

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, В. Л. Венгринович,
Э. Ф. Гарф, А. А. Грузд,
Е. А. Давыдов, А. Т. Зельниченко,
М. Л. Казакевич, О. М. Карпаш,
В. В. Клюев, А. А. Лебедев,
Л. М. Лобанов, З. Т. Назарчук,
Н. В. Новиков, Ю. Н. Посыпайко,
Г. И. Прокопенко, В. А. Стороженко,
В. А. Стрижало, В. Н. Учанин,
С. К. Фомичев, Н. Г. Чаусов,
Е. В. Шаповалов, В. Е. Щербинин

Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150,
ул.Боженко, 11
Институт электросварки
им.Е.О.Патона НАН Украины
Тел.: (044) 205-23-90
Факс: (044) 200-54-84, 200-82-77
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

НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А., ОВСИЕНКО М. А. Влияние методов обработки акустико-эмиссионной информации на формирование АЭ событий и определение их координат 5
БЕРЕЗИН В. Б., ЧАУСОВ М. Г. Дослідження поля деформації плоскої поверхні зразків матеріалів методом кореляції цифрових зображень. (Статичне навантаження) 15
БЛИЗНЮК Е. Д., ЕРЕМЕНКО В. С., КУЦ Ю. В., БЫСТРАЯ И. Н., МОНЧЕНКО Е. В., ЦАПЕНКО В. К. Фазовый обнаружитель сигналов для ультразвукового неразрушающего контроля 21

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

БУДАДИН О. Н., КУТЮРИН Ю. Г., ФИЛИПЕНКО А. А., МУХАНОВ Е. Е. Стенд для автоматизированного ультразвукового неразрушающего контроля сложнопрофильных изделий из полимерных материалов 25
ШУЛЬЖЕНКО А. В., ПОГОРЕЛАЯ Л. М., МАНОРИК П. А., ГРЕБЕННИКОВ В. Н., СИДОРОВА Н. А. Способ изготовления наборов проникаемых элементов заданной пропускной способности для капиллярных контрольных течей 30
АБРАМОВА Е. В. Диагностические системы теплового контроля: комплексный подход 34
БУРАУ Н. И., КЛЕФА Ю. В., КУЛИШ Э. В. Разработка метода диагностики технического состояния противооползневых анкерных сооружений. Сообщение 1. Анализ напряженно-деформированного состояния и собственных частот анкера 40
ГУДОШНИК В. А., ГУБСКИЙ С. А., ПОПОВ В. А., ЧМЫРЬ Ю. В. Исследования и практика применения магнитной структуроскопии при техническом диагностировании кранов-перегрузателей завода «Сибтяжмаш» 46
ДУХОВСКИЙ А. Ю., СИДОРОВ В. А. Использование эндоскопии при осмотрах механического оборудования металлургических предприятий 51

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

10-я Юбилейная международная выставка «NDT RUSSIA – 2011 Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности» 57
Промышленные выставки ПАТОН ЭКСПО 58
7-я Национальная венгерская конференция-выставка по неразрушающему контролю 60
Аттестация словенских специалистов 61

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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



Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

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, V. L. Vengrinovich,
E. F. Garf, A. A. Gruzd,
E. A. Davydov, A. T. Zelnichenko,
M. L. Kazakevich, O. M. Karpash,
V. V. Klyuev, A. A. Lebedev,
L. M. Lobanov, Z. T. Nazarchuk,
N. V. Novikov, Yu. N. Posypayko,
G. I. Prokopenko, V. A. Storozhenko,
V. A. Strizhalo, V. N. Uchanin,
S. K. Fomichev, N. G. Chausov,
E.V. Shapovalov, V. E. Shcherbinin

Address

The E. O. Paton Electric
Welding Institute
of the NAS of Ukraine,
11 Bozhenko str.,
03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: (044) 200-23-90,
Fax: (044) 200-54-84, 200-82-77
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
thearticles contained here in are
protected by copyright.Permission to
reproduce material contained in this
journal must beobtained in writing
from the Publisher.

CONTENTS

NEWS..... 3

SCIENTIFIC-TECHNICAL

NEDOSEKA A.YA., NEDOSEKA S.A., OVSIENKO M.A. Influence
of methods of acoustic-emission data treatment on formation of
AE events and determination of their coordinates 5

BEREZIN V.B., CHAUSOV M.G. Investigation of deformation field
of flat surface of material samples by the method of correlation of
digital images. (Static loading) 15

*BLIZNYUK E.D., EREMENKO V.S., KUTS YU.V., BYSTRAYA
I.N., MONCHENKO E.V., TSAPENKO V.K.* Phase signal detector
for ultrasonic nondestructive testing 21

INDUSTRIAL

*BUDADIN O.N., KUTYURIN YU.G., FILIPENKO A.A.,
MUKHANOV E.E.* Facility for automated ultrasonic
nondestructive testing of complex-contoured products
from polymer materials 25

*SHULZHENKO A.V., POGORELAJA L.M., MANORIK P.A.,
GREBENNIKOV V.N., SIDOROVA N.A.* Method of manufacturing
sets of permeable elements with specified throughput capacity for
capillary control leaks 30

ABRAMOVA E.V. Diagnostic systems of thermal control:
comprehensive approach 34

BURAU N.I., KLEFA YU.V., KULISH E.V. Development of
methods for diagnostics of functional technical condition of struc-
tural elements of anti-landslide anchoring facilities Information 1.
Analysis of stressed-deformed state and anchor natural frequency 40

*GUDOSHNIKOV V.A., GUBSKII S.A., POPOV V.A.,
CHMYR YU.V.* Investigation and practice of application of
magnetic structuroscopy in technical diagnostics of loading cranes
of «Sibtayzhmash» plant 46

DUKHOVSKII A.YU., SIDOROV V.A. Application of endoscopy at
examination of mechanical equipment in metallurgical plants 51

NEWS AND INFORMATION

10th jubilee international exhibition «NDT RUSSIA – 2011
Nondestructive testing and technical diagnostics in industry» 57

Industrial exhibitions PATON EXPO 58

7th National Hungarian Conference-Exhibition on NDT 60

Certification of slovenian specialists 61

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

ТЕХНОЛОГИЯ УЗ-КОНТРОЛЯ FFAST-2

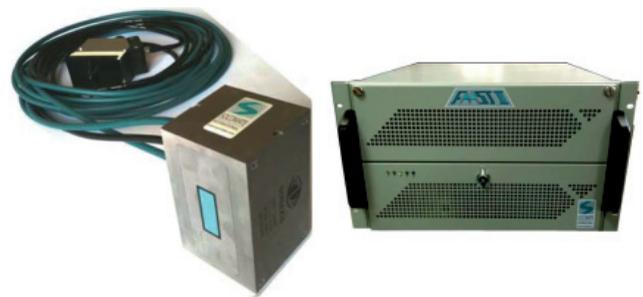
ГП «ОКБ ІЭС ім. Е.О.Патона НАН України» розробляється нове покоління обладнання для автоматизованого УЗ контролю труб з використанням технології та апаратури FFAST II («SOCOMATE» Франція).

Технологія FFAST II представляє собою технологію ультразвукового контролю, заснованої на фазованих решітках, розроблену спеціально для високоскоростних систем для контролю безпосередньо в лінії виробництва. FFAST II – запатентована технологія, що дозволяє проводити багатолучеве сканування при одному УЗ вистрілі через двохмерну фазовану решітку

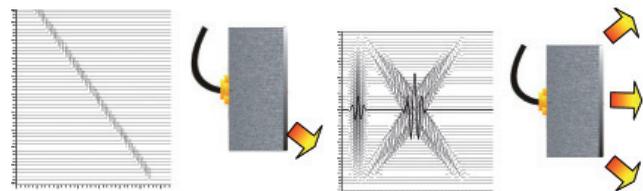
По порівнянню з класическою технологією, технологія FFAST II дає можливість прозвучивання металу труби в різних напрямках при єдиному УЗ вистрілі: при частоті зондування 1 вистріл на 1 мм досягається теоретическая тангенціальна швидкість контролю 2 м/с.

Характерною особливістю програмної обробки FFASTII є можливість одночасного перегляду А-сканів кожного луча по аналогії з традиційними багатоканальними акустическими системами. Ця можливість відсутня в існуючих дефектоскопах на базі фазованих решіток інших виробників.

На підприємстві «SANDVIK GROUP» в Швеції були проведені випробування УЗ системи FFAST II і отримані результати, на основі яких ця технологія була офіційно одобрена, а також були заключені контракти на обладнання для контролю труб нафтяної і газової промисловості, і труб для атомної енергетики.



2D матриця системи FFAST II для контролю труб на високій швидкості (зліва) і електронний блок системи (справа)

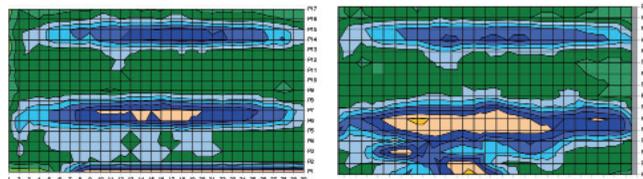


Один вистріл – одне напрямлення (класическа фазована решітка)

Один вистріл – всі напрямлення (FFAST II)

МАГНІТНИЙ КОНТРОЛЬ НА СЛУЖБЕ БЕЗОПАСНОСТІ КИСЛОРОДНИХ БАЛЛОНІВ

Вперше в ІЭС ім. Е.О. Патона НАН України в стінках ненавантажених баллонів встановлена неоднорідність напружено-деформованого стану (зліва), коли одна частина баллону підвержена еластичній деформації, а інша – пластическій, в результаті чого при робочому тиску можливо утворення «зон ризику». При цьому з підвищенням тиску відбувається перерозподіл коєрцитивної сили (справа), яка при певних умовах експлуатації може досягти значення, відповідного межі міцності металу. Таким чином, використання магнітного контролю відкриває перспективу безпечної експлуатації баллонів.



Розподіл коєрцитивної сили H_c в металі баллону з використанням структуроскопа КРМ-Ц-К2М: області підвищених значень H_c в ісходному стані (зліва); то ж після навантаження 325 МПа (справа)

АПАРАТУРА ДЛЯ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ФЕРОМАГНІТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ МАГНІТОПРУЖНОЇ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

В окремих випадках технічного діагностування елементів конструкцій застосування методу акустическої емісії обмежене. Це відбувається тоді, коли додатково навантаження об'єкта контролю, як цього вимагають регламентні документи на проведення акустическо-емісійного діагностування, може бути недопустимим. В цій ситуації можна одержувати інформацію про стан феромагнітного конструкційного матеріалу методом магнітопружної акустическої емісії (МАЕ). Вона виникає під час перемагнічування феромагнетика і пов'язана з ефектом Баркгаузена.



Комплект аппаратури для збудження, відбору, реєстрації та обробки сигналів МАЕ

контролю. Дослідження проводяться за такими напрямками: створення теоретичних основ методу, розвиток методик прикладного застосування та розроблення і виготовлення засобів діагностування феромагнітних елементів конструкцій.

Створено вимірювальні засоби, зокрема магнітоакустичну вимірювальну систему МАЕ-1Л, яка призначена для розв'язання задачі відбору та обробки інформації, представленої сигналами МАЕ, що виникають під час збудження стрибків Баркгаузена у феромагнетик у зовнішнім змінним магнітним полем та проведено їх метрологічне атестування.

Збуджують МАЕ процеси стрибкоподібної зміни положення доменних стінок, якими супроводжуються магнітострикційні ефекти. Як показали дослідження, генерування МАЕ чутливе до структурних змін матеріалу об'єкта, а параметри сигналів залежать від режиму термообробки, пластичної деформації, залишкових напружень, наводнення тощо.

У відділі акустико-емісійного діагностування елементів конструкцій ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України (м. Львів) інтенсивний розвиток отримав метод МАЕ для практичної реалізації створених методик діагностування на реально діючих об'єктах

PHENOM™ G2 PRO НАСТОЛЬНИЙ СКАНИРУЮЩИЙ ЕЛЕКТРОННИЙ МИКРОСКОП



Фирмой PHENOMWORLD разработан Phenom G2 pro – самый быстрый, эффективный и универсальный настольный сканирующий электронный микроскоп. Уникальная конструкция позволяет применять его для решения большого числа разнообразных задач материаловедения, контроля качества на производстве, криминалистики, фармацевтики, научно-исследовательских задач и для обучения специалистов. Phenom G2 pro – наиболее технически оснащенная и совершенная модель в серии микроскопов Phenom. Благодаря улучшенным техническим характеристикам детектора, новому источнику электронов и новой обзорной камере для навигации Phenom G2 pro стал самым мощным настольным сканирующим электронным микроскопом.

Функциональные возможности масштабирования (зума) обзорной навигационной камеры позволяют сократить промежуток между оптическим и сканирующим воспроизведением изображения. Диапазон увеличений сканирующего электронного микроскопа Phenom был увеличен и теперь составляет от 80 до 45 000 крат. Управление посредством сенсорного экрана и мыши обеспечивает еще более удобную и быструю работу на Phenom G2 pro, а также более точную навигацию. Кроме того, благодаря применению новой запатентованной технологии, уже через 30 секунд после загрузки образца можно получить изображение с высоким разрешением. Phenom G2 pro – это платформа, которая предлагает автоматизированные решения с применением программного пакета Pro Suite.

Программный пакет Pro Suite включает набор специальных прикладных программ, позволяющих выделить максимум информации из изображения. Таким образом, практически все свойства образцов могут быть изучены с помощью системы Phenom G2 pro, укомплектованной программным пакетом Pro Suite.

Стандартные приложения Pro Suite:

- MeasureIT – Проведение измерений
- Automated Image Mapping – Получение панорамных изображений
- Remote User Interface – Интерфейс удаленного доступа

Дополнительные приложения Pro Suite:

- Fibermetric – Измерение микро- и нановолокон
- 3D Roughness Reconstruction – Измерение шероховатости и получение трехмерных объектов.

Официальный представитель фирмы PHENOMWORLD (Нидерланды) – ООО «Мелитэк».



ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ АЭ СОБЫТИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ КООРДИНАТ

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, М. А. ОВСИЕНКО (Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины)

Рассмотрено влияние методики проведения измерений, настройки АЭ систем и обработки входных данных на формирование событий АЭ и результаты работы алгоритмов расчета координат источников АЭ. Приведены на примере АЭ системы ЕМА-3 рекомендации по выполнению процедуры настройки ряда параметров, влияющих на получаемую информацию в целом и, в частности, на точность определения координат событий АЭ. Проведенный анализ влияния различных факторов на получение достоверной АЭ информации может быть полезен для специалистов в области АЭ контроля и при создании унифицированной процедуры метрологии АЭ систем различных типов.

The paper deals with the influence of measurement procedure, AE system adjustment and input data processing on AE event formation and results of operation of algorithms for calculation of AE source coordinates. Recommendations are given for the case of AE system EMA-3 on performance of the procedure of setting up a number of parameters affecting the obtained data as a whole, in particular, accuracy of determination of AE event coordinates. Conducted analysis of the influence of various factors on obtaining valid AE data can be useful for specialists in the field of AE testing and in development of a unified procedure of metrology of AE systems of different types.

Широкое применение акустико-эмиссионного (АЭ) метода контроля состояния конструкций, в том числе и работающих после окончания нормативного срока эксплуатации, в различных отраслях промышленности [1] дало серьезный толчок к более глубокому изучению явления акустической эмиссии, совершенствованию самого метода и расширению сферы его применения, усовершенствованию аппаратуры и развитию нормативно-методической базы.

Несмотря на смещение в последнее время акцентов в развитии данного метода контроля в сторону оценки состояния конструкций в целом и прогноза их разрушения, большое внимание следует уделять и вопросам приема и обработки поступающей с объекта контроля информации, повышению ее достоверности, расширению возможностей программного обеспечения и аппаратурной части систем технической диагностики конструкций.

Переход к мониторинговому (непрерывному) контролю состояния объектов также не уменьшил значимости повышения точности определения местоположения источников АЭ — дефектных областей конструкций, поскольку это позволяет в кратчайшие сроки и с минимальными потерями времени и ресурсов проводить ремонт контролируемых изделий, избежать крупных технологических аварий.

Разработка методов локации источников сигналов акустической эмиссии представляет собой важную область знаний, исследования в которой

ведутся еще с 1960–1970-х гг. Теоретическая часть, связанная с решением данной проблемы, представлена в многочисленных публикациях, например [2–9], некоторые из них считаются «классическими». Практически все современные системы АЭ диагностики решают эту задачу более-менее успешно.

Существуют различные методы и алгоритмы расчета координат источников АЭ по разнице времени прихода сигнала на несколько разнесенных по поверхности объекта контроля АЭ датчиков. В зависимости от типа объекта контроля используются разнообразные конфигурации расположения датчиков: линейные, плоскостные (планарные) или объемные [7,10, 11]. Работа датчиков АЭ в режиме не только приемников, но и излучателей сигналов АЭ определенного диапазона позволяет уточнить координаты датчиков на поверхности объекта в процессе подготовки к проведению контроля, учесть изменение скорости распространения сигналов. На решение данного вопроса также направлено и применение кластеризации полученной информации как по координатному принципу, в том числе и с учетом веса, например, использование в качестве веса амплитуды (энергии) сигналов, так и по временным задержкам с последующим определением координат. Изучение путей распространения сигналов на реальных конструкциях достаточно сложно, поэтому оценка погрешности определения источников АЭ при работе на таких объектах проводится предварительно с использованием различных имитаторов сигналов акустической эмиссии (например, исполь-



зование датчиков в режиме имитации сигналов АЭ) при подготовке к проведению испытания.

Однако методы, алгоритмы и формулы расчета координат по временным задержкам являются только одной составляющей проблемы. В данной работе рассмотрена вторая, не менее важная, составляющая — влияние методики проведения измерений, настройки АЭ системы и обработки получаемых данных на формирование событий АЭ и результаты работы алгоритмов расчета координат источников АЭ. Приведены также рекомендации по выполнению процедуры настройки ряда параметров, влияющих на получаемую информацию в целом и, в частности, на точность определения координат источников АЭ на примере АЭ системы ЕМА-3.

Результаты многолетней работы по проведению краткосрочных, длительных испытаний и непрерывного АЭ мониторинга самых разнообразных изделий убедительно показывают, что выбор правильной методики проведения испытаний и настройки АЭ систем является чрезвычайно важным фактором как для определения координат источников АЭ, так и для получения достоверной оценки состояния объектов контроля.

Рассмотрим некоторые аспекты построения современных АЭ систем. Все они являются электронными устройствами, преобразующими входную информацию в цифровой вид и обрабатывающими ее на компьютере [7, 8]. Потоки входных данных настолько велики, что без их цифровой обработки какой бы то ни было их анализ просто невозможен. Разрешающая способность канала АЭ системы для корректной обработки сигнала и последующего использования данных при определении координат должна быть не ниже 1 мкс. При такой разрешающей способности погрешность определения координат при условии отсутствия других влияющих факторов составит при скорости распространения звуковой волны в материале 5 мм/мкс не более 5 мм. Отметим, что данный параметр является не единственным, оказывающим влияние на точность определения координат.

Приведем некоторые соображения относительно настроек АЭ систем, существенно влияющих на получаемые результаты. Большинство приведенных ниже примеров, содержащих конкретные данные по настройкам, получены при использовании систем АЭ диагностики Defectophone, ЕМА-1...ЕМА-4, ГАЛС-1. Тем не менее, учитывая все большую унификацию современных методов получения АЭ информации, вероятность их соответствия условиям работы других АЭ систем достаточно велика, несмотря на отсутствие на данный момент единой процедуры их метрологической аттестации. Следует отметить также неполноту существующих стандартов в области АЭ и необязательность их использования, что приво-

дит к расхождениям в терминологии, используемой как различными разработчиками АЭ систем, так и эксплуатирующими их предприятиями. Вопрос стандартизации терминологии и единой процедуры поверки является чрезвычайно важным, но хотя он пока и не решен полностью общие принципы организации преобразования и последующей цифровой обработки входных аналоговых данных во многих современных АЭ системах аналогичны.

Типичная АЭ система является многоканальным прибором, в котором информация, получаемая каждым каналом, обрабатывается независимо. Каждый канал может быть настроен индивидуально, причем количество таких настроек в разных системах варьируется от одной-двух до нескольких десятков. Рассмотрим те из них, которые присущи многим системам и существенно влияют на процедуры идентификации событий АЭ и определения координат мест их возникновения. Отметим также, что в зависимости от типа используемой АЭ аппаратуры и программного обеспечения упомянутые настройки могут быть выполнены на аппаратурном уровне, на программном или на обоих индивидуально. Различие в этих настройках состоит в том, что ограничения, внесенные на аппаратурном уровне, не всегда могут быть отменены или скорректированы при постэкспериментальной обработке данных. Поэтому, если при проведении АЭ измерений есть возможность пользоваться только программными ограничениями без потери качества получаемых результатов, следует выбирать именно их.

Рассмотрим вначале наиболее важные аппаратурные и программные решения, касающиеся настройки и ограничения параметров АЭ, которые влияют в большей степени не на определение координат, а на количество регистрируемых событий АЭ. Некорректная их реализация или установка может привести к тому, что некоторые события не будут зарегистрированы вообще, или же за счет отсутствия отбраковки шумов и переотраженных сигналов может быть зарегистрировано множество ложных событий с произвольными координатами.

Принципы объединения отдельных единичных откликов датчиков в единое событие. Единичный отклик (срабатывание) одного датчика на действие источника АЭ некорректно называть событием. Событие формируется как совокупность срабатываний датчиков на одно и то же действие источника АЭ. В некоторых случаях, например при установке слишком низкого порога амплитудной дискриминации, отклик датчика может происходить вследствие повышения общего шумового фона или по ряду других причин.

Современные АЭ системы могут работать в режиме зонной локации, когда определение координат источников АЭ не выполняют, или же в режиме локационной антенны (другое название —



локационная группа), когда по задержкам времени прихода сигнала на различные датчики рассчитывают координаты источника АЭ.

Следует учесть следующее:

- не каждое срабатывание датчика АЭ соответствует действию реального источника АЭ в материале;

- не каждый реальный источник АЭ приводит к появлению той полезной информации, которая может быть использована для определения его координат и характеристик, и является истинным событием АЭ;

- не каждый источник АЭ имеет отношение к реальным процессам накопления повреждений и разрушения в материале.

