мудрым.

*Мы искренне желаем Вам крепкого здоровья, долгих лет жизни, деловой и творческой активности, радости и семейного благополучия!*

## Уважаемые авторы!

Редакция обращается к Вам с просьбой при подготовке статей учитывать требования постановления Президиума Высшей аттестационной комиссии (ВАК) Украины от 15.01.2003 г. № 7-05/1 «О повышении требований к специальным изданиям, внесенным в перечень ВАК Украины», в соответствии с которым статья должна содержать такие необходимые элементы, как:

- ✧ постановка проблемы в обобщенном виде и ее связь с важными научными или практическими задачами;
- ✧ анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опираются авторы, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена данная статья;
- ✧ формулировка целей статьи (постановка задания);
- ✧ изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов;
- ✧ выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

## ПОДПИСКА — 2010 на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Стоимость подписки через редакцию*	Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
		160 грн.	320 грн.	700 руб.	1400 руб.	26 дол. США

\*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Если Вас заинтересовало наше предложение по оформлению подписки непосредственно через редакцию, заполните, пожалуйста, купон и отправьте заявку по факсу или электронной почте.

**Контактные телефоны: (38044) 271-26-23; 529-26-23; факс: (38044) 528-34-84, 529-26-23.**

Подписку на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» можно также оформить по каталогам подписных агентств «Пресса», «Идея», «Саммит», «Прессцентр», KSS, «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).

### ПОДПИСНОЙ КУПОН

Адрес для доставки журнала \_\_\_\_\_

Срок подписки с \_\_\_\_\_ 201 г. по \_\_\_\_\_ 201 г. включительно

Ф. И. О. \_\_\_\_\_

Компания \_\_\_\_\_

Должность \_\_\_\_\_

Тел., факс, E-mail \_\_\_\_\_



## РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

#### Обложка наружная, полноцветная

- Первая страница обложки (190×190мм) — 700\$
- Вторая страница обложки (200×290мм) — 550\$
- Третья страница обложки (200×290мм) — 500\$
- Четвертая страница обложки (200×290мм) — 600\$
- Обложка внутренняя, полноцветная**
- Первая страница обложки (200×290мм) — 400\$
- Вторая страница обложки (200×290мм) — 400\$
- Третья страница обложки (200×290мм) — 400\$
- Четвертая страница обложки (200×290мм) — 400\$

#### Внутренняя вставка

- Полноцветная (разворот А3) (400×290мм) — 570\$
- Полноцветная (200×290мм) — 340\$
- Полноцветная (200×142мм) — 170\$
- Реклама в разделе информации**
- Полноцветная (165×245мм) — 300\$
- Полноцветная (165×120мм) — 170\$
- Полноцветная (82×120мм) — 80\$
- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
- Статья на правах рекламы — 50% стоимости рекламной площади
- При заключении рекламных контрактов на сумму, превышающую 1000\$, предусмотрена гибкая система скидок

#### Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290мм
- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5мм с целью избежания потери части информации
- Все файлы в формате IBM PC**
- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi
- К файлам должна прилагаться распечатка (макеты в формате Word не принимаются)

Подписано к печати 1.11.2010. Формат 60584/8. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,6. Уч.-изд. л. 9,2+4 цв. вклейки.  
Цена договорная. Печать ООО «Фирма «Эссе».  
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.





# ОЦЕНКА РИСКА АВАРИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Опыт деятельности НИИ НБМК Тюменского государственного нефтегазового университета в области экспертизы промышленной безопасности

Тюменский государственный нефтегазовый университет (ТюмГНГУ) создан 50 лет назад.

В настоящее время штат сотрудников ТюмГНГУ насчитывает более 1500 квалифицированных специалистов, в том числе 229 докторов наук и 722 кандидатов технических наук.

Работы в области экспертизы промышленной безопасности выполняются в НИИ надежности и безопасности материалов и конструкций (НИИ НБМК) – структурным подразделением университета. Коллектив института имеет 25-тилетний опыт работы в области промышленной безопасности, испытания и контроля материалов и конструкций для предприятий машиностроения, авиационной, нефтяной и газовой промышленности. Деятельность в области экспертизы промышленной безопасности осуществляется в соответствии с лицензией Ростехнадзора.

## Основные направления деятельности НИИ НБМК

- Экспертиза промышленной безопасности проектной документации на расширение, техническое перевооружение, консервацию и ликвидацию:
  - разведочных и эксплуатационных скважин на нефть, газ, термальные воды;
  - буровых установок (в том числе для шельфа морей);
  - объектов добычи и комплексной подготовки нефти, газа, конденсата и воды;
  - подземных хранилищ газа;
  - промыслового и межпромыслового транспорта нефти и газа;
  - объектов поддержания пластового давления;
  - объектов застройки месторождений нефти и газа.
- Контроль оборудования и материалов неразрушающими методами контроля:
  - оборудования, работающего под давлением более 0,07 МПа;
  - технических устройств для нефтегазодобывающих производств;
  - приборов и средств автоматизации;
  - насосов жидкостных и вакуумных; агрегатов насосных;
  - компрессоров воздушных и газовых, частей к ним.
- Экспертиза зданий и сооружений на нефтяной и газовой промышленности:
  - магистральных трубопроводных систем;
  - насосных и компрессорных станций;
  - резервуарных парков.
- Экспертиза и разработка деклараций промышленной безопасности, ПЛАРНов, ПЛАСов, разделов «Анализ риска» для действующих и проектируемых объектов нефтяной и газовой промышленности.