В связи с этим принцип интерпретации отдельных срабатываний датчиков и последующего объединения их в события играет важнейшую роль как при определении координат источников АЭ, так и при их анализе.

Существует два основных подхода к формированию событий АЭ на основе пришедших на датчики и вызвавших отклики сигналов:

- включать в событие все срабатывания, зарегистрированные в установленный, достаточно малый промежуток времени;

- включать в событие фиксированное число срабатываний на основании заранее заданного признака.

Достоинства и недостатки имеют оба подхода. Достоинством первого является возможность получения дополнительной информации в случае, если количество сработавших датчиков было большим, чем требуется для определения координат источника АЭ. Это в некоторых случаях позволяет уточнить координаты источника, его количественные параметры и дополнительно проанализировать характер распространения акустического сигнала от данного источника АЭ. Недостатком является то, что в качестве события могут быть восприняты одиночные срабатывания или такие наборы срабатываний, для которых расчет координат невозможен или приведет к серьезным ошибкам (например, только два датчика сработали при плоскостной локации). Вероятна также интерпретация более поздних срабатываний нескольких датчиков в результате переотражений сигнала как нового события, координаты которого, естественно, не будут соответствовать местоположению реального источника АЭ в материале.

Преимуществом второго подхода является гарантия того, что если событие сформировано, то расчет координат источника возможен. Обеспечивая достаточность информации, данный подход в то же время приводит к отсеву всех избыточных данных, что в некоторых случаях является недостатком. Например, если для определения координат

источника АЭ на плоскости требуются срабатывания трех датчиков, то в событие будут включены только они. В то же время дополнительная информация, полученная, например, от четвертого сработавшего датчика, могла бы помочь уточнить рассчитанные координаты.

В связи с изложенным выше рекомендуется наличие в системах АЭ контроля обоих вариантов организации событий.

Дискриминация по амплитудному признаку называется также амплитудным порогом или порогом чувствительности. Является одним из самых важных ограничений, вносимых в настройки систем АЭ, предназначенным для корректного выделения сигналов из общего шумового фона. Как правило, выполняется только для ограничения минимальных значений амплитуд принимаемых сигналов АЭ. Установка слишком высоких порогов приводит к тому, что полезные сигналы могут быть отбракованы, а занижение, напротив, ведет к тому, что в качестве полезных сигналов могут быть ошибочно восприняты кратковременные повышения шумового фона.

Важно отметить, что понятие амплитуды сигналов АЭ в разных системах диагностики отличается. Величина регистрируемой амплитуды зависит от используемого типа датчика, предварительных и основных коэффициентов усиления, принципов выделения события из общего потока непрерывной эмиссии. Ограничение максимальных значений амплитуд может представлять некоторый интерес при лабораторных исследованиях АЭ свойств различных материалов.

Многие современные АЭ системы предусматривают автоматическую или полуавтоматическую установку амплитудных порогов. Рассмотрим некоторые общие методические принципы этой процедуры.

Как правило, пороги устанавливаются перед началом нагружения материала, но при работающей системе нагружения (при проведении АЭ контроля в рабочем режиме эксплуатации объекта необходимо предварительно оценить уровень производственного шума). Установив первоначальные значения порогов достаточно высокими, их постепенно снижают до тех пор, пока не возникают отдельные срабатывания датчиков, вызванные тем, что общий шумовой фон начинает периодически достигать установленного порога. Затем порог постепенно поднимают до исчезновения таких срабатываний. Обычно такой подход обеспечивает максимальную чувствительность датчиков и отбраковку ложных сигналов, вызванных повышением фона.

Дискриминация по признаку строба. Данный признак называется также мертвым временем или временем молчания. Принцип работы строба заключается в том, что некоторое время, отсчи-

тываемое от начала или завершения текущего события АЭ, используется для отсева всей поступающей после него АЭ информации, которая считается связанной с переотражением уже принятых сигналов. Настройка, как правило, выполняется только для ограничения минимальных значений. Это означает, что срабатывания датчиков, полученные в этот период времени, будут отбракованы. Отключение строга или установка слишком малых его значений приводит к тому, что в качестве основного будет интерпретирован переотраженный сигнал, каждое срабатывание датчика будет воспринято как новое событие АЭ, а это, в свою очередь, приведет к регистрации множества ложных событий с различными, «разбросанными» координатами.

Автоматическая установка строга может быть выполнена расчетным или экспериментальным путем. В программном обеспечении систем ЕМА-3 использован расчетный метод, который с учетом скорости распространения волны в материале определяет время, в течение которого будут происходить переотражения. Экспериментально определение строга может быть выполнено с использованием генератора импульсов или механического имитатора, например, графитового стержня. Подав на объект контроля одиночный акустический импульс, строг устанавливается таким образом, чтобы такому импульсу соответствовало одно срабатывание каждого используемого датчика. Как правило, такой метод работает достаточно эффективно и гарантирует отбраковку переотраженных сигналов.

Дискриминация по признаку частоты сигнала является полезным средством для отсева помех, в частности производственных. Датчики АЭ работают, как правило, в широком частотном диапазоне, поэтому вероятность приема сигналов, не имеющих отношения к происходящим процессам в материале, весьма велика. Помеха может быть сигналом как в низкочастотном, так и в высокочастотном диапазоне, поэтому требуются фильтры как нижних, так и верхних частот. Еще более эффективным представляется использование наборов полосовых фильтров, в чем-то подобных используемым в аудиотехнике эквалайзерам. При проведении испытаний промышленных объектов идеальной представляется ситуация, когда частотный диапазон вероятного источника помех известен заранее, и можно еще до начала испытания установить соответствующие ограничения на принимаемые сигналы [7].

В то же время использовать ограничения по частоте следует обоснованно, поскольку ошибки могут привести либо к регистрации помех в качестве истинных событий, либо, напротив, к неоправданной отбраковке полезной информации и

снижению качества результатов проводимых измерений.

Изложенное выше проиллюстрируем представленными на рис. 1 результатами различных способов обработки одного и того же лабораторного эксперимента. На плоском алюминиевом листе толщиной 8 мм была начерчена окружность, в отдельных точках которой последовательно, перемещаясь по часовой стрелке, проводили излом графитного стержня. Для локаций использовали четыре датчика АЭ, расположенные в вершинах квадрата размером 600×600 мм. Точками показаны координаты отдельных событий АЭ, флажками — образованные на их основе кластеры с радиусом кластеризации 30 мм. Очевидно, что при оптимальных настройках порогов амплитуды и строга картина (рис. 1, а), получаемая на экране системы ЕМА-3, наиболее соответствует реальности. При завышенных порогах амплитуды большая часть событий отбраковывается, и полезная информация пропадает (рис. 1, б). При отключенном строге, напротив, за счет переотражений в материале возникают ложные события АЭ, которые системой не отбраковываются (рис. 1, в). При установке завышенного порога частоты ситуация аналогична случаю, приведенному на рис. 1, б, за исключением того, что отбракованы полезные сигналы не с более низкой амплитудой, а с более низкой частотой (рис. 1, г).

Дискриминация по признакам длительности события, числа осцилляций и времени нарастания сигнала. Данные параметры сигнала АЭ имеет смысл рассматривать совместно, хотя они и не полностью взаимосвязаны. Покажем их схематически на рис. 2. Число осцилляций C , длительность сигнала W и его средняя частота F_{cp} связаны простой математической зависимостью $F_{\text{cp}} = C/W$.

Время R нарастания сигнала до максимума амплитуды (от английского «Rise time») должно, естественно, находиться в диапазоне $0...W$, но реальный физический смысл предельные значения будут иметь далеко не всегда. Естественные физические процессы, связанные с развитием повреждаемости материала, обычно порождают акустические сигналы сложной формы, но с ненулевым временем нарастания и спада. Поэтому в условиях производственных помех имеет смысл проанализировать характер получаемой информации и при наличии событий АЭ с нулевым или максимальным временем нарастания провести их отбраковку как не соответствующих по параметрам развитию дефектов в материале.

Особенностью производственных помех является то, что акустические сигналы от них не имеют четкой локализации и приводят, как правило, к практически одновременному срабатыванию всех датчиков АЭ. В зависимости от используе-



мого алгоритма локации в качестве координат источников таких сигналов будет определен тот участок конструкции, для которого задержки времени прихода сигнала на разнесенные датчики будут близки к нулю.

Пример отбраковки событий с нулевым временем нарастания сигнала до максимального значения амплитуды представлен на рис. 3.

При гидроиспытаниях трубы длиной 8000 мм с заглушками, приваренными с двух сторон кольцевыми швами, начало накопления повреждений соответствовало области швов. При этом локационная антенна из равномерно размещенных по линии вдоль верхней образующей трубы датчиков АЭ показала акустическую активность как в области швов, так и в центральной части трубы (рис. 3, а). Анализ полученных событий АЭ в среднем кластере показал, что все они имеют одинаковое время прихода на датчики 2 и 3 и, соответственно, нулевые задержки.

Значение времени нарастания у всех событий было нулевым. После установки ограничения минимального значения времени нарастания равным 125 нс (соответствует разрешающей способности

системы) локализация принимаемых сигналов АЭ на экране изменилась, как показано на рис. 3, б. Учитывая, что разрушение материала произошло впоследствии по одному из швов, можно сделать вывод, что путем установленного ограничения были исключены шумы, связанные с работой системы нагружения.

Ограничения времени нарастания по максимуму, а также остальных рассматриваемых здесь параметров, могут, вероятно, иметь смысл в отдельных специальных случаях, в целом же следует исходить из понимания физической природы процессов, протекающих в материале при проводимых испытаниях. Общие рекомендации по их применению в рамках данной работы сформулировать трудно.

Проанализировав параметры АЭ, влияющие на правильность формирования событий и отбраковку на их основе ложной информации, и представив на рис. 1, 3 их влияние на окончательные результаты, перейдем к рассмотрению параметров уже сформированных событий, влияющих непосредственно на определение координат независимо от методов и формул их расчета.

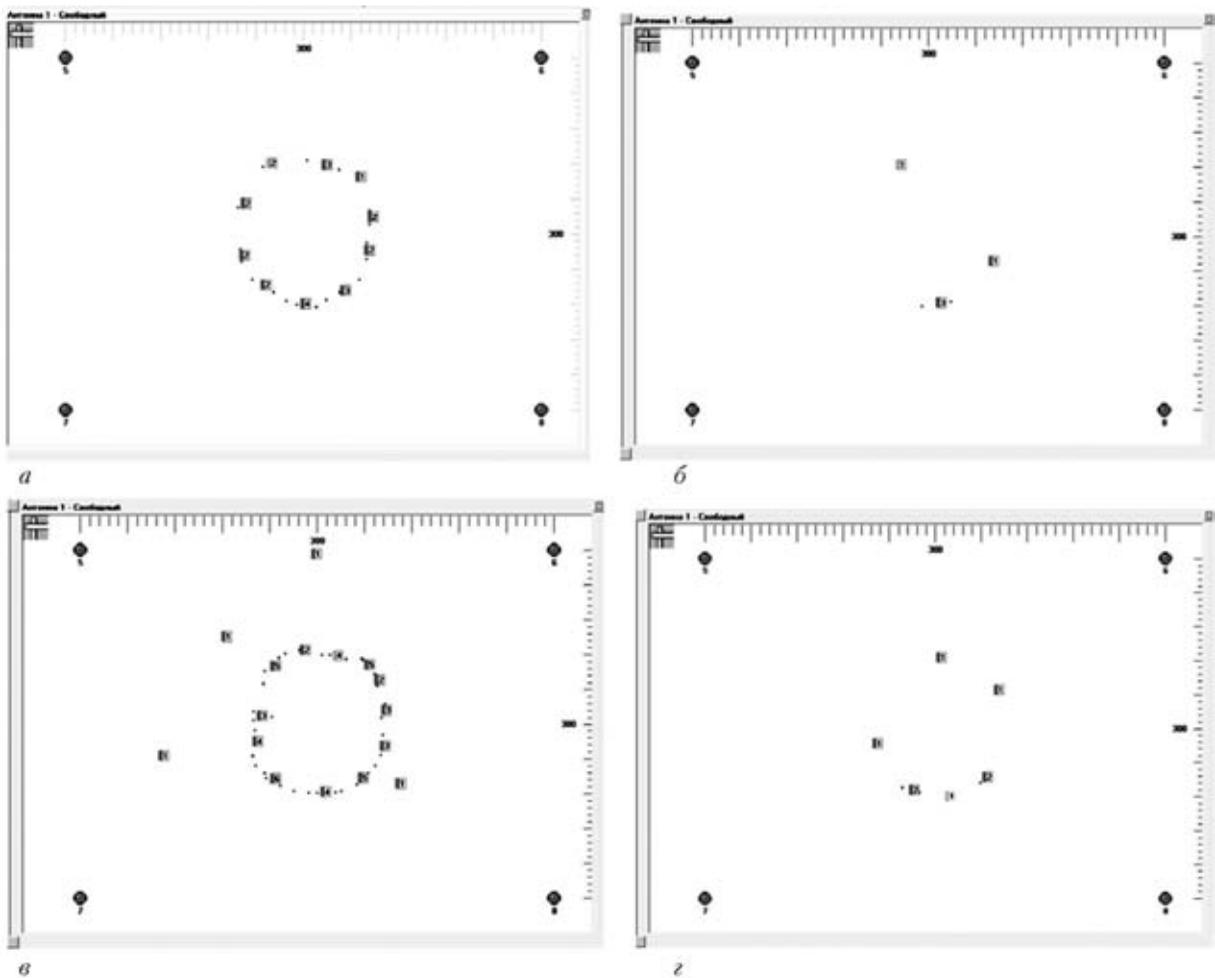


Рис. 1. Локация событий АЭ системой ЕМА-3 на плоскости при механическом воздействии — изломе графитового стержня — по точкам окружности: а — оптимальные настройки; б — нижний амплитудный порог повышен до 48 дБ; в — строб отключен; г — нижний порог частоты повышен до 310 кГц

Скорость распространения волны в материале. Физический параметр, используемый в большинстве расчетных методов при определении координат событий АЭ (пример-исключение: при линейной локации за счет избыточности количества датчиков (более двух) и, соответственно, временных задержек в расчетных формулах вместо скорости можно использовать соотношение задержек). Вне зависимости от используемого метода расчета координат неправильное определение скорости приведет к смещению расчетного положения источника АЭ относительно истинного. В случае линейной локации антенной из двух датчиков использования простейшего метода расчета и отсутствия погрешностей измерения других величин при истинной скорости распространения звуковой волны в материале $V_{и} = 5$ мм/мкс и расстоянии между датчиками $B = 100$ мм максимальная погрешность определения координат за счет задания неверного значения скорости $V = 4,9$ мм/мкс составит 2 мм, а при значении скорости $V = 4$ мм/мкс уже 20 мм. При таком же значении скорости и установке датчиков на рас-

стоянии 10 м ошибка составит 2 м, т. е. точность локации будет неудовлетворительной.

Существуют различные методы определения скорости распространения акустических волн в материале. Отметим только необходимость выполнения этой процедуры перед началом каждого проводимого АЭ испытания, поскольку табличные значения данного параметра могут существенно отличаться от его значения в конкретном случае сочетания «материал–конструкция». Одним из действенных способов проверки правильности установленного значения скорости можно считать использование имитаторов акустической эмиссии. Точно зная координаты такого источника, легко проверить, насколько правильно АЭ система их определяет. Можно также, варьируя установленным значением скорости, убедиться, насколько оно является оптимальным применительно к локации источников АЭ на данном конкретном объекте.

Ограничения по времени задержки служат для отбраковки событий АЭ, не соответствующих физическим свойствам и конфигурации объектов контроля. Важны как ограничение времени задержки, так и отслеживание порядка прихода сигнала на датчики. Ограничение времени должно соответствовать условию прохождения сигнала АЭ в пределах установленной группы датчиков и определяется, исходя из расстояния между ними и скорости распространения акустических волн в материале. Особенности, связанные с установкой значений скорости, рассмотрены выше. Если порядок прихода сигналов на датчики и, соответственно, их срабатывание не соответствует физической природе распространения волн в материале, такое событие АЭ подлежит отбраковке.

Ограничения по зоне контроля применяются к уже сформированным событиям, прошедшим

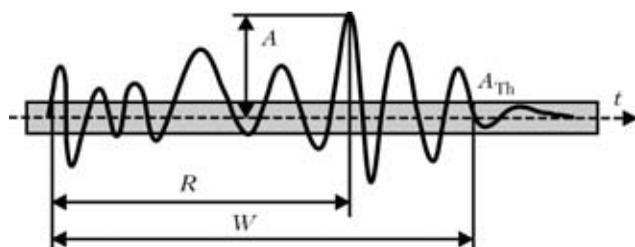


Рис. 2. Выделение единичного срабатывания датчика из непрерывного АЭ сигнала (началом события считается превышение амплитудой сигнала порога дискриминации A_{Th} , завершением — снижение амплитуды до уровня ниже порога; A — максимальная амплитуда; W — полная длительность события; R — время нарастания сигнала до максимума. Число осцилляций C соответствует числу превышений сигнала над порогом)

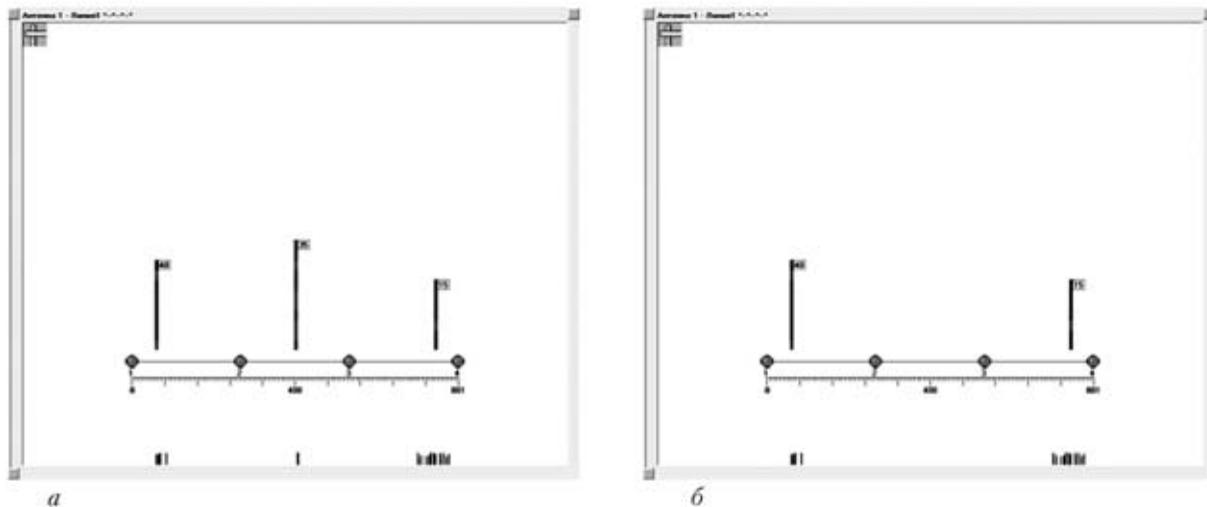


Рис. 3. Экран локации системы ЕМА-3 при гидрониспытаниях трубы: *а* — без установки ограничений на параметры АЭ; *б* — с ограничением минимума времени нарастания до 125 нс. В нижней части экрана показаны координаты событий АЭ, столбики с флажками — результат их объединения в кластеры



отбраковку по всем приведенным выше параметрам. Используется, во-первых, для исключения из дальнейшего анализа событий, находящихся за пределами выбранной для локации области, во-вторых, для исследования АЭ активности на выбранном локальном участке материала.

Влияние перечисленных выше параметров на результаты локации приведены на рис. 4 применительно к эксперименту, ранее представленному на рис. 1.

Очевидно, что увеличение задаваемой скорости звука в материале (рис. 4, б) приводит к изменению расчетных координат событий АЭ, и полученная окружность растягивается. Уменьшение задаваемой скорости звука (рис. 4, в) приводит к тому, что окружность сжимается и, кроме того, два ложных события, отсеянные за счет ограничения зоны контроля при правильно установленной скорости звука, на этот раз попадают в контролируемую область. На рис. 4, г показано, как

эти события могут быть эффективно отфильтрованы за счет уменьшения значения допустимого максимального времени задержки прихода сигнала на датчики АЭ.

Кластеризация. Возможность объединения событий АЭ в кластеры, несмотря на ее чрезвычайную полезность, имеется не во всех современных системах АЭ контроля. На приведенных выше рисунках наряду с результатами локации помимо точек (при линейной локации — столбиков), отображающих координаты отдельных событий АЭ, показаны также результаты кластеризации событий системой ЕМА-3. Задавая различные размеры кластера, можно по-разному интерпретировать и анализировать получаемую информацию. Изначально в эксперименте, результаты которого приведены на рис. 1 и 4, при имитации отдельных событий АЭ по точкам окружности выбраны размеры кластера 30 мм. Покажем на рис. 5 работу алгоритма кластеризации при очень малых (рис.

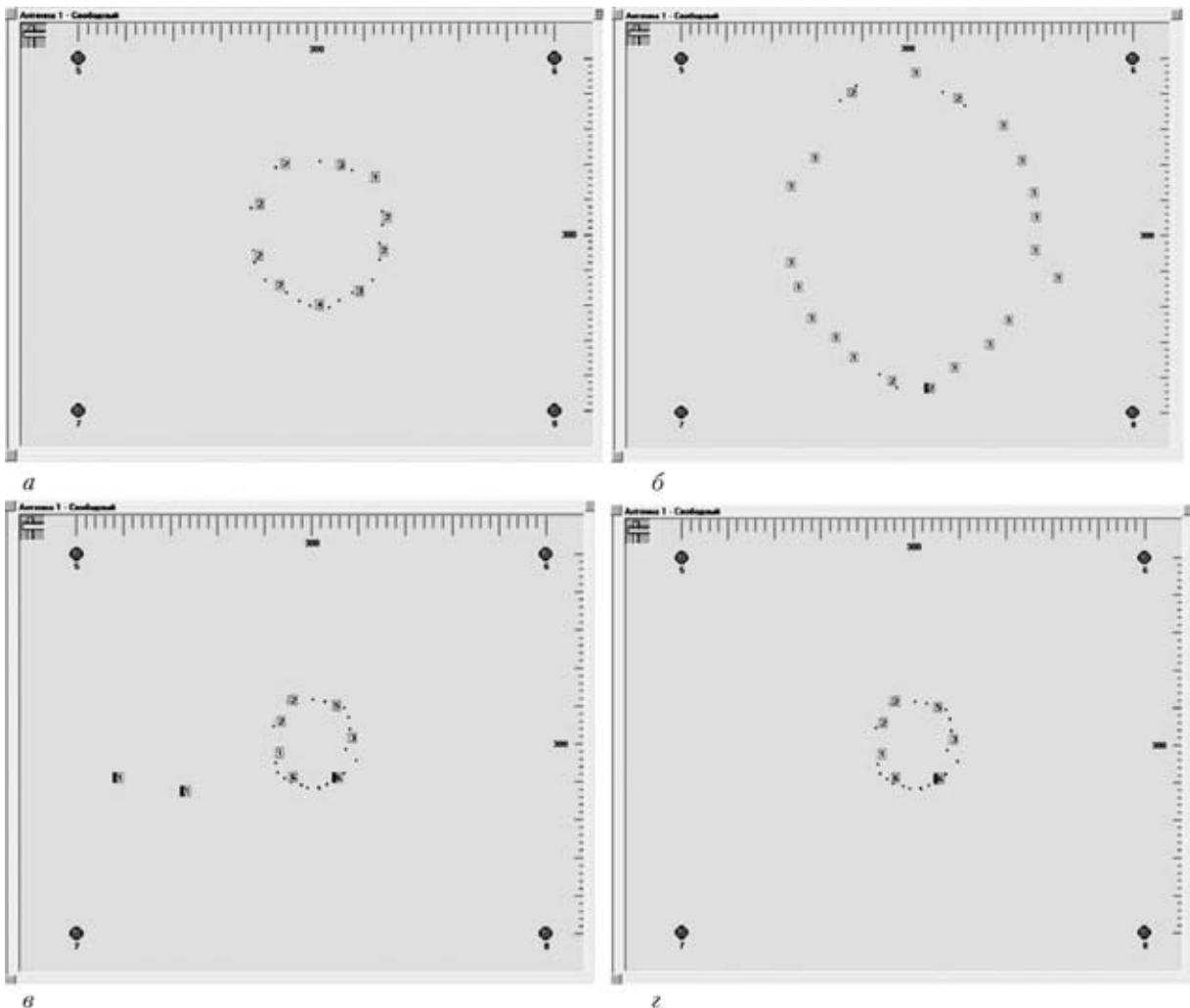


Рис. 4. Влияние параметров настройки системы ЕМА-3 на результаты локация событий АЭ на плоскости при изломе графитового стержня в точках окружности: а — оптимальные настройки; б — задаваемая скорость звука в материале увеличена с 3,5 до 7 мм/мкс; в — задаваемая скорость звука в материале уменьшена с 3,5 до 2 мм/мкс; г — при задаваемой скорости звука в материале 2 мм/мкс установлено максимальное время задержки 80 мкс

5, а) и очень больших (рис. 5, б) (в рамках данного эксперимента) размера кластера.

Очевидно, что в первом случае каждый образованный кластер соответствует единичному событию АЭ, во втором образуется только один кластер, соответствующий с заданной вероятностью геометрическому центру всех полученных событий АЭ. Если объединение многих событий в один общий кластер в условиях данного эксперимента не является целесообразным, то применение такого подхода при испытаниях образцов и реальных конструкций, особенно из-за сложной формы объектов и в условиях наличия помех, является очень эффективным.

При наличии существенного разброса в определяемых координатах событий, с высокой вероятностью относящихся к одному и тому же процессу в материале, объединение их в кластер позволяет наиболее точно указать место возникновения их источника. Особенно это важно для тех участков конструкций, доступ к которым по техническим причинам невозможен. Простым при-

мером эффективности кластерного анализа может служить испытание на статическое растяжение образца из стали 12Х18Н10Т при температуре 560°С (рис. 6). Рабочая часть образца находилась внутри электропечи [12] и была недоступна как для установки датчиков АЭ, так и для визуального наблюдения. Следует учитывать также достаточно высокий уровень шумов, создаваемых системой нагружения.

Как видно из рис. 6, при проведении испытания события АЭ были зарегистрированы на всем рабочем участке. Для определения наиболее вероятного места разрушения перед началом испытания был задан размер кластера 600 мм. Все полученные события АЭ с координатами, расположенными между датчиками 1 и 2, обрабатывали как принадлежащие одному и тому же источнику. Обработка данных кластера показала, что его геометрический центр расположен на участке образца с координатой 360 мм (отсчет координат выполняли от датчика 1).

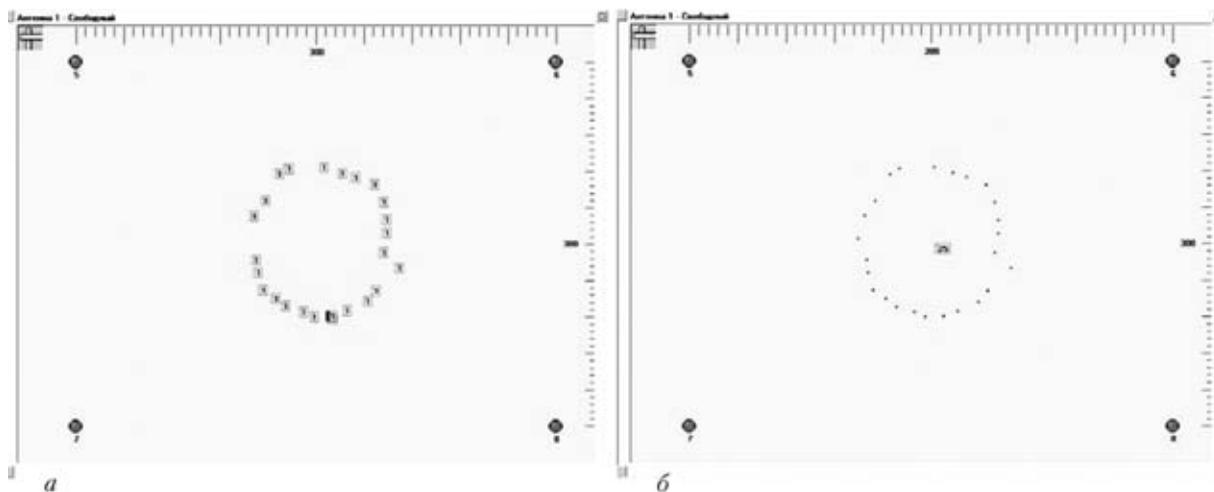


Рис. 5. Влияние размера кластера на результаты локации событий АЭ на плоскости при изломе графитового стержня по точкам окружности: а — 1; б — 300 мм

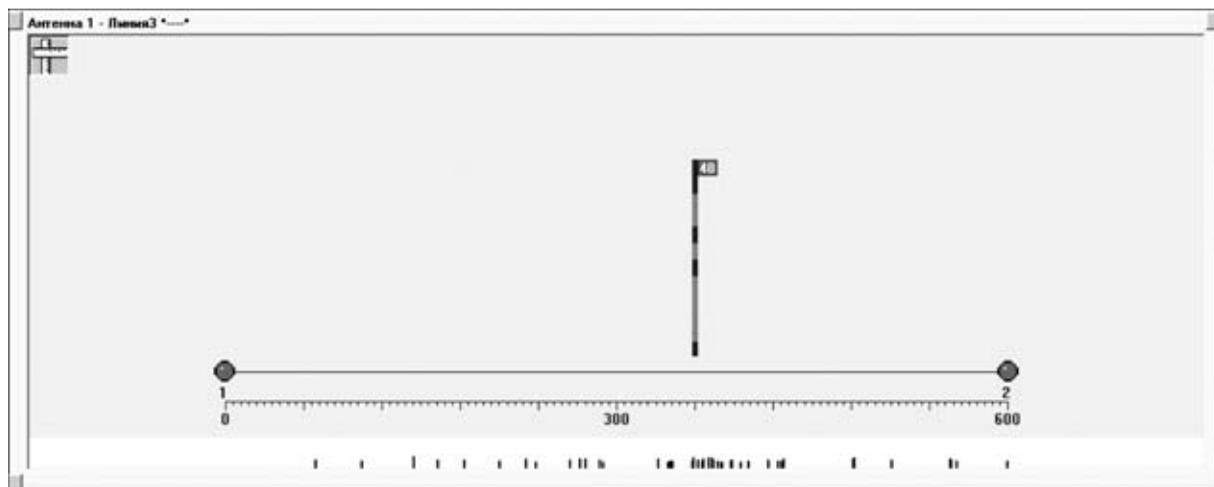


Рис. 6. Окно локации системы ЕМА-3 после испытания образца из стали 12Х18Н10Т при температуре 560 °С (столбик с флажком соответствует кластеру, показывающему вероятное место разрушения)



После окончания испытания и извлечения образца провели замеры, показавшие, что разрушение образца произошло на участке с координатой 357 мм. Таким образом, кластерный анализ показал хороший результат, так как погрешность определения координаты места разрушения по отношению к расстоянию между датчиками (так называемой базе антенны) составляет 0,5 %. Очевидно, что при отсутствии кластерной обработки судить о вероятном месте разрушения было бы достаточно трудно несмотря на несколько большую плотность распределения сигналов в области, где сформировалась трещина и затем произошло разрушение.

Учитывая, что в системе АЭ диагностики ЕМА-3 реализован алгоритм прогноза разрушающей нагрузки и предупреждений об опасности состояния материала [13–15], возможность кластеризации данных для данной системы является принципиально необходимой. Это позволяет группировать полученные события таким образом, чтобы они соответствовали конкретному источнику развития разрушения в материале. В противном случае прогноз пришлось бы выполнять на основе всех без исключения событий, в том числе относящихся к абсолютно разным источникам, что негативно отразилось бы на качестве прогнозных данных.

Укажем еще раз на достаточно сложную процедуру обработки первоначальной АЭ информации, необходимую для отбраковки ложных данных, формирование событий, подготовки для расчета координат источников АЭ и последующего прогнозирования состояния материала. В качестве резюме на рис. 7 приведем принятую для систем ЕМА-3 последовательность обработки АЭ информации.

Очевидно, что приведенный анализ факторов, влияющих на достоверность получаемых АЭ данных, не является исчерпывающим. Тем не менее,



Рис. 7. Обработка АЭ информации в системе ЕМА-3

следует полагать, что рассмотренные факторы действительно являются как наиболее важными с точки зрения рассматриваемой проблемы, так и общими для различных систем АЭ диагностики. Поэтому приведенные результаты могут быть полезными для специалистов в разных областях применения метода АЭ: при разработке АЭ систем, при проведении АЭ испытаний, при создании и совершенствовании методик АЭ контроля применительно к различным промышленным объектам. Учитывая потребность в создании стандартов, других нормативных документов в области метрологии АЭ систем и необходимость унификации процедуры проведения АЭ измерений [15], выполненные и систематизация представляются своевременными.

Выводы

Проанализированы основные факторы, оказывающие существенное влияние на достоверность получаемых методом АЭ результатов, формирование событий АЭ и работу алгоритмов расчета их координат. Показано, что выбор методики проведения измерений, обработки входных данных, отбраковки ложной информации, корректной настройки параметров систем АЭ диагностики приобретает особую важность.

Показано, что применение кластерного анализа при обработке полученных с использованием систем АЭ диагностики данных позволяет обеспечить определение координат источников АЭ в производственных условиях, при наличии акустических помех и отсутствии доступа к поверхности объектов контроля.

Проведенный анализ влияния различных факторов на получение достоверной АЭ информации может быть полезен для специалистов, работающих в области АЭ контроля, при создании унифицированной процедуры метрологии АЭ систем различных типов.

1. *О применении метода акустической эмиссии для контроля промышленных конструкций / А. Я. Недосека, М. А. Яременко, М. А. Овсиенко, Л. Ф. Харченко // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 3. — С. 3–6.*
2. *Dunegan H. L. Acoustic Emission—A Promising Technique // Lawrence Livermore Laboratory Report UCID—4643. — 1963.*
3. *А. с. 868574 СССР, МКИ G 01 N 29/04. Многоканальное устройство для определения координат дефекта методом акустической эмиссии / С. И. Буйло, Г. А. Кузьмин, А. С. Трипалин. — Оpubл. 3.08.81, Бюл. № 36.*
4. *Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в атомной энергетике / Под ред. К. В. Вакара. — М.: Атомиздат, 1980. — 216 с.*
5. *Андрейків О. Є. Теоретичні основи методу акустичної емісії в механіці руйнування / Г. Т. Сулим, В. Р. Скальський. — Львів: Видавн. центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2006. — 461 с.*
6. *Грешиников В. А., Дробот Ю. Б. Акустическая эмиссия для испытаний материалов и изделий. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 273 с.*



7. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностика сварных конструкций. — Киев: Индпром, 2008. — 815 с.
8. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций / В. А. Стрижало, Ю. В. Добровольский, В. А. Стрельченко и др. / Под ред. Г. С. Писаренко. — Киев: Наук. думка, 1990. — 232 с.
9. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн. посібник: у 3 т. — Т.2. Методологія акустико-емісійного діагностування. — Київ: Наук. думка, 2009. — 263 с.
10. Определение координат развивающихся дефектов на цилиндрических поверхностях / А. Я. Недосека, М. А. Яременко, М. А. Овсиенко, Л. Ф. Харченко // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2006. — № 1. — С. 11–13.
11. Особенности распространения акустико-эмиссионных волн на поверхности трубооболочечных конструкций / А. Я. Недосека, М. А. Овсиенко, Л. Ф. Харченко, М. А. Яременко // Там же. — 2005. — № 2. — С. 24–28.
12. Исследование АЭ характеристик материалов при высоких температурах. Сообщение 1. Методика / Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека, С. А. Недосека и др. // Там же. — 2009. — № 1. — С. 5–10.
13. Недосека С. А. Диагностика и прогнозирование ресурса сварных конструкций методом акустической эмиссии. Дис. ... д-ра техн. наук. — Киев: Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, 2010 г. — 422 с.
14. Недосека С. А. Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2007. — № 2. — С. 3–9.
15. Недосека А. Я., Недосека С. А. Об оценке надежности эксплуатирующихся конструкций (состояние вопроса и перспективы развития) // Там же. — 2010. — № 2. — С. 7–17.

Поступила в редакцию
08.12.2010



16-а МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ЛЕОТЕСТ-2011» В СЛАВСЬКУ

Традиційно наприкінці зими спеціалісти з неруйнівного контролю збираються у засніжених Карпатських горах у відомому гірськолижному центрі Славське Львівської області. Цього року чергова Міжнародна науково-технічна конференція «ЛЕОТЕСТ-2011: Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів» проходила 21 – 25 лютого.

Організаторами цієї щорічної конференції виступили: Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики (УТ НКТД), Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України (ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ), м. Львів; Івано-Франківський національний університет нафти і газу (ІФНТУНГ) і Центр «Леотест-Медіум», м. Львів (організаційне бюро конференції).

Відкрив конференцію голова Оргкомітету, член Правління і голова Західного відділення УТ НКТД, директор центру «Леотест-Медіум» Учанін В. М.

Жвавий інтерес та цікаву дискусію викликали доповіді багатьох учасників конференції.

Як і щороку, найбільшу кількість доповідей винесли на суд колег науковці ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України.

Цікаві доповіді зробили науковці ряду провідних установ та підприємств України:

ОАО «НИИК», г. Дзержинськ; ОАО «Насосенергомаш», м. Суми; Ультракон-Сервіс», м. Київ; ДП «АНТОНОВ», м. Київ; «ДМКД», «ДДАП-РАКС», ПКТЬ ЦВ Укрзалізниці, м. Дніпродзержинськ;

Багато цікавих доповідей представили науковці різних університетів України: Севастопольського національного університету ядерної енергії і промисловості; НТУУ «КПІ», м. Київ; НТУ «Харьковский политехнический институт», Харьковского професійного коледжу; Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу та ін.

Конференція пройшла в діловій та доброзичливій атмосфері. Її учасники мали досить часу для плідних дискусій та відпочинку. Проживали учасники конференції в пансіонаті «Бойківщина», який розташований на околиці містечка Славське в оточенні багаторічних сосен, ялин та смерек, поблизу гірськолижних трас. Частина дня учасники конференції мали змогу присвятити відпочинку на гірських лижах на схилах гір Тростяні, Кремінь, Погар та Високий Верх (див. сайт www.trostian.com). Крім того, шанувальники активного зимового відпочинку відвідали новий гірськолижний центр «Плай» біля с. Плав'є на автотрасі Львів – Чоп.

Організатори конференції чекають на Вас і в наступному році.

Ю. М. Посипайко, ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯ ДЕФОРМАЦІЇ ПЛОСКОЇ ПОВЕРХНІ ЗРАЗКІВ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ КОРЕЛЯЦІЇ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ. (СТАТИЧНЕ НАВАНТАЖЕННЯ)

В. Б. БЕРЕЗІН, М. Г. ЧАУСОВ (Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України)

Аналізуються показники точності розробленого програмного комплексу для експериментального визначення поля деформації за допомогою методу кореляції цифрових зображень. Для підвищення точності роботи запропоновано використання зміни контрасту зображення в методі кореляції цифрових зображень. Продемонстровано роботу комплексу на реальних зразках при статичному навантаженні.

Characteristics of accuracy of the developed program package for experimental determination of deformation field are analyzed using the method of digital image correlation. To improve operation accuracy, it is proposed to apply the change of image contrast in the method of digital image correlation. Complex operation is demonstrated on real samples at static loading.

Сучасне машинобудування неможливе без використання деталей складної геометричної форми, нових конструкційних матеріалів з заданими фізико-механічними властивостями. Проте температурні градієнти, дефекти у зварних швах та концентрація напружень часто призводять до руйнування об'єкту. Щоб цьому запобігти, доводиться збільшувати коефіцієнт запасу міцності, що призводить до зниження економічних показників конструкції.

У зв'язку з цим актуальним є вдосконалення відомих та розробка нових сучасних методів та способів контролю напружено-деформованого стану машин та конструкцій.

Зокрема методи вимірювання поля деформації дозволяють отримати важливу інформацію як про механічну поведінку матеріалів, так і про стан деталей і конструкцій. На даний момент існує ряд експериментальних методів для вимірювання поля деформації: фотопружність, муар-інтерферометрія, оптична голографія, електронна спекл-інтерферометрія, метод кореляції цифрових зображень та ін. [1].

З цього ряду можна виділити метод кореляції цифрових зображень (КЦЗ) як дешевий, простий та точний інструмент для експериментального дослідження поля деформації як в лабораторних, так і в польових умовах. Робочий діапазон методу по деформаціям становить 0...1000 %. Типова точність визначення локальної деформації методом КЦЗ становить до 0,01 % абсолютної похибки [2]. Також він дає можливість досліджувати швидкоплинні процеси деформування за допомогою високошвидкісних цифрових камер [3]. З деякими апаратними модифікаціями метод КЦЗ дозволяє вимірювати поле деформації на криволінійних поверхнях та розподілення деформації у об'ємі матеріалу [1].

Для технічної реалізації цього методу на кафедрі механіки, опору матеріалів та будівництва Національного університету біоресурсів і природокористування України було розроблено експериментально-вимірювальний комплекс для проведення обробки цифрових зображень [4].

Метод КЦЗ складається з трьох етапів:

- підготовки досліджуваної поверхні — нанесення стохастичної текстури (літографія, розпилення фарби чи тонеру або інші методи);
- запису процесу деформування (рис. 1), який полягає в отриманні послідовності фотографій (чи відеозапису) досліджуваної поверхні;
- аналізу отриманих зображень поверхні.

Суть методу КЦЗ полягає в аналізі зображень поверхні. Очевидно, що при деформації матеріалу деформується і нанесена на нього текстура. При цьому поле деформації текстури відповідає дійсному полю деформації матеріалу. Це і є основною ідеєю методу.



Рис. 1. Апаратна частина для реєстрації поля деформації: 1 — цифрова камера; 2 — джерело світла; 3 — зразок з нанесеною стохастичною текстурою; 4 — динамометр



Розглянемо два зображення деякої ділянки поверхні з текстурою до і після її деформації (рис. 2).

Основна задача методу КЦЗ полягає у встановленні відповідності між точками цих двох зображень. Розглянемо два масиви чисел, що відповідають базовому зображенню поверхні та зображенню цієї поверхні після твердотільного переміщення на ціле число пікселів (рис. 3).

З рис. 3 видно, що положення точки у зміщеному зображенні можна однозначно встановити, відслідковуючи переміщення деякої області (елемента), до якої належить ця точка.

Проте ця область може бути зміщена на нецілозначельні значення переміщення, або бути деформованою. Для врахування цих аспектів вводиться поняття функції переміщень для області, а для визначення інтенсивності в точці використовують бікубічну чи базисну сплайн-інтерполяцію (наприклад, чотирьохточкову) [1]. Функція переміщень задає відповідність між точками базового і деформованого зображень, в даному програмному комплексі вона має вигляд функції переміщення для чотирьохточкового ізопараметричного елемента [5]:

$$\begin{aligned} x^* &= \frac{1}{4}X_0(1-r)(1-s) + \frac{1}{4}X_1(1+r)(1-s) + \\ &+ \frac{1}{4}X_2(1+r)(1+s) + \frac{1}{4}X_3(1-r)(1+s) = \\ &= \frac{1}{4}(X_0h_0 + X_1h_1 + X_2h_2 + X_3h_3), \\ y^* &= \frac{1}{4}Y_0(1-r)(1-s) + \frac{1}{4}Y_1(1+r)(1-s) + \\ &+ \frac{1}{4}Y_2(1+r)(1+s) + \frac{1}{4}Y_3(1-r)(1+s) = \\ &= \frac{1}{4}(Y_0h_0 + Y_1h_1 + Y_2h_2 + Y_3h_3), \end{aligned}$$

де r, s — локальні координати елемента; X_i, Y_i — координати відповідних вершин деформованого елемента (або параметри без геометричного змісту для елементів непрямокутної форми).