Лаборатории НИИ НБМК ТюмГНГУ оснащены установками для испытания материалов и оборудованием для оптической и электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии, ядерного гамма-резонанса, лазерной интерферометрии, магнитного структурного анализа.

Наличие квалифицированных специалистов позволяет выполнять комплексную оценку риска на всех этапах жизненного цикла изделия. На этапе проектирования рассчитываются показатели риска аварий в соответствии с утвержденными Ростехнадзором и МЧС России методиками. При экспертизе проектной документации выявляются факторы, способные затормозить реализацию проекта или вызвать большие экономические потери при формальном соблюдении норм промышленной безопасности. Например, при экспертизе дорогостоящего проекта было установлено, что предусмотрено использование защищенной зарубежными патентами технологии без оформления необходимых лицензионных соглашений. В одном из технических решений для увеличения подачи нефти предложено уложить вторую нитку трубопровода и максимально увеличить давление на входе в трубопроводы. При этом отсутствует экономический анализ затрат на электроэнергию из-за потерь напора и использования для регулирования расхода клапанов-ограничителей вместо частотно-регулируемого привода. Комплексная оценка риска выполняется при разработке декларации промышленной безопасности и планов ликвидации и предупреждения аварийных разливов нефти и нефтепродуктов.

При диагностировании технических устройств, кроме использования общепринятых методов неразрушающего контроля (УЗК, ПК и др.) в качестве дополнительных используются разработ-



ки ученых ТюмГНГУ. Исследования низколегированных трубных сталей при малоцикловом нагружении позволили разработать методы обнаружения ранних стадий пластической деформации при помощи исследования параметров микроструктуры с использованием оптической и растровой электронной микроскопии, измерения коэрцитивной силы, магнитоупругой чувствительности, электрохимических свойств, твердости и внутренних напряжений. Установлено что пластическая деформация вызывает многократное увеличение скорости коррозии высокопрочных сталей типа Х60, Х70 и чрезвычайно слабо влияет на скорость коррозии стали 20. При необходимости проводятся исследования несущей способности грунтов, оценки состояния фундаментов и воздействие сейсмических факторов техногенного происхождения.

Для прогнозирования риска отказа объектов, работающих при переменных нагрузках, проводится анализ истории нагружения с использованием методов непараметрической статистики, позволяющих рассчитать вероятность разрушения элемента при произвольных законах распределения механических свойств и эксплуатационных воздействий. Для измерения напряжений и деформаций элементов конструкций, кроме тензометрии, используются магнитные методы и лазерная интерферометрия. Для записи пиковых нагрузок и давлений используются магнитные крешеры.

Усталостные испытания трубных сталей и насосных штанг на воздухе и в коррозионной среде послужили основой для расчета вероятности разрушения в

зависимости от условий и продолжительности эксплуатации.

Наиболее сложными и интересными являются работы по установлению причин разрушения сложных объектов. На рисунке представлен редкий снимок – первые секунды падения вышки буровой установки при ее испытаниях. Расследование причин аварии проводилось под руководством Тюменского округа Госгортехнадзора экспертами ТюмГНГУ и ЗАО «Уралмаш–Сервис». Выполнен анализ качества сварных швов, микроструктуры и механических свойств металла, характеристик электропривода, средств измерения нагрузки на крюке, надежность схем управления, защит и блокировок, анализ эксплуатационной документации, моделирование поведения вышки с дефектами при нагружении. В результате слаженной работы экспертов, специалистов завода-изготовителя и эксплуатирующей организации были установлены причины разрушения и разработаны компенсирующие мероприятия. Проведенные исследования позволили существенно поднять качество продукции завода-изготовителя, не вызывающей в настоящее время нареканий.

Сотрудниками университета разработано более 100 деклараций промышленной безопасности для ряда крупных компаний: «Сибнефтепровод», «Сургутгазпром», «Газпромнефть-Ноябрьскнефтегаз», «Ноябрьскгаздобыча» и др. проведено обследование более 400 объектов нефтегазового комплекса, отработавших нормативный ресурс эксплуатации;

проведено около 450 экспертиз промышленной безопасности проектной и технической документации по заказам «Сибнефтепровод», «Сибнефть-Ноябрьскнефтегаз», «РИТЭК», «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь», ОАО «Няганьгазпереработка» и др.;

оказаны консалтинговые услуги страховым компаниям «СОГАЗ», «СИБИРЬ», «ВЕСТА» и др.

По заказам компаний «Сургутнефтегаз», «ТАТнефть-бурение», «Славнефть-Мегионнефтегаз» и «Сибнефтепровод» выполнены работы по установлению причин разрушения опасных производственных объектов.

*В.В. Насонов,  
зам. директора НИИ НБМК ТюмГНГУ*

**НИИ НБМК ТюмГНГУ ♦ ТООО «АИО ТюмГНГУ»**  
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. В. Володарского 38,  
Тел: (3452) 463007; e-mail: nbmk@tsogu.ru