Для визначення координат вершин деформованого елемента використовують оптимізацію міри відповідності заданої для множини точок базового зображення (незмінна в процесі оптимізації) та множини точок, що визначається параметрами функції переміщень (змінюється в процесі оптимізації). При цьому, як правило, використовують одну із цих двох форм міри відповідності [1]:

1) квадратичне відхилення (мінімізується):

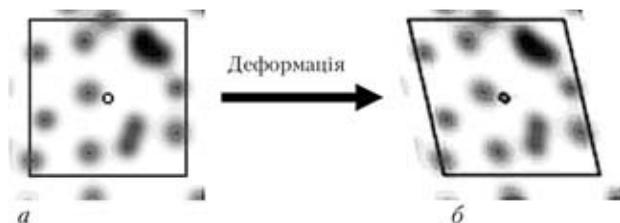


Рис. 2. Зображення поверхні відповідно до деформації (базове) (а) та після (деформоване) (б)

$$\sum \sum (A(x, y) - B(x^*, y^*))^2;$$

2) крос-кореляція (максимізується):

$$\frac{\sum \sum A(x, y) B(x^*, y^*)}{\sum \sum A(x, y) \sum \sum B(x^*, y^*)} \quad (1)$$

В даному комплексі використовується така форма міри відповідності [1]:

$$Q = \sum \sum (A(x, y) - C B(x^*, y^*) - D)^2, \quad (2)$$

де C — коефіцієнт, що враховує зміни в контрасті поверхні; D — коефіцієнт, що враховує лінійний зсув в освітленні; x, y — координати точки в базовому зображенні; x^*, y^* — координати точки в деформованому зображенні; A, B — інтенсивності базового і деформованого зображень відповідно.

Під знаками суми у виразі (2) слід розуміти, що обчислення проводяться для кожного пікселя елемента у базовому і для відповідного йому пікселя у деформованому зображеннях. При цьому масив пікселів, що утворюють елемент, може мати довільну форму.

Новим у формулі (2) є те, що коефіцієнт C в даному комплексі являє собою величину, що враховує не тільки освітленість, але й вплив деформації. При цьому модифікована формула (2) застосовується на ділянках з низьким значенням модуля градієнта інтенсивності (менше 30 % середнього значення по базовій ділянці), що продиктовано низьким значенням амплітудної похибки інтерпольованого значення інтенсивності.

Значення коефіцієнта C обчислюється таким чином:

$$C = C_0 + k\varepsilon_x\varepsilon_y,$$

де C_0 — зміна в контрасті зображення внаслідок освітлення; k — коефіцієнт чутливості контрасту зображення до деформації; $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ — деформації в даній точці згідно поточних параметрів функції переміщень.

Використання такої модифікації формули (2) дозволило зменшити похибку визначення деформації на 5...20 % при аналізі синтетично згенерованих зображень поверхні [4].

Наступним етапом роботи комплексу є оптимізація міри відповідності, що проводиться у два етапи:

– грубий пошук положення елемента у базовому зображенні (пошук області, зміщеної на ціле число пікселів відносно базової, що мінімізує міру відповідності в деякому околі);

– оптимізація міри відповідності методом Левенберга–Маквардта. На цьому етапі визначаються оптимізовані значення параметрів, що входять до міри відповідності, а отже, і координати вершин деформованого елемента.

Останнім етапом роботи комплексу є збирання елементів у сітку, тобто встановлюється

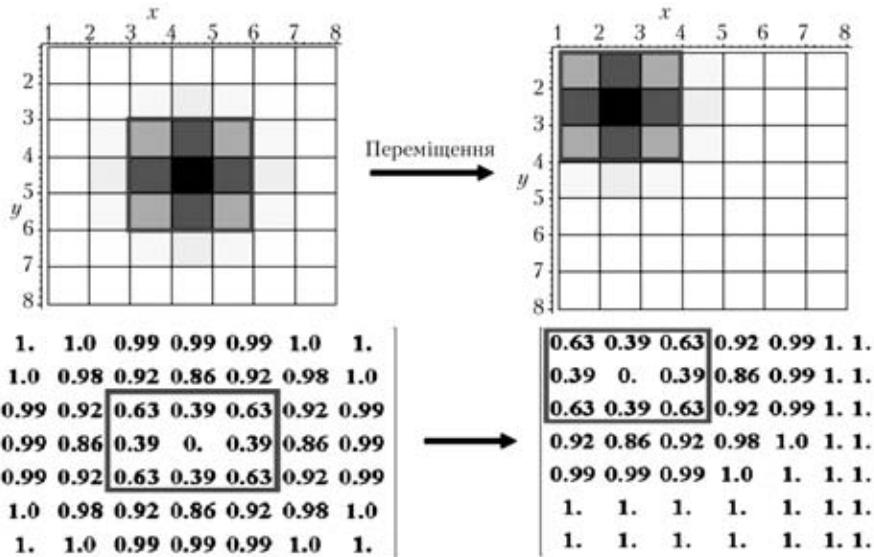


Рис. 3. Вплив твердотільного переміщення на цифрове зображення

відповідність між точками елемента та координатами вершин сітки. Це проводиться з метою утворення неперервного поля переміщень. Утворення сітки елементів наведено на рис. 4.

Створення такої сітки аналогічне утворенню глобальної матриці жорсткості у методі скінчених елементів і часто використовується у КЦЗ [5]. При цьому проводиться додаткова оптимізація міри відповідності з точки зору утворення елементами сітки. Проте в даному комплексі використовується не повна матриця жорсткості, а лише її головна діагональ з метою підвищення швидкості роботи. Детальніше про алгоритм роботи комплексу можна дізнатись з роботи [4].

Наприкінці проводиться згладжування отриманого поля переміщень на основі сітки методом плаваючих найменших квадратів [6]. Значення деформації у точці визначається диференціюванням згладженого поля переміщень.

Для оцінки точності роботи комплексу було проведено ряд тестів на синтетичних зображеннях, перевагою яких є абсолютно точне завдання дійсного поля переміщення. На синтетичне зображення було нанесено поля переміщень, що відповідають розтягу, стиску, чистому зсуву, трьохпорному

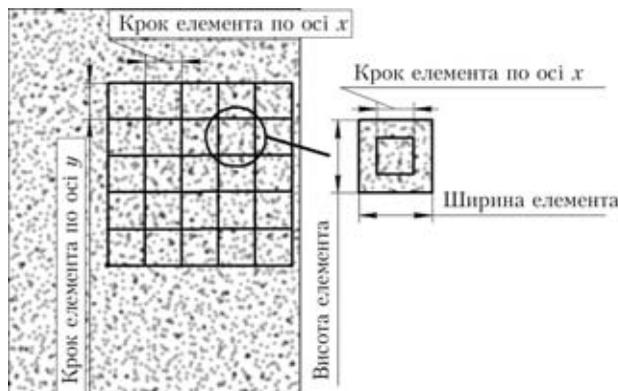


Рис. 4. Утворення сітки елементів для визначення поля переміщень

згину та їхній комбінації. Після визначення поля переміщень програмним комплексом на цих зображеннях обчислювалась похибка визначення деформації за максимальною різницею між локальною деформацією, отриманою методом кореляції цифрових зображень (без врахування зміни контрасту при деформуванні), та дійсним значенням деформації на синтетичному зображенні.

На основі аналізу відповідних даних вираз для похибки визначення деформації із імовірністю в 95 % при фільтрації з розміром вікна 5x5 еле-

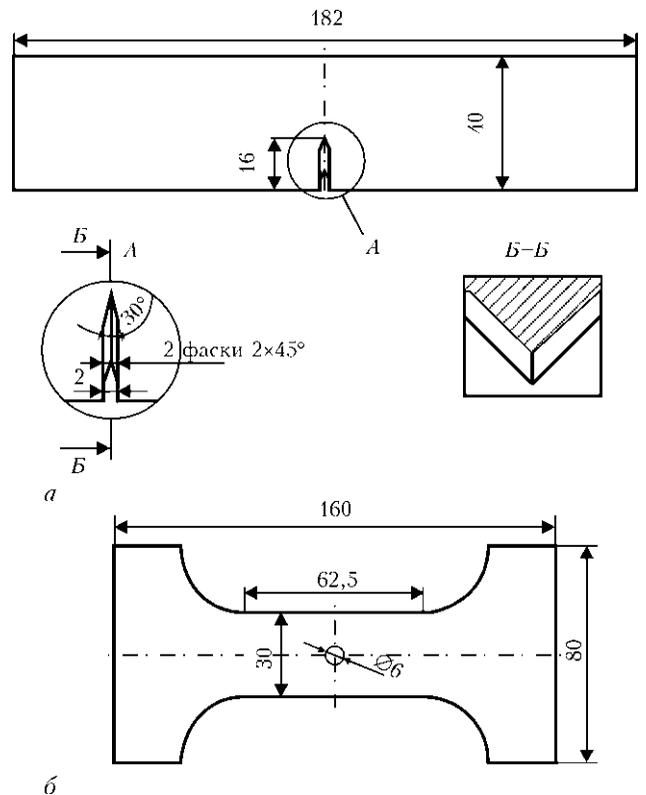


Рис. 5. Зразки для дослідження різних полів деформації: а — з реакторної сталі для трьохпорного згину; б — з авіаційної гуми з отвором для статичного розтягу



ментів базового поля та кроком сітки 10 пікс. методом плаваючих найменших квадратів можна подати у наступному вигляді:

$$\Delta \varepsilon = \frac{500 \text{ пікс } c}{k-1} + \frac{1}{2} \frac{0,003 \text{ пікс}^{-2}}{c^2} + 0,67 Q + 0,083 Q^2 + \frac{4,88 \cdot 10^5 + 8,77 \cdot 10^5 Q^{0,67}}{n^4 K}$$

де $\Delta \varepsilon$ — середнє значення максимального відхилення при визначенні деформації, взяте у відсотках; n — розмір сторони елемента, пікс.; k — умовний порядок фільтру інтерполяції (для базисних сплайнів ця величина відповідає його порядку); c — середнє значення похідної по відповідній координаті зображення, пікс⁻¹; Q — амплітудне значення білого шуму на зображенні, взяте у відсотках; K — коефіцієнт, що враховує вид інтерполяції (для базисних сплайнів $K = 1 \text{ пікс}^{-4}$).

Слід відмітити, що типовий крок сітки становить 5 пікс., а розмір поля фільтрації 7×7 — 20×20 елементів, що дозволяє досягати середнього зна-

чення максимальної похибки визначення деформації менше ніж 0,01 % для зображень розміром 1000×1000 пікс. З метою оцінки точності роботи на зображеннях реальних поверхонь було проведено відповідні експерименти на зразках (рис. 5). Поле переміщень визначалося за допомогою прямокутних елементів розміром 25×25 пікс. та кроком 15×15 пікс.

Відповідні результати випробувань зразка з реакторної сталі на трьохточковий згин подані на рис. 6.

Визначення поля деформації гумового зразка з отвором при розтягу подано на рис. 7. Вісь прикладання зусилля — x .

З отриманого на рис. 6 поля деформації для реакторної сталі можна зробити висновок про достатню чутливість даного комплексу до місць з концентрацією деформації (чи про просторову роздільну здатність) та про значний вплив розміру елементів текстури (середній розмір близько 10 пікс.). Тобто для отримання точності по деформації 0,01 % чи

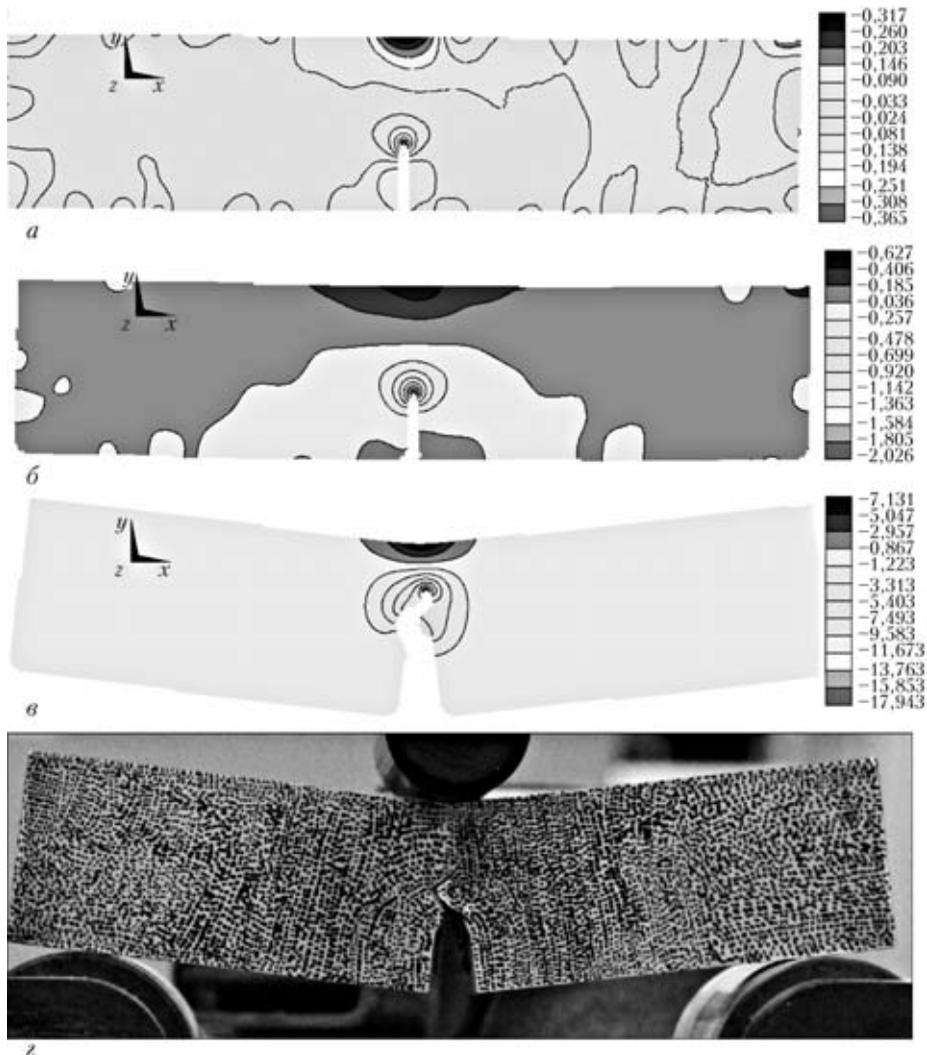


Рис. 6. Поле деформації ε_{xx} , %. Алгоритм автоматично видаляє елементи з коефіцієнтом крос-кореляції меншим за 80 % (за формулою (2)) для забезпечення достовірності результатів: а — $F = 0,8 \text{ кН}$; б — 3,8; в — 7,8; з — вигляд зразка з нанесеною текстурою при $F = 7,8 \text{ кН}$

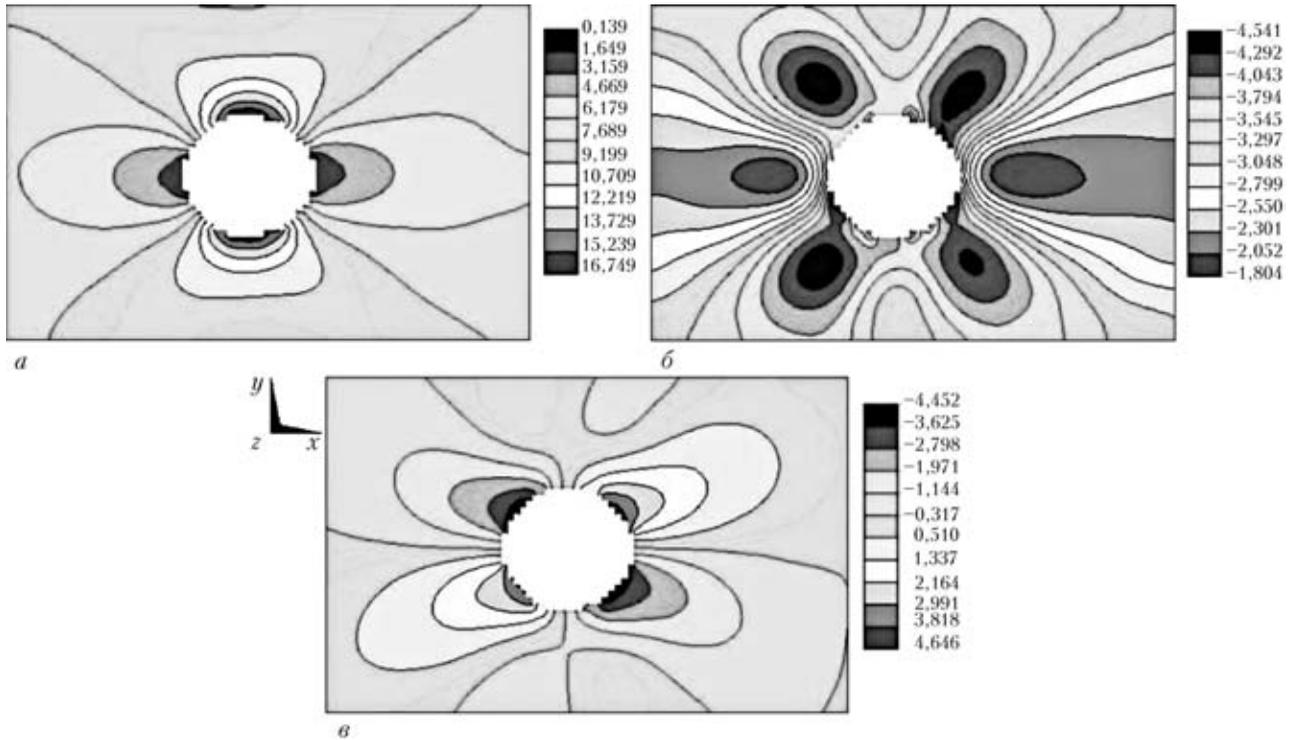


Рис. 7. Поля деформации для зразка з авіаційної гуми ($F = 0,5$ кН), %: $a - \epsilon_{xx}$; $b - \epsilon_{yy}$; $v - \epsilon_{xy}$

краще слід використовувати текстури з розміром елемента менш ніж 4 пікс., що підтверджується відповідними експериментами на синтетичних зображеннях.

В свою чергу, результати, отримані на авіаційній гумі (рис. 7), підтверджують роботоздатність комплексу при значних деформаціях.

З метою перевірки впливу зміни в контрасті на точність визначення деформацій на зображеннях поверхні гумового зразка було проведено такий експеримент: спочатку визначалось поле деформації без врахування змін в контрасті (БЗК) поверхні, використовуючи елемент розміром 28×28 пікс., а потім визначалось поле переміщення з врахуванням змін у контрасті (ВЗК) при розмірі елемента 28×28 пікс. Отримані результати порівнювались з отриманими БЗК при розмірі елемента 30×30 , тобто обчислювались відхилення значень деформації між ВЗК та БЗК з елементом 30×30 пікс. і між БЗК з елементом 28×28 пікс. та БЗК з елементом 30×30 пікс.

Результати з ВЗК мали на 12 % менше абсолютне максимальне відхилення та на 5 % менше середнє відхилення порівняно з БЗК. Це свідчить про доцільність використання інформації про зміну контрасту поверхні від деформування.

Для безпосередньої перевірки точності визначення деформації зразок з алюмінієвого сплаву Д16 (рис. 8, *a*) був статично розтягнутий з одночасною реєстрацією деформації екстензометром на базі 10 мм та оптичним комплексом (рис. 8, *б*). При цьому методом КЦЗ деформація визна-

чалась як середнє арифметичне локальної деформації у точках, зазначених на рис. 8, *a*.

З рис. 8, *б* видно деяку різницю у деформаціях, визначених різними методами, що можна пояснити відносно малим розміром елемента кореляції — 30×30 пікс. та рівнем шуму у 8 %. Також найбільше відхилення між деформаціями спостерігається у момент переходу від пружного до пластичного стану матеріалу. Це пояснюється тим, що екстензометр вимірює деформацію на базі 10 мм і відповідно менш чутливий до неоднорідностей, а експериментально-вимірювальний

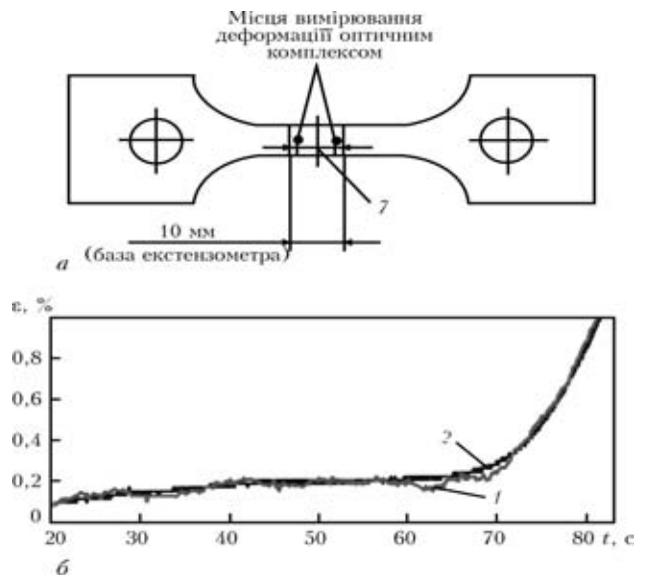


Рис. 8. Порівняння деформації, визначеної методом КЦЗ (1) та екстензометром (2): *a* — схема вимірювання деформації; *б* — розгортка деформації у часі



комплекс — усереднену локальну деформацію по двом точкам. При цьому максимальне відхилення між кривими 1 та 2 з рис. 8, б становить 0,03 %, а середнє відхилення — 0,006 %. Це можна вважати підтвердженням про точність комплексу до 0,01 % при визначенні деформації.

З зазначеного вище можна зробити висновок, що комплекс дозволяє отримувати надійні результати по розподілу деформації на плоскій поверхні для зображень, що відповідають реальним текстурованим поверхням, знятих при статичному розтягу.

Даний комплекс дозволяє досліджувати поле деформації і при динамічних процесах зміни деформації, оскільки як при достатньо високій швидкості кадрів та відповідному значенні експозиції, розмиттям зображень, отриманих при зйомці динамічних процесів, можна знехтувати.

Висновки

Розроблено експериментально-вимірний комплекс з можливістю визначення поля деформації на плоскій поверхні з амплітудою локальної похибки до 0,01 %.

На реальних зразках із реакторної сталі і авіаційної гуми та алюмінію продемонстровано роботу комплексу при квазістатичних умовах на-

вантаження. Відповідні результати підтверджують працездатність комплексу на реальних текстурованих поверхнях.

Інформацію про зміну контрасту внаслідок деформування доцільно використовувати при обробці зображень реальних поверхонь.

1. *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics* / Jr. Sharpe, N. William (Ed.). – 2008. — XXX. — 1098 p.
2. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements Basic Concepts, Theory and Applications* / Michael A. Sutton, J.-J. Orteu, Hubert W. Schreier. — 2009. — 332 p.
3. *Madhu S. Kirugulige, Hareesh V. Tippur, Thomas S. Denny. Measurement of transient deformations using digital image correlation method and high-speed photography: application to dynamic fracture.* — *Appl. Opt.* 46. — 2007. — P. 5083–5096.
4. *Березін В. Б., Чаусов М. Г., Лучко Й. Й.* Оптичний комплекс для безконтактного дослідження поля деформації плоскої поверхні методом кореляції цифрових зображень // *Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій: Зб. наук. пр.* — Львів: Каменяр, 2011. — Вип. 9. — С. 212–220.
5. *Besnard, G., Hild, F. & Roux, S.* «Finite-element» displacement fields analysis from digital images: Application to Portevin-Le Chatelier bands // *Exp. Mech.* — 2006. — 46. — P. 789–803.
6. *Lancaster P., Salkauskas K.* Surfaces generated by moving least squares methods // *Math. Comp.* — 1981. — 37, № 155. — P. 141–158.

Надійшла до редакції
21.03.2011

Новые книги

Скальський В. Р., Сулим Г. Т.

Основи акустичних методів неруйнівного контролю : навч. посіб. – Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2010. – 386 с.

Викладено теоретичні основи та розглянуто методологію неруйнівного контролю матеріалів, виробів і елементів конструкцій акустичними методами. Наведено класифікацію акустичних методів неруйнівного контролю, детальний аналіз виникнення та поширення пружних хвиль у твердих тілах; сформульовано засади ультразвукового неруйнівного контролю; описано фізичні основи та методи акустико-емісійного неруйнівного контролю зародження та розвитку руйнування у твердих тілах, розглянуто принципи дії технічних засобів, які дають змогу перетворювати пружні хвилі в електричні сигнали акустичної емісії.

Для студентів вищих навчальних закладів, наукових працівників та інженерів-дослідників, аспірантів і викладачів.

Троицкий В. А.

Вихретоковый контроль: учеб. пособ. – Киев, Феникс. – 2011. – 140 с.

Во втором квартале 2011 г. выйдет в свет книга В.А. Троицкого «Вихретоковый контроль». В ней рассмотрены теоретические и практические вопросы вихретокового контроля качества материалов и изделий. Для задач диагностики элементов энергетического, аэрокосмического и др. комплексов рассмотрены методики обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов. Используются материалы для подготовки дефектоскопистов согласно уставам российского (РОНКТД), украинского (УОНКТД) и американского (ASNT) обществ неразрушающего контроля по трем уровням квалификации в соответствии с требованиями ISO 9712, EN 473, SNT-TC-1A, ДСТУ EN 473.

Пособие может быть использовано учебными и аттестационными центрами разной ведомственной принадлежности.



ФАЗОВЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ СИГНАЛОВ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Е. Д. БЛИЗНЮК, В. С. ЕРЕМЕНКО, Ю. В. КУЦ, И. Н. БЫСТРАЯ, Е. В. МОНЧЕНКО (Нац. авиационный ун-т, г. Киев),
В. К. ЦАПЕНКО (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Предложен фазовый обнаружитель сигналов ультразвукового неразрушающего контроля, реализующий метод обработки, основанный на анализе круговых статистик фазовых характеристик сигналов. В обнаружителе предусмотрена возможность оценки достоверности выявления сигналов. Разработанное в среде MATLAB программное обеспечение, реализующее процесс обработки сигналов в обнаружителе, может быть использовано как отдельная программа, так и в составе средств ультразвуковой дефектоскопии.

Phase detector of signals of ultrasonic nondestructive testing is proposed, which realizes the processing method based on analysis of circular statistics of signal phase characteristics. The detector provides the possibility of evaluation of signal detection validity. Developed in MATLAB environment software realizing signal processing in the detector, can be used both independently, and as part of ultrasonic flaw detection means.

Обеспечение контроля качества новых конструкционных материалов и изготавливаемых из них изделий требует поиска новых и совершенствования известных методов неразрушающих испытаний, способов получения и обработки информационных сигналов. Это в полной мере относится и к исследованию композиционных материалов [1], которые в процессе производства и эксплуатации испытываются на наличие расслоений, трещин, непрочностей, участков нарушения адгезии и т. п. Одним из методов, которые применяются для решения данных задач, является метод ультразвукового неразрушающего контроля (УЗНК) [2].

Значительные затухания сигналов УЗНК при их распространении в композиционных материалах, необходимость определения дефектов малых размеров на стадиях зарождения и развития, а также влияние на информационные сигналы помех разнообразного характера, приводит к уменьшению уровня информационных сигналов и, соответственно, уменьшению соотношения сигнал/шум (С/Ш), что усложняет реализацию УЗНК.

Для обнаружения информационных сигналов и оценки их параметров при низком соотношении С/Ш используют различные подходы, включающие использование тестовых сигналов с разными видами модуляции и манипуляции, согласованной фильтрации информационных сигналов, корреляционных методов приема сигналов [3].

Волновой характер распространения УЗ колебаний при НК материалов и изделий [1] обуславливает возможность применения методов и средств фазометрии с целью повышения достоверности и надежности контроля. За счет использования статистических методов обработки результатов фазовых измерений в УЗ дефектоскопии можно обнаруживать сигналы, которые отражаются от де-

фектов малых размеров, значительно затухают, распространяясь в объектах контроля, и повысить чувствительность УЗ дефектоскопов. В работах [4,5] обоснована возможность и проведен теоретический анализ вероятности выявления сигналов УНК при отношении С/Ш, равному единице и меньше на основе анализа дисперсии разности фазовых характеристик анализируемых сигналов.

Целью данной статьи является разработка и анализ работы фазового обнаружителя сигналов УЗНК на основе использования метода статистической фазометрии [6], что позволит обнаруживать дефекты с малой отражающей способностью при соотношении С/Ш, близкому к единице и менее.

Постановка задачи. Анализируемый сигнал УЗНК представляется суммой информационной составляющей в виде радиоимпульса с гауссовой огибающей и аддитивного гауссового шума вида:

$$u_c(t) = U(t) \sin(2\pi f(t - \tau_c)) + \xi(t), \quad t \in [0, T_A], \quad (1)$$

где $U(t)$ — огибающая радиоимпульса с максимальным значением U_m ; f — частота несущего сигнала; t — время; T_A — длительность радиоимпульса ($T_A > f^{-1}$); τ_c — задержка радиосигнала относительно начального момента времени; $\xi(t)$ — реализация гауссового шума с дисперсией σ^2 и нулевым математическим ожиданием.

Сигнал (1) представлен выборкой значений $\{u[j], j = \overline{1, N}\}$ в дискретные моменты времени jT_d (T_d — период дискретизации), $N = \left[\frac{T_A}{T_d} \right]^+$ — объем выборки, $[]^+$ — обозначение целой части числа.

Необходимо предложить фазовый обнаружитель радиосигналов и оценить вероятность их вы-



явления при соотношении $C/\text{Ш} = U_m/\sigma$ близком к единице.

Решение поставленной задачи. Выявление радиоимпульса на фоне аддитивной помехи с целью оценки его временного положения выполняются на основе определения и анализа фазовой характеристики сигнала (1) [4, 5].

Дискретная фазовая характеристика сигнала (ФХС) определяется с помощью дискретного преобразования Гильберта анализируемого сигнала $\hat{u}[j] = \mathbf{H}(u[j])$, где \mathbf{H} — оператор дискретного преобразования Гильберта.

Дробная (определяемая однозначно в интервале $[0, 2\pi)$) часть дискретной ФХС вычисляется в соответствии с выражением:

$$\begin{aligned} \varphi[j] &= \Phi(\hat{u}[j], u[j]) = \\ &= \text{arctg} \frac{\hat{u}[j]}{u[j]} + \frac{\pi}{2} \{2 - \text{sign}(\hat{u}[j])(1 + \text{sign}(u[j]))\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\text{sign}(\cdot)$ — обозначение знаковой функции; Φ — оператор вычисления дробной части дискретной ФХС.

В интервале $[0, 2\pi)$ разница дискретных ФХС (2) и фазы гармонического сигнала с несущей частотой f определяется как:

$$\Delta\varphi[j] = (\varphi[j] - (2\pi f j T_d)) \pmod{2\pi}, j = 1, N. \quad (3)$$

Обозначим $a = (\varphi[j] - (2\pi f j T_d))$, тогда $a \pmod{2\pi}$ — операция вычисления остатка от деления числа a на 2π .

Из статистической фазометрии известно [6], что оценкой рассеивания значений $\Delta\varphi$ есть круговая выборочная дисперсия $V = 1 - r$ или однозначно связанная с ней выборочная длина суммарного вектора r . Признаком присутствия радиосигнала является превышение статистикой $r \in (0, 1]$ некоторого порога Π , что используется для выделения радиосигналов на фоне помех.

Структура фазового обнаружителя, реализующего данный принцип работы, приведена на рис. 1, где показаны блоки, реализующие операторы: \mathbf{H} — дискретного преобразования Гильберта; Φ — вычисления дробной части дискретной ФХС; Σ — вычитания; \mathbf{W} — оконной обработки;

\mathbf{R} — вычисления текущего значения статистики r ; $\Phi\Pi$ — формирования порогового значения Π .

Определение текущего значения статистики r выполняется после оконной обработки выборки $\{\Delta\varphi[j], j = 1, J\}$ окном прямоугольной формы с апертурой M_w . Окно обеспечивает отбор части значений $\Delta\varphi[j]$ в скользящем режиме на интервале времени кратном f^{-1} :

$$\begin{aligned} \Delta\varphi[k, M_w] &= \{ \Delta\varphi[k], k \in j - \frac{M_w - 1}{2}, j + \frac{M_w - 1}{2}, \\ & j \in \frac{M_w - 1}{2}, N - \frac{M_w - 1}{2} \}. \end{aligned} \quad (4)$$

Предполагается, что в этом выражении значение M_w нечетное, а $T = JT_d$.

Текущее значение выборочной длины суммарного вектора определяется как

$$r[j, M_w] = \sqrt{C^2[j, M_w] + S^2[j, M_w]}, \quad (5)$$

где

$$C[j, M_w] = \frac{1}{M_w} \sum_{k=j-0,5(M_w-1)}^{j+0,5(M_w-1)} \cos \Delta\varphi[k, M_w];$$

$$S[j, M_w] = \frac{1}{M_w} \sum_{k=j-0,5(M_w-1)}^{j+0,5(M_w-1)} \sin \Delta\varphi[k, M_w]. \quad (6)$$

Признаком наличия в анализируемой выборке радиосигнала является превышение статистикой r определенного порога $\Pi \in (0, 1)$. Выходной сигнал обнаружителя будет:

$$P[j, M_w] = \begin{cases} 1, & r[j, M_w] > \Pi, \\ 0, & r[j, M_w] \leq \Pi. \end{cases} \quad (7)$$

Значение порога Π выбирается с учетом заданных уровней ошибок обнаружения первого α и второго β рода и текущих параметров статистики r . В работе [5] показано, что как для гауссового шума, так и для его аддитивной смеси с гармоническим сигналом статистика r подчиняется бета-распределению [7] с плотностью вероятности:

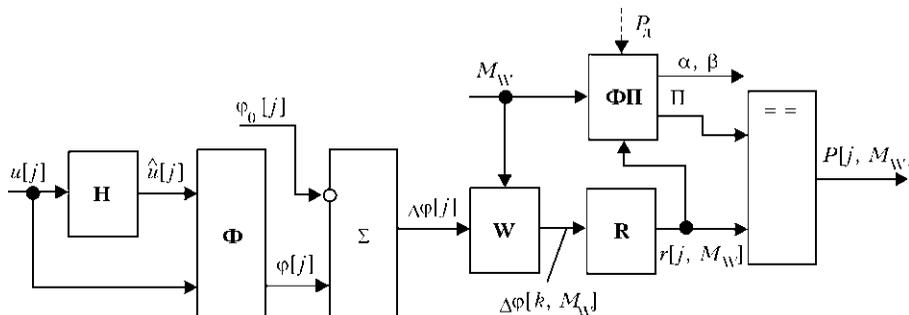


Рис. 1. Структура фазового обнаружителя



$$p(x) = \frac{1}{B(a,b)} x^{a-1} (1-x)^{b-1}, x \in [0,1], a \geq 1, b \geq 1, \quad (8)$$

где $B(a, b)$ — бета-функция; a, b — параметры распределения, связанные с математическим ожиданием M_r и дисперсией D_r статистики r выражениями:

$$\begin{aligned} a &= \frac{M_r^2 (1 - M_r)}{D_r} - M_r, \\ b &= a \frac{1 - M_r}{M_r}. \end{aligned} \quad (9)$$

Примеры графиков плотностей вероятности бета-распределения статистики $r - p(r/\Pi)$ и $p(r/C)$ соответственно для гауссового шума (Ш) и его аддитивной смеси (С) с гармоническим сигналом и указанными ошибками первого и второго рода приведены на рис. 2. Значения ошибок первого и второго рода определяются соответственно, интегральными выражениями:

$$\alpha = \int_0^{\Pi} p(r/C) dr, \quad \beta = \int_{\Pi}^1 p(r/\Pi) dr. \quad (10)$$

В приведенном на рис. 2 примере значение Π выбрано из условия равенства $p(r/\Pi) = p(r/C)$.

Блок ФП определяет текущие оценки математического ожидания и дисперсии статистики r в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} \hat{M}_r [j] &= \frac{1}{M_w} \sum_{k=j-0,5(M_w-1)}^{j+0,5(M_w-1)} r [k, M_w], \\ \hat{D}_r [j] &= \frac{1}{M_w - 1} \sum_{k=j-0,5(M_w-1)}^{j+0,5(M_w-1)} (r [k, M_w] - \hat{M}_r [j])^2, \end{aligned} \quad (11)$$

которые необходимы для расчета параметров распределения (9) и оценки текущих значений ошибок

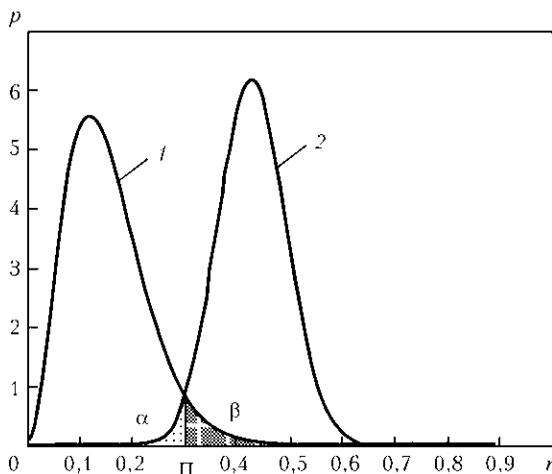


Рис. 2. Плотности вероятности $p(r/\Pi)$ (кривая 1) и $p(r/C)$ (кривая 2) статистики r соответственно для гауссового шума и его суммы с гармоническим сигналом

первого и второго рода (10), а также значения достоверности обнаружения сигнала и его сравнения с заданным граничным значением P_d . Достоверность обнаружения сигнала контролируется следующим образом. При заданном (или определенном в отсутствии сигнала в соответствии с формулами (8)–(11) значениями β определяется текущее значение $\alpha[j]$, что позволяет проверить неравенство $1 - \alpha[j] - \beta \geq P_d$. Выполнение этого неравенства свидетельствует об обнаружении сигнала с заданной достоверностью.

Проверка работоспособности разработанного обнаружителя сигналов УЗНК выполнялась с помощью моделирования в среде MATLAB.

Результаты моделирования. Моделирование процесса выявления радиосигнала было выполнено для следующих параметров сигнала: $U = 1$, $f = 5$ кГц, $N = 6000$, $T_d = 2$ мкс, $t_3 = 2$ мкс (10 мкс), $T_A = 12$ мс, $C/\Pi = 1$, $M_w = 100$.

Сформированная выборка анализируемого сигнала $\{u[j], j = 1, N\}$ с заданными параметрами, полученная оценка текущего значения статистики r и выходной сигнал обнаружителя представлены соответственно на рис. 3.

На рис. 3, а изображены графики сигнала (кривая 1) и его информационной составляющей (кривая 2), а на рис. 3, б — выходной сигнал обнаружителя, полученный в соответствии с (7) для $\Pi = 0,4$.

Рассчитанные по формулам (11) математическое ожидание и дисперсия статистики r на участках, где есть радиосигналы с гауссовой огибающей (рис. 3, б), составляют соответственно

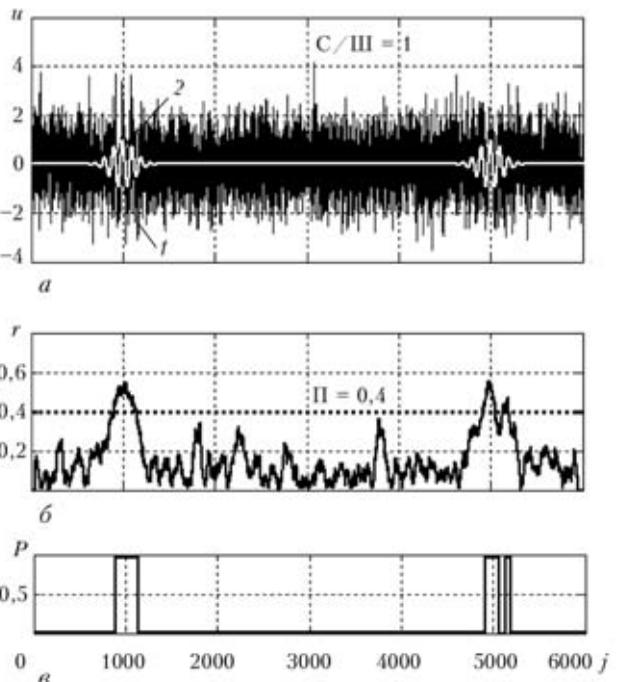


Рис. 3. Графики функций $u[j]$ (а), $r[j]$ (б) и $P[j]$ (в)

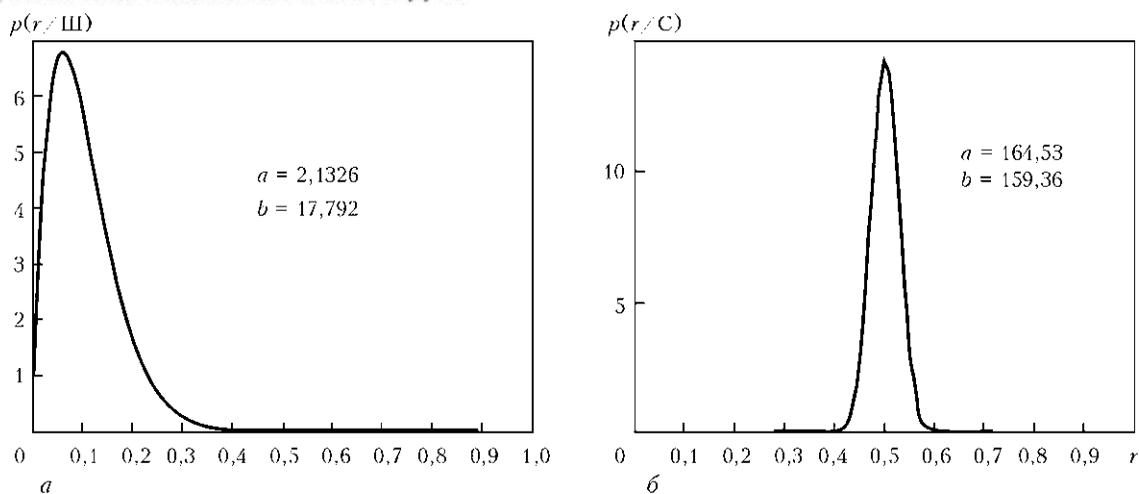


Рис. 4. Графики плотностей вероятности $p(r/Ш)$ (а) и $p(r/С)$ (б) для расчетных значений параметров бета-распределения

$M_{r,C} \approx 0,508$ и $D_{r,C} \approx 0,00077$, а на участках без радиосигналов $M_{r,Ш} \approx 0,107$ и $D_{r,Ш} \approx 0,00457$. Для этих значений рассчитанные параметры бета-распределения (9) составили: для участков без радиоимпульсов $a = 2,1326$ и $b = 17,792$; для участков с радиоимпульсами $a = 164,53$ и $b = 159,36$. Графики соответствующих плотностей вероятности приведены на рис. 4. Анализ этих графиков позволяет обоснованно выбрать значение порога $\Pi \in (0,3, 0,45)$ и выявлять радиосигналы на фоне значительных помех.

Последующее снижение соотношения С/Ш приводит к уменьшению $M_{r,C}$ и увеличению его среднеквадратичного отклонения, что усложняет процесс выявления радиосигналов. Увеличение апертуры окна M_W позволяет несколько уменьшить $M_{r,Ш}$ и $D_{r,Ш}$ и, соответственно, уменьшить значение порога Π при сохранении заданного уровня ошибок β , за счет чего сохранить заданную достоверность обнаружения сигналов.

Предложенный фазовый обнаружитель радиосигналов может быть использован в прецизионной аппаратуре УЗНК. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение, реализующие рассмотренный метод обработки информационных сигналов, может быть использовано как самостоятельно, так и в составе средств ультразвуковой дефектоскопии.

Выводы

Разработан и исследован фазовый обнаружитель радиосигналов с гармонической несущей, предназначенный для их выявления на фоне аддитивного гауссового шума. Его работа основана на оценке круговых статистик, полученных для фазовых характеристик сигналов УЗНК. Предложенный обнаружитель позволяет решать задачу выявления сигналов УЗНК при соотношении С/Ш, равном

единице и менее и одновременно контролировать достоверность этого процесса, что существенно для выявления незначительных по размеру дефектов на этапах их зарождения и развития.

Разработанное в среде MATLAB программное обеспечение, реализующее процесс обработки сигналов в фазовом обнаружителе, может быть использовано как отдельная программа, так и в составе средств УЗ дефектоскопии.

Фазовый обнаружитель пригоден для применения при бесконтактном вводе УЗ волн в объект контроля, а также для контроля материалов, которые характеризуются значительным затуханием, неоднородностью и анизотропией.

1. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довід. посіб. / Під ред. В. В. Панасюка. — Т.9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів і елементів конструкцій / О. П. Остап, В. М. Федірко, В. М. Учанін та ін. — Львів: Сполум, 2007. — 1068 с.*
2. *Цапенко В. К., Куц Ю. В. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник. — Київ: НТУУ «КПІ», 2010. — 448 с.*
3. *Сучасні методи та засоби ультразвукового контролю з використанням статистичної обробки сигналів / В. К. Качанов, О. В. Мозговий, О. І. Пітолін та ін. — Навч. посібник / За ред. В. П. Бабака. — Київ: ІСДО, 1994. — 132 с.*
4. *Пат. України на корисну модель № 35057. Спосіб ультразвукового вимірювання товщини виробів / Ю. В. Куц, В. С. Єременко, О. В. Монченко, І. М. Лапіга. — Опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16.*
5. *Анализ достоверности обнаружения сигналов ультразвукового неразрушающего контроля на основе использования метода статистической фазометрии / Е. Д. Близнюк, В. С. Єременко, Ю. В. Куц, І. Н. Лапіга // Мат. Семінадацій міжнарод. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». — Ялта, 2009. — С. 73–76.*
6. *Куц Ю. В., Щербак Л. М. Статистична фазометрія. — Тернопіль: Терноп. держ. техн. ун-т, 2009. — 383 с.*
7. *Хастингс Н., Пикок Дж. Справочник по статистическим распределениям. — М.: Статистика, 1980. — 95 с.*

Поступила в редакцию
26.01.2011

СТЕНД ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

О. Н. БУДАДИН, Ю. Г. КУТЮРИН, А. А. ФИЛИПЕНКО, Е. Е. МУХАНОВ

(Техн. ин-т энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО», Москва)

Разработан стенд автоматизированной ультразвуковой дефектоскопии сложнопрофильных изделий из полимерных материалов, решающий задачи автоматизации сбора и обработки многоканальной информации с целью обнаружения несплошностей на фоне структурных неоднородностей и помех.

A facility was developed for automated ultrasonic flaw detection in complex-contoured products from polymer materials, solving the tasks of automation of acquisition and processing of multichannel data, in order to detect discontinuities against the background of structural inhomogeneities and interference.

В условиях резко возрастающих требований к качеству выпускаемой продукции основное внимание уделяется обеспечению достоверного и высокопроизводительного контроля качества. Все более очевидным становится факт невозможности дальнейшего повышения качества продукции без соответствующего, а в ряде случаев, опережающего развития методов и средств неразрушающего контроля и диагностики*.

Перспективным направлением в современной технике является использование углеродных и полимерных композиционных материалов, имеющих широкие перспективы использования и ряд преимуществ перед традиционными материалами — металлами, особенно в авиакосмических отраслях техники. Однако такие материалы требуют особого подхода, новых решений при разработке и создании методов и средств их дефектоскопии. Это вызвано множеством видов таких материалов, специфическими особенностями конструкций из них и технологией изготовления, разбросом физико-механических и прочностных характеристик, разнообразием типов дефектов, возникающих в процессе изготовления и эксплуатации.

Учитывая, что указанными изделиями, начиная от изготовления и заканчивая применением, занимаются несколько специализированных предприятий, возникает еще одна не менее сложная и актуальная задача: обеспечить все заинтересованные предприятия идентичными по техническим и эксплуатационным характеристикам техническими, программными и методическими средствами дефектоскопии.

Решение указанных задач возможно только при условии резкого повышения информативности и достоверности результатов НК и диагностики на базе использования комплекса методов и средств НК. Повышение информативности результатов обуславливает переход к комплексному многоканальному НК контролю, обеспечивающему обнаружение и распознавание всех дефектов конструкции, влияющих на качество изделий и надежность их эксплуатации и, в конечном итоге, оценки определения степени их опасности для функционирования изделий.

Это приводит к необходимости решения новых классов задач НК:

– автоматизации сбора и обработки многоканальной информации для обнаружения несплошностей на фоне структурных неоднородностей и помех;

– обеспечение единства условий и методик проведения дефектоскопии на различных предприятиях.

Цель настоящей работы — обеспечение достоверного производительного НК сплошности изделий из углеродных и полимерных композиционных материалов путем универсальных, единых для различных предприятий технических, программных и методических средств, для исключения расхождений результатов дефектоскопии изделий на этих предприятиях путем их оснащения современными едиными серийными средствами и методиками автоматизированной дефектоскопии.

Для решения этой задачи создан стенд для автоматизированного УЗ НК сложнопрофильных изделий из полимерных материалов.

*Тепловой неразрушающий контроль изделий / О. Н. Будадин, А. И. Потапов, В. И. Колганов и др. — М.: Наука, 2002. — 476 с.

**Технические характеристики системы дефектоскопии**

Общие параметры системы:

Метод контроля	ультразвуковой теневой или зеркально-теневой
Акустические преобразователи	бесконтактные, $f = 40$ кГц
Дефектоскоп	УД2Н-ПМ либо другой с аналогичными характеристиками
Компьютер	стационарный либо переносной малогабаритный
Управление процессом контроля	с единого пульта управления
Обеспечение полной информации о текущем состоянии системы контроля и процесса контроля с автоматической сигнализацией о пришедшей либо потенциальной неисправности	имеется
Нарушение соосности датчиков в процессе сканирования, не более, мм	0,5
Скорость перемещения точки сканирования, мм/с	до 100
Плотность заполнения поверхности сканирования, %	100
Общая масса, не более, кг	120

Электропитание стенда:

напряжение, В	220 В
частота, Гц	50
Максимальная потребляемая мощность, Вт	250

Параметры контролируемых изделий:

Форма	цилиндр и конус с переменной толщиной стенки
Наличие неоднородных зон в пределах образующей изделия как по толщине, так и по характеристикам материала:	допускается
Диаметр, мм:	
большой (для конуса)	250...1500
малый	150...800
Толщина стенки, мм	(возможна переменная толщина в пределах одного изделия) 5...15
Материал	углепластик, органопластик, стеклопластик
Высота изделия, мм	до 1600
Выявляемые дефекты:	
Тип дефектов	нарушение сплошности, воздушные включения и расслоения
Минимальные размеры, мм	10×10
Минимальное раскрытие, мм	0,1
Селекция и объединение дефектов	имеется на стадии обработки информации

На рис. 1 показан стенд для автоматизированного УЗК сложнопрофильных изделий.

Дефектоскопия изделий осуществляется в три этапа.

1. Диагностика и тестирование технических и программных средств системы дефектоскопии.

Тестирование и настройка УЗ дефектоскопа. В качестве дефектоскопа используется прибор УД2Н-П. Дефектоскоп функционирует в режиме измерительного прибора, так как часть дефектоскопических функций, в частности, обнаружение дефектов (см. ниже) осуществляет специальное программное обеспечение.

На рис. 2 приведено окно тестирования и ввода параметров работы дефектоскопа.

Используя меню «Дефектоскоп», можно получить доступ к окну, в котором устанавливаются параметры работы программы с дефектоскопом — порт, к которому подключен прибор, скорость обмена с ним, частота посылок (скорость изменений амплитуды сигнала).

Нажав клавишу «Проверить», можно проверить работоспособность программы с дефектоскопом, при этом в нижней части окна будет выводиться сигнал с дефектоскопа.

Кроме параметров дефектоскопа здесь же устанавливается режим контроля, в зависимости от которого программа проводит идентификацию де-

фектных участков изделия. Для режима «Теневой, зеркально-теневой» дефектами признаются те участки, на которых амплитуда сигнала не превышает установленный порог дефектности, а для режима «Эхо-импульсный» — дефектными признаются участки с амплитудой, превышающей порог дефектности. При изменении режима контроля происходит изменение цветовой схемы дефектограммы.

Тестирование исправности механизированной части системы контроля. На рис. 3 приведено окно тестирования и ввода параметров механической части.

В качестве параметров механической части необходимо выбрать датчики положения, отвечающие за контроль оборотов изделия, начало и окончание линейной зоны контроля. Окно параметров механической части открывается из меню «Механика».

Тестирование программного обеспечения и установка параметров сбора информации при контроле изделий. Для начала контроля изделия (рис. 4) необходимо выбрать пункт меню «Контроль изделия» и указать тип изделия, диаметр, длину контролируемой части, номер изделия и ФИО оператора. Затем включить привод механической части и нажать клавишу «Приступить к контролю».

2. Проведение контроля — сбор информации по поверхности контролируемого изделия.

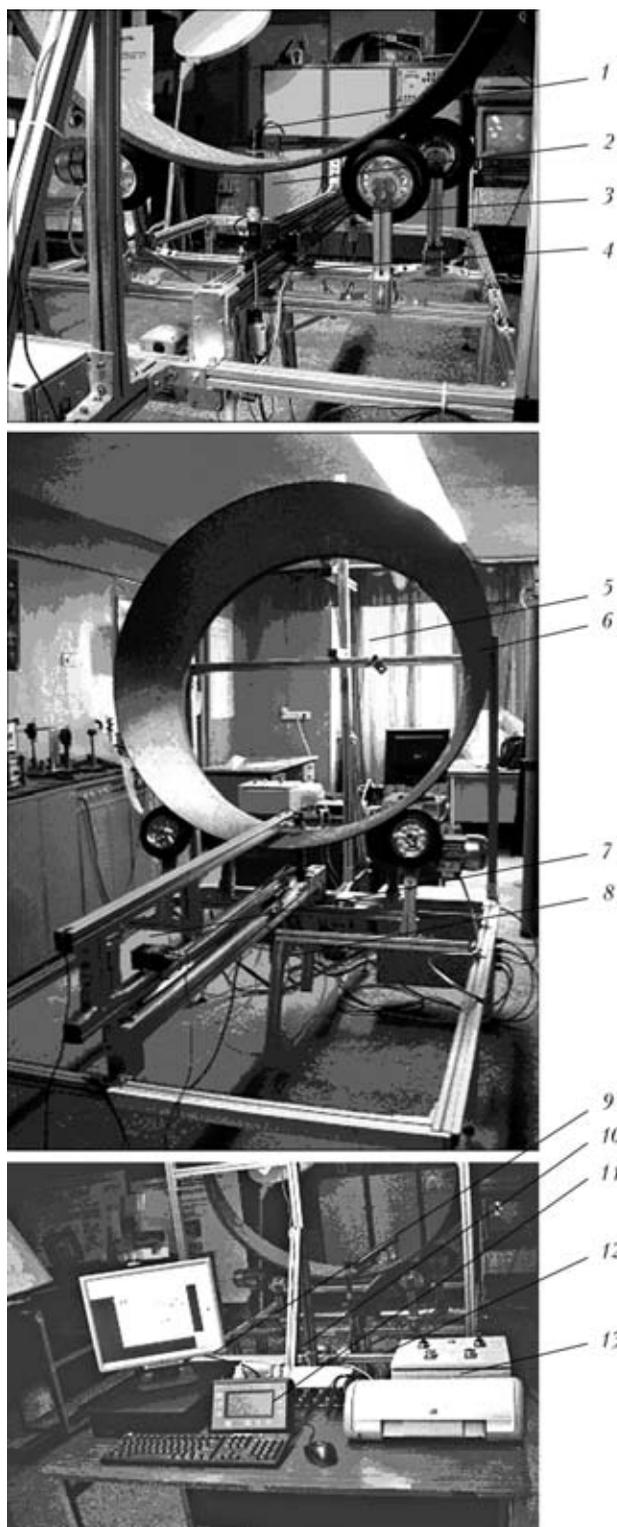


Рис. 1. Стенд для автоматизированного УЗ НК: 1, 2 — ультразвуковые преобразователи; 3, 4 — датчик соответственно начала и окончания контроля; 5 — датчик оборотов; 6 — контролируемое изделие; 7 — предварительный усилитель; 8 — механизированная сканирующая система; 9 — ЭВМ; 10 — блок ввода информации от датчиков положения изделия; 11 — УЗ дефектоскоп; 12 — пульт управления механизированной системой сканирования; 13 — принтер

После выполнения операции «Приступить к контролю» механизированная система осуществ-

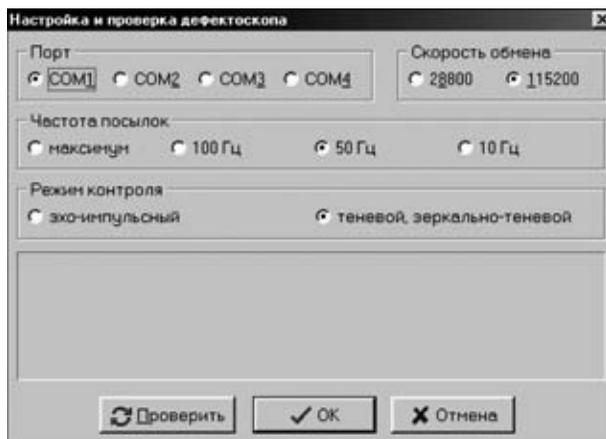


Рис. 2. Окно тестирования и ввода параметров работы дефектоскопа

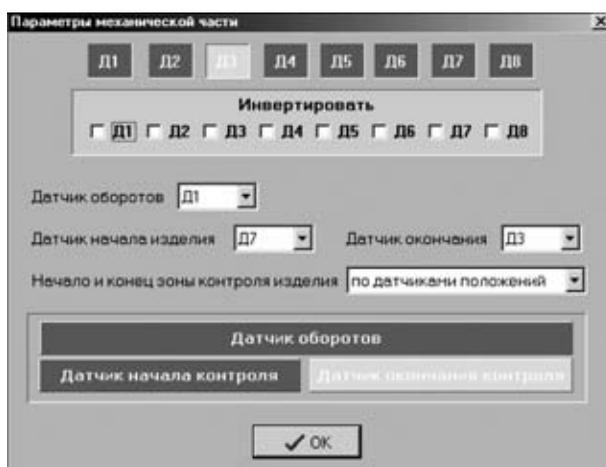


Рис. 3. Окно тестирования и ввода параметров механической части

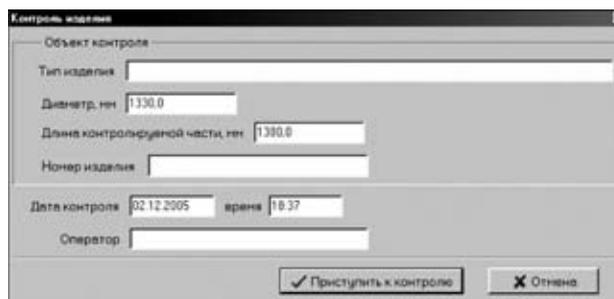


Рис. 4. Окно ввода параметров контролируемого изделия

вляет вращение контролируемого изделия одновременно с выполнением продольного движения ультразвуковых преобразователей, выполняя таким образом сканирование изделия по спирали. Дефектоскоп, находясь под управлением программы, выполняет измерения с заданной частотой повторений. Результатом каждого измерения служит максимальная амплитуда в зоне контроля, значение которой программа получает от дефектоскопа и сохраняет во внутренней памяти, формируя дефектограмму контроля изделия.

Для привязки к координатам изделия используется датчик оборотов для синхронизации начала



записи каждого кольца спирали, а также датчики начала и окончания контроля изделия для привязки по длине изделия. При отсутствии датчиков начала и окончания контроля оператор может вручную начинать и заканчивать запись по длине изделия.

На рис. 5 показано главное окно в режиме контроля изделия.

В процессе проведения контроля оператор может визуально контролировать процесс.

В ручном режиме оператор задает начало зоны контроля нажатием клавиши «F5» на клавиатуре ЭВМ, а ее окончание — клавишей «F8». При работе от датчиков положения начало зоны контроля определяется по первому срабатыванию датчика начала (после этого он может быть выключен), а окончание — по первому срабатыванию датчика окончания зоны контроля (если контроль уже начался).

Запись протокола начинается с момента первого срабатывания датчика оборотов, при начавшейся зоне контроля. В верхней части окна в режиме самописца выводится измеренная дефектоскопом амплитуда в зоне контроля, а остальное место занимает дефектограмма, которая формируется в процессе измерения и дает общее представление об изделии.

Для остановки записи дефектограммы оператор может нажать клавишу «F10», после чего указать реальную длину проконтролированного участка изделия.

После окончания контроля ЭВМ предлагает сохранить результат сканирования в файле для последующей обработки.

3. Обработка результатов контроля и формирование итоговых документов.

На рис. 6 приведено окно обработки результатов контроля, на рис. 7 — дефектограмма изделия.

На этом этапе осуществляется автоматизированный анализ матрицы ультразвукового сигнала

по поверхности изделия, с выделением единичных дефектов и подсчетом общей площади дефектов.

Анализ проводится в соответствии с установленным режимом контроля и выбранным уровнем дефектности. Точки с амплитудой сигнала, превышающей уровень при эхо-импульсном режиме и точки с амплитудой менее уровня при теновом режиме признаются дефектами.

Выбор порогового значения сигнала осуществляется посредством специальных алгоритмов по анализу матрицы ультразвукового сигнала.

Разработан метод и адаптивное математическое, программное, алгоритмическое и информационное обеспечение обнаружения внутренних нарушений на основе гистограммных методов непараметрической классификации, методов оптимальной фильтрации и т. д., включающие разработку признаков нарушений сплошности на основе экспериментальных статистических исследований. Разработан метод фильтрации выявленных дефектных областей (объединения, разделения, исключения и т. п.) на основе геометрических критериев*.

Разработанный метод является объективным, универсальным и единым для различных пользователей (различных предприятий).

Основными параметрами при анализе являются:

- пороговое значение сигнала;
- расстояние для объединения единичных дефектов — максимальное расстояние между двумя единичными дефектами (минимальный дискретный элемент дефектограммы), при котором оба дефекта объединяются в один;
- «не учитывать единичные дефекты менее» — максимальная площадь единичного локализованного дефекта, при которой он не рассматривается как существенный и информация о нем не выводится. Однако общая площадь таких неучтенных дефектов выводится в конце отчета о результате анализа.

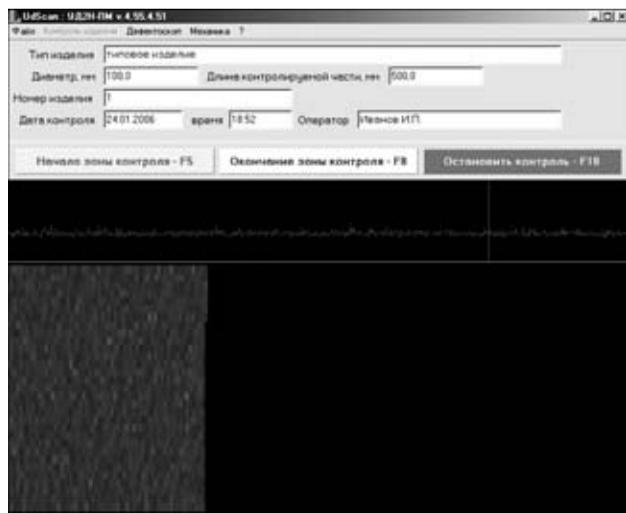


Рис. 5. Главное окно в режиме контроля

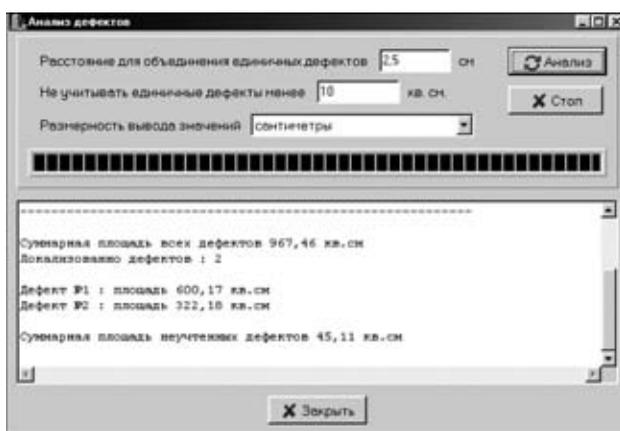


Рис. 6. Окно обработки результатов контроля

* См. сноску на с. 25

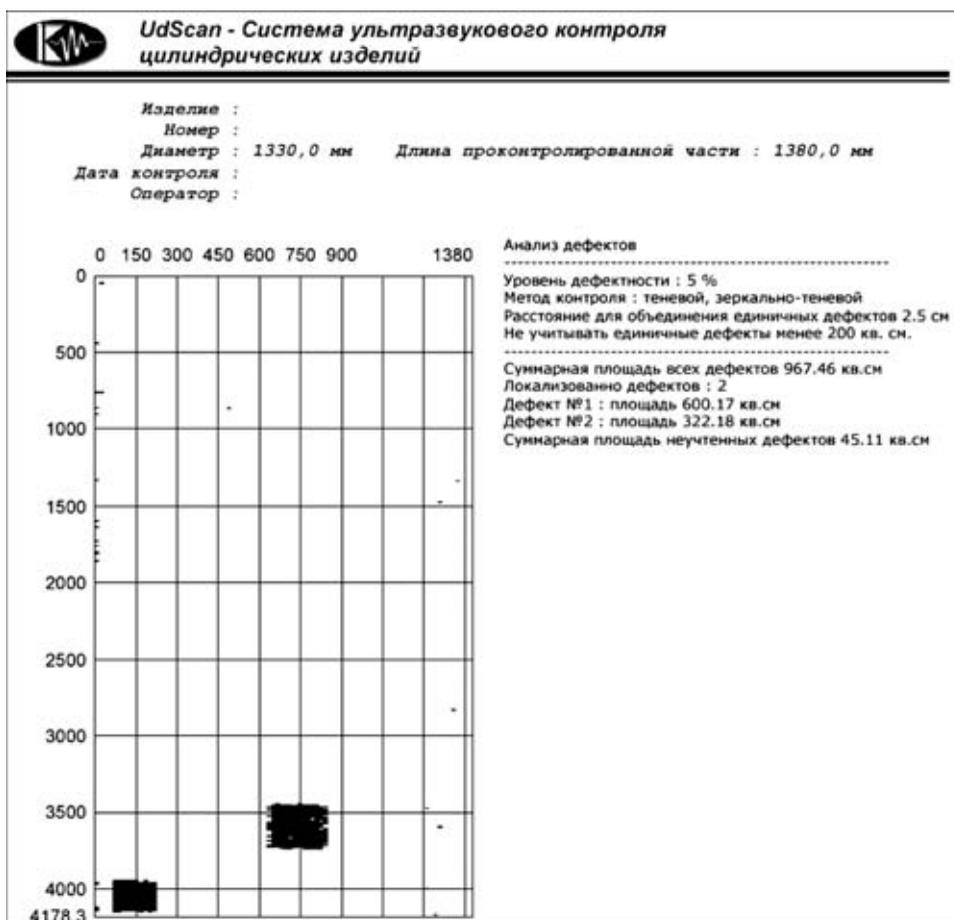


Рис. 7. Дефектограмма изделия

Выводы

Разработан стенд для автоматизированной ультразвуковой дефектоскопии сложнопрофильных изделий из полимерных материалов, а также адаптивное математическое, программное, алгоритмическое и информационное обеспечение обнаружения внутренних нарушений на основе гистог-

раммных методов непараметрической классификации, методов оптимальной фильтрации и т. д., включающие разработку признаков нарушений сплошности на основе экспериментальных статистических исследований. Представленные технические и методические средства являются объективными, универсальными и едиными для различных пользователей (различных предприятий).

Поступила в редакцию
23.04.2011

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.



СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НАБОРОВ ПРОНИЦАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАДАННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ДЛЯ КАПИЛЛЯРНЫХ КОНТРОЛЬНЫХ ТЕЧЕЙ

А. В. ШУЛЬЖЕНКО, Л. М. ПОГОРЕЛАЯ, П. А. МАНОРИК, В. Н. ГРЕБЕННИКОВ, Н. А. СИДОРОВА
(Ин-т физической химии им. Л. В. Писаржевского НАН Украины)

Предложены новый способ изготовления наборов проницаемых элементов заданной пропускной способности на основе цилиндрических кварцевых микрокапилляров, а также основные и вспомогательные средства, необходимые для реализации способа. Способ позволяет получать наборы одинаковых или же дискретно отличающихся по пропускной способности проницаемых элементов для контрольных течей.

A new method is proposed for manufacturing sets of permeable elements of a certain throughput capacity, based on cylindrical quartz microcapillaries, as well as the main and auxiliary means required for realization of this method. The method allows obtaining sets of the same or discretely differing as to throughput capacity permeable elements for control furnaces

Стеклянные микрокапилляры конической формы, упрочненные различного рода оболочками, широко используют в качестве проницаемых элементов капиллярных контрольных течей — устройств, воспроизводящих известные по величине и постоянные во времени потоки пробных газов, которые предназначены для градуировки и выбора оптимальных условий эксплуатации средств контроля герметичности [1–4].

К настоящему времени предложены методики изготовления таких микрокапилляров, основанные на вытяжке стеклянных трубок в процессе их локального разогрева [5]. Наиболее совершенные из них предполагают использование полуавтоматических устройств. Варьируя с помощью полуавтоматов параметры процесса (напряжение на спирали, начало и усилие разрыва стеклянных трубок) можно получать отдельные образцы конических микрокапилляров с диаметром выходного отверстия вплоть до 0,05 мкм. Однако из-за сложности строгой унификации внешнего диаметра и толщины стенок стеклянных трубок–заготовок, а также параметров процесса их вытяжки, воспроизвести даже с помощью таких устройств серию конических микрокапилляров с одинаковыми геометрическими параметрами и, следовательно, одной и той же пропускной способности для газа, весьма проблематично [6]. Это вынуждает подвергать каждый из полученных микрокапилляров кропотливой и малопроизводительной процедуре калибровки по величине потока пробного газа. Тем самым осложняется серийное производство необходимых по пропускной способности проницаемых элементов на основе стеклянных микрокапилляров конической формы.

Предпочтительным для производства серий идентичных проницаемых элементов представля-

ется использование длинномерных микрокапилляров цилиндрической формы, изготовленных из высокочистого кварца ($\text{SiO}_2 > 99,99\%$) по методике, описанной в работах [7, 8]. Разделив такой микрокапилляр на отрезки равной длины и определив пропускную способность лишь одного из отрезков капилляра, можно безоговорочно перенести полученные результаты на остальные такие же отрезки, предназначенные для изготовления проницаемых элементов. Однако ввиду малости диаметра цилиндрические кварцевые микрокапилляры весьма непрочны и легко ломаются. Разделить их на небольшие по длине отрезки и тем более манипулировать короткими отрезками микрокапилляра достаточно сложно. Поэтому в конструкциях проницаемых элементов такие микрокапилляры на сегодня практически не используют.

Предлагаемый в данной работе способ позволяет существенно упростить серийное изготовление проницаемых элементов нужной пропускной способности на основе цилиндрических кварцевых микрокапилляров. Суть способа состоит в том, что цилиндрический кварцевый микрокапилляр сначала дискретно по длине упрочняют пакетом вакуум-плотных оболочек, а после этого разделяют пакет оболочек и, соответственно, микрокапилляр на фрагменты, представляющие собой готовые проницаемые элементы по количеству оболочек в пакете [9].

Реализация предлагаемого способа предусматривает использование отрезка цилиндрического кварцевого микрокапилляра определенного внутреннего диаметра, простых по конструкции вспомогательных устройства и приспособления, набора металлических фасонных вакуум-плотных оболочек, тонких прокладок из эластичного материала и жидкой герметизирующей композиции, ко-

торая при определенных условиях способна отвердевать, а после отверждения становится вакуумплотным, непроницаемым для газов, полимерным материалом с высокой адгезией к металлу и стеклу и в то же время низкой адгезией к материалу прокладок.

На рис. 1 схематически изображены основные элементы, вспомогательные устройство и приспособление для реализации способа. Вспомогательное устройство выполнено в виде металлической трубки 1 с резьбовыми хвостовиками, на которые соответственно навинчиваются металлические накидные гайки 2 и 3 со сквозными осевыми отверстиями. Эти накидные гайки 2 и 3 фиксируют с возможностью перемещения технологические втулки 4 и 5. При этом технологическая втулка 4 за счет ступенчатого выступа, ориентированного внутрь трубки 1, жестко прижимается накидной гайкой 3 к одной из торцевых поверхностей трубки, а технологическая втулка 5 выполнена с возможностью перемещения по внутренней поверхности трубки 1 при навинчивании накидной гайки 2. В обеих втулках (4 и 5) выполнено по одному осевому ступенчатому отверстию таким образом, чтобы отверстия большего диаметра выходили наружу. Втулка 4 со стороны ее торца, ориентированного в полость трубки 1, дополнительно имеет радиальный паз 6, а втулка 5 дополнительно имеет одно радиальное отверстие 7, которое соединяется с осевым отверстием большего диаметра в этой втулке. Фасонные вакуум-плотные оболочки 9 выполнены в виде металлических шайб одинаковой толщины, в каждой из которых имеется осевое отверстие одинакового диаметра и радиальный паз 10 на одной из плоских поверхностей шайбы. Диаметр этих шайб выбран таким, чтобы они свободно, без перекоса, размещались в полости трубки 1.

Вспомогательное приспособление 12 выполнено в виде тонкой металлической трубки, служащей защитным кожухом для хрупкого микрокапилляра 8 в процессе изготовления проницаемых

элементов. Наружный диаметр этой трубки выбран таким, чтобы трубка свободно проходила сквозь осевые отверстия в шайбах-оболочках 9, внутренний диаметр — таким, чтобы в полости трубки свободно размещался микрокапилляр, а длина трубки — такой, чтобы несколько превышала длину вспомогательного устройства в собранном виде.

Используя вспомогательные устройство и приспособление наборы одинаковых по пропускной способности проницаемых элементов для контрольных течей капиллярного типа изготавливали следующим образом.

В полости трубки 1 размещали пакет шайб-оболочек 9 одинаковой толщины таким образом, чтобы каждая шайба-оболочка той стороной, где выполнен паз 10, через тонкую прокладку 11, изготовленную из эластичного материала, стыковалась с противоположной стороной другой шайбы-оболочки, а между крайними шайбами-оболочками в пакете и контактирующими с ними втулками 4 и 5 были такие же прокладки.

С помощью накидных гаек 2 и 3 пакет шайб-оболочек 9 с прокладками 11 сжимали в осевом направлении. При этом стыки между шайбами-оболочками 9, а также между крайними шайбами-оболочками и втулками 4 и 5, надежно герметизировались. После этого вспомогательное устройство с размещенным в его полости пакетом шайб-оболочек и прокладок между ними располагали горизонтально (рис. 2, а). Отрезок цилиндрического кварцевого капилляра длиной, несколько большей длины вспомогательного приспособления-трубки, размещали в полости этой трубки таким образом, чтобы капилляр не выступал за пределы ее рабочего торца и выходил за пределы трубки с другой стороны, как показано на рис. 1. Затем трубку с расположенным в ее полости отрезком капилляра 8 вводили сначала в осевое отверстие одной из втулок (4 или 5), а затем, последовательно прокалывая прокладки 11, перемещали трубку до тех пор, пока ее рабочий торец не выходил за пределы вспомогательного устройства с противоположной стороны. Выдвигали отрезок микрокапилляра 8 за пределы рабочего торца трубки 12 и, удерживая выдвинутый капилляр, обратным движением выводили трубку 12 из вспомогательного устройства. При этом материал прокладок несколько релаксировал и площадь отверстий, образовавшихся в результате прокола, уменьшалась.

Расположив вспомогательное устройство с шайбами-оболочками и капилляром горизонтально, начальный участок осевого отверстия во втулке 5 (рис. 2, б), начиная от ее торца и не далее радиального отверстия 7, герметизировали клеевой композицией 13 на эпоксидной основе. После отверждения композиции в радиальное отверстие

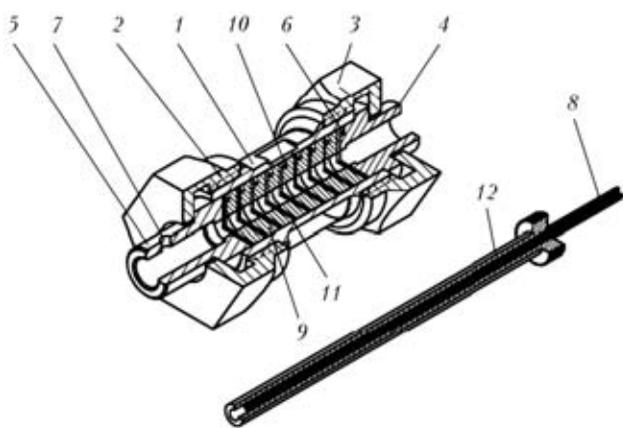


Рис. 1. Схематическое изображение основных и вспомогательных элементов для реализации способа изготовления наборов проницаемых элементов (обознач. см. в тексте)

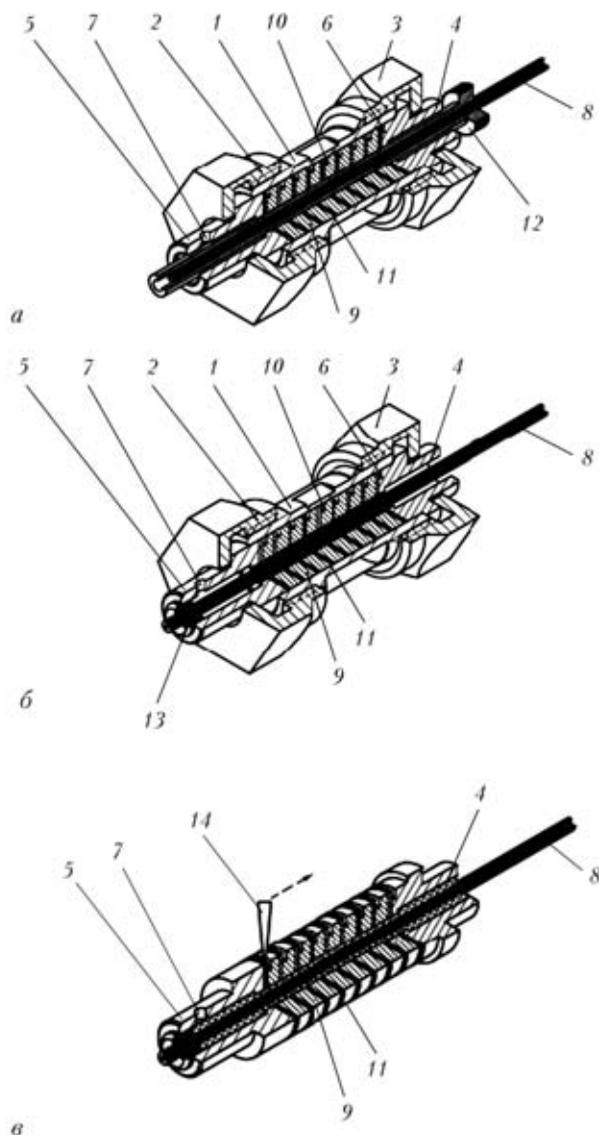


Рис. 2. Последовательные стадии изготовления наборов одинаковых по пропускной способности проницаемых элементов на основе цилиндрических кварцевых микрокапилляров (описание а–в см. в тексте)

тие 7 под небольшим избыточным давлением вводили ту же жидкую клеевую композицию на эпоксидной основе и заполняли ею пространство между стенками осевых отверстий в шайбах-оболочках 9, стенками осевых отверстий во втулках и внешней поверхностью микрокапилляра 8. Когда композиция появлялась на выходе из центрального отверстия в противоположной втулке 4, ее подачу прекращали. После отверждения композиции отвинчивали накидные гайки 2 и 3, осевым усилием со стороны втулки 5 выталкивали из полости трубки 1, как одно целое, втулки 4, 5 и пакет шайб-оболочек 9 с прокладками 11 между ними, а также закрепленный в осевом канале отрезок микрокапилляра 8 (рис. 2, в).

Для разделения пакета шайб-оболочек и отделения крайних шайб-оболочек от втулок использовали небольшой рычаг 14 в виде стержня, ге-

ометрические размеры концевой участка которого были выбраны такими, чтобы этот рычаг свободно входил в радиальные пазы 10 в шайбах-оболочках 9 и в паз 6 во втулке 4. Начиная с любой стороны, этот рычаг последовательно вводили в пазы, как показано на рис. 2, в, и осевым усилием, превышающим предел прочности капилляра и охватывающей его тонкой оболочки клеевой композиции на стыках шайб и стыках крайних шайб-оболочек с втулками, разделяли пакет на проницаемые элементы, не повреждая при этом поверхность шайб-оболочек в местах расположения микрокапилляров. В результате получали набор проницаемых элементов в виде одинаковых шайб с герметично закрепленными в них отрезками цилиндрических кварцевых микрокапилляров, длина которых практически полностью совпадала с толщиной шайб-оболочек.

Для использования полученных проницаемых элементов в составе контрольных течей применяли простое по конструкции промежуточное устройство в виде штуцера и накидной гайки. Во избежание повреждения плоских поверхностей проницаемого элемента при жестком креплении его в промежуточном устройстве проницаемый элемент фиксировали в устройстве через верхнее и нижнее уплотнительные кольца.

Кроме наборов проницаемых элементов, одинаковых по пропускной способности для газов, предлагаемым способом можно также изготавливать наборы проницаемых элементов, дискретно отличающихся по величинам потоков газов. Очевидно, что для этого следует взять набор шайб-оболочек одинакового внешнего диаметра, но разной, дискретно отличающейся, толщины.

Вспомогательное устройство, изображенное на рис. 1, может быть использовано для изготовления наборов проницаемых элементов многократно. В случае, когда проницаемые элементы в процессе эксплуатации в составе контрольных течей по тем или иным причинам оказывались закупоренными, использовали кондуктор, через который сверлением очищали осевые отверстия и, таким образом, готовили шайбы-оболочки к повторному использованию.

Используя описанный способ, нами были изготовлены различные наборы проницаемых элементов для капиллярных контрольных течей. Многократные измерения величины потока воздуха через проницаемый элемент пузырьковым методом под смоченной стеклянной пластинкой [10] свидетельствуют о том, что пропускная способность проницаемых элементов, взятых с одного и того же набора, практически одинакова в пределах ошибки метода калибровки ($\pm 12\%$). Полученные проницаемые элементы на основе цилиндрических кварцевых микрокапилляров оказались гораздо более стабильными во времени, чем



проницаемые элементы на основе стеклянных микрокапилляров. Это, по-видимому, обусловлено тем, что в случае кварцевых микрокапилляров практически полностью исключается влияние на их пропускную способность выщелачивания и растворения стенок, которое, как известно [11], тем более заметно, чем меньше внутренний диаметр капилляра.

Работа выполнена при финансовой поддержке НАН Украины (комплексная научно-техническая программа «Сенсорные системы для медико-экологических и промышленно-технических нужд»).

1. *Технология сборки и испытаний космических аппаратов* / Под общ. ред. И. Т. Белякова, И. А. Зернова. — М.: Машиностроение, 1990. — 352 с.
2. *Герметичність у ракетно-космічній техніці* / Ф. П. Санін, С. О. Джур, Л. Д. Кучма, В. А. Найденюв. — Дніпропетровськ: Вид-во ДДУ, 1995. — 168 с.
3. *Контрольные калиброванные течи* / Химические методы испытаний изделий на герметичность // А. В. Шульженко, Л. И. Бударин, К. С. Касаев, В. Н. Наумов. — Киев: Наук. думка, 1991. — 304 с.
4. *Ланис В. А., Левина Л. Е.* Техника вакуумных испытаний. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 263 с.
5. *Костюк П. Г.* Микроэлектродная техника. — Киев: Изд-во АН СССР, 1960. — 126 с.
6. *Бейкер Ф. Л., Йорк Д. Х.* Надежный способ изготовления стеклянных микроэлектродов с заданным сопротивлением // Тр. Ин-та инженеров по электротехнике и радиотехнике. — 1971. — 59, № 12. — 86 с.
7. *Соболев В. Д.* Приспособление для вытягивания кварцевых микрокапилляров // Вопросы физики формообразования. — Тула.: Тульск. политехнич. ин-т, 1970. — С. 140–148.
8. *А. с. 833588 СССР.* Способ изготовления кварцевых капилляров / В. Д. Соболев. — Б.И. № 20, 1981.
9. *Пат. України на корисну модель № 49498.* Спосіб виготовлення проникних елементів для контрольних теч / О. В. Шульженко, Л. М. Погоріла, П. А. Манорик и др. — Опубл. 26.04.2010. — Бюл. № 8.
10. *Запунный А. И., Фельдман Л. С., Роголь В. Ф.* Контроль герметичности конструкций. — Киев: Техніка, 1976. — 45 с.
11. *Прохоренко П. П., Мигун Н. П.* Введение в теорию капиллярного контроля / Под ред. А. С. Боровикова. — М.: Наука и техника, 1988. — 33 с.

Поступила в редакцию
24.12.2010



ОТКРЫТИЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВА КОМПАНИИ «МЕЛИТЭК» в УКРАИНЕ

14 апреля 2011 г. компании ООО «Мелитэк -Украина» и ООО «Мелитэк» (Россия), организовали семинар-презентацию на тему: «Новые решения для научно-исследовательских и промышленных лабораторий в области контроля качества материалов и изделий» в честь открытия официального представительства компании «Мелитэк» в Украине.

На семинаре была представлена инновационная политика компании «Мелитэк» в комплексном обеспечении научно-исследовательских лабораторий, состоялась презентация нового оборудования для анализа структуры и твердости материалов при проведении материалграфических исследований, а также представлены последние мировые разработки и методики в области исследований структуры и свойств материалов на наноуровне.

Участникам семинара, численность которых превысила сто человек, представлено новое оборудование ведущих мировых производителей: Struers A/S, Дания (пробоподготовка для микроскопических исследований); Olympus, Япония (микроскопы и цифровые системы); EMCO-TEST, Австрия (твердомеры); Walter+Bai AG, Швейцария (испытательное оборудование, копры, твердомеры); Nanovea, США (исследования в нанодиапазоне); SCALAR, Япония (оборудование для неразрушающего контроля); CLARAVISION, Франция (оборудование для диагностики сварных соединений).

Докладчики семинара: Анчевский И.Э. – генеральный директор ООО «Мелитэк» (Россия); Верцанова Е.В. – генеральный директор ООО «Мелитэк-Украина»; Астахов К.Н. – специалист отдела физико-механических испытаний, ООО «Мелитэк» (Россия); Джеспер Свенсон – представитель производителя компании Struers (Дания); Карстен Росендахл – представитель производителя компании Struers (Дания); Пушечникова Л.В. – руководитель лаборатории ИЦ «Пратт и Уитни-Патон»; Куренкова В.В. – руководитель отдела разработки и внедрения технологий ремонта газотурбинных двигателей, ИЦ «Пратт и Уитни-Патон».

Компания ООО «Мелитэк-Украина» планирует и в дальнейшем проводить практические семинары с использованием демонстрационного оборудования и приглашает к сотрудничеству научно-исследовательские и промышленные лаборатории.

Богданова В.С., ООО «Мелитэк-Украина»

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛОвого КОНТРОЛЯ: КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД

Е. В. АБРАМОВА (НПО «Ин-т термографии», Москва, РФ)

Изложены результаты комплексного подхода к задачам оптимизации диагностических систем теплового контроля, который включает технологию контроля, аппаратуру диагностики, обучение специалистов, проведение работ обслуживающим персоналом (дефектоскопистами), методики диагностики, направленные на повышение безопасности функционирования и энергоэффективности различных объектов промышленности, в том числе потенциально опасных технических устройств, зданий и сооружений, объектов электроэнергетики и ЖКХ.

Results of an integrated approach to problems of optimization of diagnostic systems of thermal control are set forth, covering: control technology, diagnostic equipment, specialist training, work performance by service personnel (flaw detection operators), diagnostic procedures aimed at increase of safety of functioning and energy effectiveness of various industrial facilities, including potentially hazardous technical devices, buildings and constructions, electrical engineering facilities and housing and communal services.

Повышение надежности и эффективности эксплуатации объектов различных отраслей промышленности в течение всего необходимого срока службы является важнейшей народнохозяйственной проблемой. Она решается только при комплексной диагностике объектов, несущих в себе потенциальную возможность создания аварийной ситуации с финансовыми и даже человеческими потерями. К проблеме технической надежности вплотную примыкают задачи обеспечения энергетической и экологической безопасности.

В настоящее время в России сложилась чрезвычайно опасная ситуация, вызванная тем, что значительная часть основных фондов в стране превысила допустимый ресурс эксплуатации. Данное обстоятельство подтверждает все возрастающее количество аварий и техногенных катастроф, ухудшение экологической ситуации, снижение производительности, эффективности, высокую энергоемкость оборудования и нерациональное использование энергетических ресурсов.

В электроэнергетике износ основных фондов самый высокий и приближается к 60 %, поэтому своевременная диагностика оборудования является жизненно необходимым фактором.

При этом нарушение правил эксплуатации электрооборудования в 2009 г. стало причиной каждого пятого пожара (19,4 %), а ущерб от них составил 33,3 % общего материального ущерба по стране.

Наиболее пожароопасными элементами электроустановок зданий являются электропроводки, на долю которых приходится примерно 40 % всех пожаров и возгораний, связанных с электрооборудованием и электроустройствами, что свидетельствует об актуальности их своевременной диагностики.

Одной из важнейших стратегических задач, поставленной Президентом РФ, перед страной является сокращение энергоемкости отечественной экономики на 40 % к 2020 г. Для ее реализации необходимо создание совершенной системы управления энергосбережением. Экономический эффект (в текущих ценах) составит в 2010–2020 гг. 9691 млрд. руб.

Это подтверждается законодательными актами, в том числе положениями «Энергетической стратегии России на период до 2020 г.», Федеральным законом Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ».

На сегодня энергоэффективность и энергосбережение входят в пять стратегических направлений приоритетного технологического развития, названных Президентом РФ Дмитрием Медведевым на заседании Комиссии по модернизации и технологическому развитию экономики России, которая состоялась 18 июня 2010 г.

Принятие Закона регламентирует проведение мероприятий по определению параметров энергоэффективности энергопотребляющих объектов. Это и производственное оборудование, промышленные сооружения, объекты электроэнергетики, жилищного сектора и т. п. Например, утепление стен жилых домов старого фонда до современных требований по сопротивлению теплопередаче позволяет снизить потери тепла через них на 60...70 %.

Одним из основных методов диагностики безопасности эксплуатации и оценки параметров энергоэффективности указанных объектов является тепловой контроль (ТК) [1]. Он позволяет выбрать оптимальные температурные нагрузки их функционирования, выявить и определить сте-

пень опасности дефектных узлов по признакам их перегрева по отношению к качественным зонам, определить утечки тепла через ограждающие конструкции зданий, оценить энергетические потери объектов и т. п.

Широкое применение ТК, несмотря на его перспективность и наличие современного парка программно-аппаратных средств, разнообразного как по техническим характеристикам, так и по стоимости, сдерживается в силу основных причин:

- в настоящее время акцент в исследованиях делается на аппаратуру контроля и методы первичной обработки информации и практически отсутствует анализ структуры материалов и изделий на основе данных неразрушающего контроля (НК);
- отсутствия комплексного подхода к внедрению ТК в различных отраслях народного хозяйства;
- отсутствия надежных, аттестованных технологий ТК для большинства объектов [2];
- использования персонала, не прошедшего специального обучения и сертификации.

Развитие метода требует комплексного подхода и включает следующие направления работ, связанные между собой конечной задачей (обеспечение безопасности: технической, энергетической, экологической), общей стратегией и удовлетворяющие принципу концептуального единства:

- глобальные задачи обеспечения безопасности функционирования различных объектов, используемых людьми в процессе своей жизнедеятельности;
- изучение объекта контроля и определение требований к нему;
- анализ возможных дефектов и определение степени их критичности;
- определение информационных параметров критичных дефектов по отношению к физическому полю;
- обоснование задач контроля, выбор метода или группы методов НК и диагностики;
- оптимизация параметров аппаратуры для обнаружения и идентификации дефектов;
- разработка методов обнаружения дефектов, определения их характеристик и оценки параметров качества контролируемого изделия;
- разработка технологий НК и диагностики: создание методик контроля, их отработка на образцах и реальных объектах и последующая аттестация с определением метрологических характеристик получаемых результатов на предмет установления соответствия заявленным в ней показателям их фактическим значениям;
- обучение персонала для проведения диагностики, определение уровня его квалификации и сертификация;
- предоставление полномочий для проведения НК и диагностики организациям (или их структурным подразделениям) путем их аккредитации в выбранной Системе оценки соответствия;

– проведение работ по НК и диагностике различных объектов в соответствии с разработанной методикой;

- оценка качества работы персонала НК с точки зрения обеспечения корректности измерений, достоверности результатов, обоснованности и полноты заключений по определению степени дефектности контролируемого объекта и оценке его технического состояния, выбор наиболее квалифицированного персонала для проведения диагностики;
- корректировка технологии контроля и диагностики по результатам работ лучшего специалиста;
- выдача заключения по техническому состоянию контролируемого объекта.

На этой базе строится прогнозирование ресурса и обеспечение безопасной эксплуатации (технической, энергетической, экологической) объектов различных отраслей промышленности, энергетики, строительства и транспорта.

Несмотря на все расширяющийся объем применения ТК проблемы повышения его качества ставятся все более остро. Это связано с большим разнообразием контролируемых объектов, появлением на рынке относительно дешевых приборов, не решающих проблемы проведения достоверного контроля многих крупногабаритных технических устройств, зданий и сооружений, сложных по конструкции и составу материалов, отсутствием в достаточном количестве методик контроля и квалифицированного персонала. В силу этих причин необходима оптимизация технологий ТК и программно-аппаратных средств под конкретные объекты, обучение и отбор персонала для его проведения с необходимой точностью, анализ и совершенствование навыков экспертов-дефектоскопистов, проводящих сам процесс контроля. Все это требует принципиально нового подхода к управлению и реализации оптимальных диагностических систем ТК.

Существующие технологии ТК имеют большой резерв с точки зрения повышения достоверности, информативности, расширения области применения, в том числе за счет применения математического моделирования, оперативного уточнения и адаптации режимов контроля, совершенствования параметров аппаратных средств применительно к решаемым задачам контроля, совершенствования процесса организации контроля и т.п.

Анализ современного состояния ТК позволил сформулировать задачи, решение которых позволит оптимизировать диагностические системы ТК с учетом свойств объектов, применяемых расчетных методов теплопередачи, используемой аппаратуры и наличием подготовленного персонала, так как любые совершенные модели и уникальные приборы «работают» только в руках квалифицированных специалистов.



Конечная цель любого метода НК — не просто выявить дефект, а оценить влияние этого дефекта на остаточный ресурс.

Опорной точкой при разработке технологии является информация о контролируемом объекте, его составе, геометрических размерах, теплофизических характеристиках, условий, в которых он находится, эксплуатационных нагрузках, возможных дефектах и повреждениях, параметрах, определяющих исправное, т. е. «качественное» состояние предмета диагностики.

Для анализа процессов, происходящих с контролируемым объектом, разработана комплексная математическая модель, позволяющая применять ее для конструкций, отличающихся различными свойствами. Она включает моделирование процесса ТК, расчет и выбор его режимов из условия минимизации погрешности результатов, анализ влияния человеческого фактора на конечные выводы, т. е. проведение оценки функционирования экспертов, проводящих контроль, и оптимизация их действий.

Указанная физико-математическая модель ТК разработана на основе обратного дискретного преобразования Фурье и реализует численное описание процесса формирования температурного поля в многослойной области с дефектами, описывающей широкий класс объектов с различными характеристиками. Разработанная модель обеспечивает повышение быстродействия теоретического анализа в 50...100 раз по сравнению с традиционными (например, с часто применяемым методом конечных разностей) и формирует погрешность расчетов не более 2...5 % [3].

В разработанной модели любой многослойный объект представляется в виде суперпозиции однородных и приграничных слоев. Далее определяется тензор тепловой восприимчивости исследуемого объекта. Рассчитанные значения тензора восприимчивости с помощью амплитуд Фурье-гармоник плотности теплового потока используются для определения его значений при прохождении через стенку контролируемого объекта на полной временной сетке. На конечном этапе решения прямой задачи теплопроводности из полного набора рассчитанных значений плотности теплового потока выбираются лишь те, которые рассчитаны на заданном временном интервале.

Для разработки метода тепловой дефектометрии использован функционал правдоподобия, зависящий только от теплофизических характеристик слоев и параметров дефектов:

$$D^{(in)}(\Theta_j) = S_1 - \frac{S_2^2(\Theta_j)}{S_3(\Theta_j)},$$

где $S_1...S_3$ — функции начальных температурных условий и характеристик слоев и дефектов.

На основе разработанной модели тепловой дефектометрии предложен новый метод определе-

ния точности решения обратной задачи от погрешности входных данных и начальных условий.

Исследованы методическая и приборная составляющие погрешности на искомый результат. Методическая ошибка задается методикой проведения вычислений с использованием подготовленных измерительных данных и появляется вследствие ограниченной точности численных методов. Приборная ошибка определения конечного результата зависит от класса точности используемых приборов. При проведении тепловой дефектометрии значительная часть измерений проводится контактными приборами с электронной памятью — самописцами измерения температур и тепловых потоков, которые в данном случае выступают в роли источников приборной ошибки. В описанном методе определения погрешности результата в состав приборной ошибки также включена составляющая, вызванная процедурами предварительной обработки входных данных, такими как усреднение температурных серий, проводимое перед вычислениями.

По результатам исследований методическая погрешность составляет 3...5 %. Она зависит от погрешности задания теплотехнических параметров исследуемой конструкции. Учет приборной составляющей, включающей искусственно введенную систематическую приборную погрешность δ , увеличивает погрешность вычисления сопротивления теплопередаче до 10...12 %, что вполне приемлемо для использования на практике.

На процессы теплопередачи в многослойных объектах существенное влияние оказывает наличие остаточной влаги в слоях конструкции, что может значительно увеличивать теплопроводность материалов, что особенно важно оценивать при знакопеременных температурных нагрузках, воздействующих на контролируемый объект.

Для анализа этих процессов разработана физико-математическая модель для исследования явлений тепло- и влагопереноса во время фазовых переходов жидкость — твердое тело в многослойных объектах, при этом задача о перемещении границы раздела фаз решена как задача Стефана. Применение модели позволяет проводить численный анализ положения плоскости промерзания путем применения конечно-разностной аппроксимации дифференциального уравнения теплопроводности и условий Стефана. Задача актуальна для проведения ТК объектов, находящихся в наружных условиях эксплуатации.

С целью проведения теоретического анализа процесса ТК разработан метод математического моделирования с использованием искусственных нейронных сетей с помощью разложения по собственным функциям задачи Штурма–Лиувилля, дополняющий существующие математические методы.

Основа нейронной сети заключается в том, чтобы изначально дать в качестве исходной информации наряду с входными данными еще и конечный ответ, а далее идет процесс изучения отношений между входными и выходными данными. Впоследствии обученная сеть используется для предсказания результатов других наборов входных данных, где ответ еще неизвестен.

Для целей дефектоскопии решены задачи определения внутренних несплошностей материалов и конструкций как на основе решения обратных задач, так и по результатам прямых измерений температурных историй и реализаций тепловых потоков.

Разработаны следующие методы оптимизации технических параметров диагностических систем ТК.

Метод оптимизации основных режимов проведения ТК, включающий метод обнаружения дефектов, определения характеристик дефектов, оценку пространственной и временной дискретности регистрации информации.

Метод оптимизации основных параметров аппаратуры ТК:

– параметров тепловизионной аппаратуры — оптимальное сочетание величин: поля обзора оптической системы тепловизионной аппаратуры, разрешающей способности по температуре, погрешности измерения температуры, геометрической разрешающей способности и поля обзора, частоты регистрации информации;

– параметров контактных преобразователей регистрации теплового потока и температуры для обеспечения корректного определения этих характеристик на основе анализа и коррекции возмущений температурного поля, вносимых преобразователем;

– времени и скорости прогрева стенки контролируемого объекта и параметров нагревателя (теплообменника) на основе решения краевой задачи нестационарной теплопроводности с использованием критериев Фурье и Био;

– способа регистрации и обработки теплового изображения объектов при взаимном перемещении средств контроля и исследуемой поверхности с высокой скоростью относительно друг друга.

Метод оптимизации процесса аттестации методик ТК, важнейшим этапом которого является разработка методик контроля, учитывающих все особенности контролируемых объектов, параметры аппаратуры, режимы контроля и др., которые позволяют получить искомый результат с погрешностями, определяемыми нормативными документами. Подтверждение точности получаемых величин осуществляется на этапе сертификации методики НК на основе их метрологической аттестации, включающей сопоставление характеристик реальных и эталонных дефектов, их площадей,

координат и определение погрешности результатов контроля в зависимости от случайных изменений входных данных как при наличии эталонных образцов, так и в их отсутствие.

Проведенные исследования и разработка соответствующих процедур позволяют оценивать достоверность методик ТК как при наличии, так и в отсутствие эталона.

На основании исследований, с целью обеспечения независимости экспертизы методических документов по НК (МД по НК), разработан «Протокол балльной оценки методического документа по НК», позволяющий объективно оценивать полноту изложения положений МД по НК.

Метод оптимизации режимов работы операторов-дефектоскопистов и технологий контроля на основе методов статистики и теории оптимального управления. Важным фактором технологии ТК, определяющим значительную часть погрешности результатов, является человеческий фактор.

Для оценки качества работы и квалификации специалистов-операторов ТК (как в период обучения, так и в производственном цикле контроля реальных объектов) на основе методов статистического анализа и оптимального управления с целью решения задачи дифференциации использования специалистов на предприятиях при обслуживании и обеспечении безопасной эксплуатации сложных технических систем обоснован и идентифицирован обобщенный критерий оценки качества управления процессом НК, позволяющий классифицировать способы управления по степени их «агрессивности» по отношению к нему в рамках решения вопросов безопасного оперативного управления и обеспечения качества готовой продукции. Это позволяет оценить квалификацию оператора и принять управляющие решения по повышению качества контроля.

По результатам проведенных исследований разработаны методики комплексного ТК, включающие определение оптимальных параметров аппаратуры контроля, обнаружение дефектов, оптимальное измерение входной информации (температурных полей и теплового потока), определение оптимальных режимов контроля и оценка и оптимизация функционирования экспертов-дефектоскопистов.

Реализация указанных принципов легла в основу разработки технологий ТК различных объектов. Ниже приведены примеры некоторых из них.

1. Контроль макро- и микродефектов сосудов под внутренним давлением. Применение ТК позволяет обнаружить негерметичность фланцевых соединений, дефектов намотки и т. п. Увеличивается достоверность выявления дефектов и безопасность обслуживающего персонала. На рис. 1 показана термограмма баллона из



полимерного материала с обнаруженными дефектами.

2. Оценка качества и энергоэффективности строительных конструкций для заполнения энергетического паспорта. Решается обратная задача нестационарной теплопроводности по измерительным и проектным данным, рассчитывают функционал правдоподобия и термическое сопротивление в этой зоне. Затем в соответствии с термограммами фасадов с учетом обнаруженных температурных аномалий определяют интегральную величину приведенного сопротивления теплопередаче $R_{пр}$. Технология используется при вводе зданий в эксплуатацию и заполнении «Энергетического паспорта здания». Разработан метод определения энергоэффективности строительных конструкций по результатам прямых измерений температурных полей и тепловых потоков. На рис. 2 показаны результаты ТК здания с определением теплозащитных характеристик слоя утеплителя на основе решения обратной задачи нестационарной теплопроводности.

3. Контроль технического состояния и безопасности эксплуатации электрооборудования на примере обнаружения дефектов и оценка безопасности функционирования электрических кабелей и электропроводки. Технология применяется при анализе технического состояния и безопасности эксплуатации электроустановок зданий, оборудования подстанций, объектов промышленности. Контроль электроустановок зданий социальной сферы г. Москвы (детских садов,

школ) показал, что в 40...45 % имеются дефектные элементы и узлы. На рис. 3 показаны результаты ТК электрических кабелей, расположенных в стене. Проведение контроля позволяет своевременно устранить дефекты, в том числе и аварийные с возможными человеческими жертвами.

4. Контроль технического состояния теплотехнических инженерных систем и оборудования. Инженерное оборудование, для которого применяют ТК (диагностика), объединено в четырех основных блоках:

дымовые, вентиляционные трубы и газоходы; теплофикационное оборудование (теплообменники, трубопроводы, отопительные приборы и др.); обмуровка и тепловая изоляция оборудования и трубопроводов;

электрооборудование (электродвигатели, защитная и коммутационная аппаратура, проводка, контактные соединения и др.).

Разработанная технология позволяет выбрать оптимальные характеристики и состав средств контроля, проводить оперативный мониторинг, корректно оценивать результаты. Методика контроля дымовых труб и газоходов позволяет определять дефектные зоны с погрешностью не более 15 %.

5. Контроль концентраторов напряжений и дефектов сложных конструкций в условиях реальной эксплуатации при циклическом воздействии. Технология используется для проведения предварительного контроля и выявления дефектных зон в конструкциях мостовых кранов (рис. 4).

Конечным итогом диагностики является оценка остаточного ресурса конструкции, т. е. продолжительности работы до первого отказа (под отказом принимается момент времени, когда параметры хотя бы одного элемента будут ниже порогового значения).

Оценка остаточного ресурса на примере объектов из полимерных композиционных материалов включает соответствующие критерии:

– в условиях отработки изделия по результатам ускоренных испытаний;

– в реальных условиях эксплуатации— по результатам измерений температурных полей объекта, его технического состояния и их ретроспективного анализа.

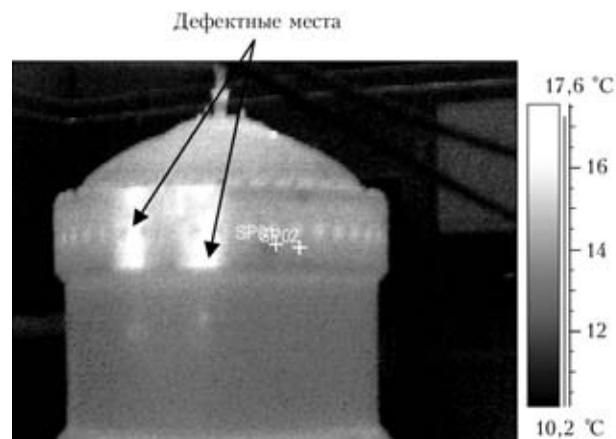


Рис. 1. Дефектные зоны на фланцевом соединении баллона, изготовленного из полимерного материала



Рис. 2. Термограмма, фотография и результаты контроля здания

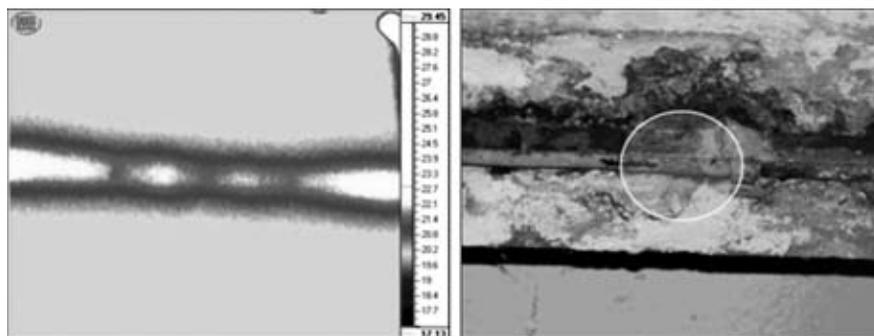


Рис. 3. Термограммы и фотографии силовых электрических кабелей с дефектом

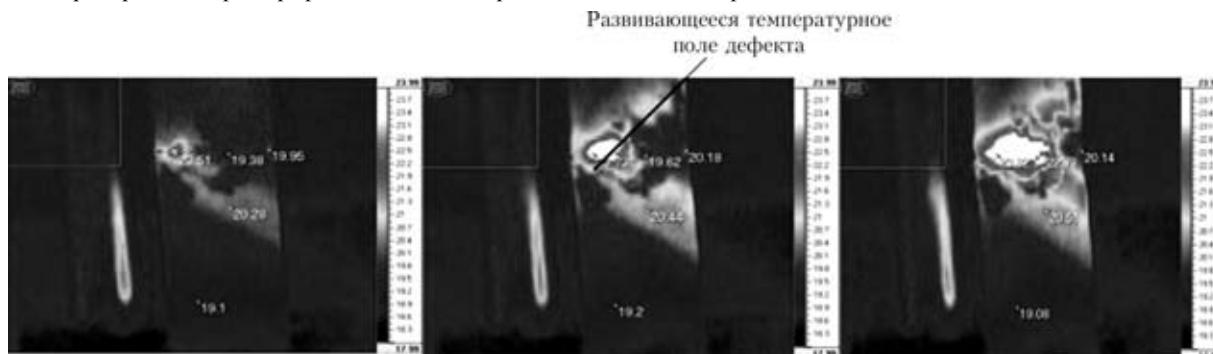


Рис. 4. Пример обнаружения дефекта (концентратора напряжения) в металлическом образце мостового крана при циклическом механическом воздействии

Первый критерий. Ускорение испытаний достигается интенсификацией деградационных процессов путем создания такого ряда эксплуатационных нагрузок, которые оказывают наибольшее влияние на повреждающее воздействие применительно к данному изделию. В основе методов прогнозирования лежат математические модели изменения параметров объектов во времени, а также в зависимости от уровня внешних воздействующих факторов.

Второй критерий основан на ретроспективном анализе характерного информационного (температурного) параметра объекта.

С помощью тепловизионной системы проводят измерения температурных полей поверхности в моменты времени $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$:

$$t_i = t_0 + \Delta t_{\min} i; i = 0, 1, 2, \dots, n,$$

где t_0 — начальный момент измерения температурного поля.

При этом интервал времени Δt_k на k -м элементе (потенциально критически опасном дефекте) и минимальный интервал времени Δt_{\min} определяют по числу p критически опасных дефектов.

Далее приводят полученные температуры $T_{\max k}(t_i)$ к единым условиям измерений. Экстраполируют зависимость $R_{\max}(t_{ji})$ по времени t и по выполнению условия $R_{\max}(t_{ji}) \leq R_{\text{крит}}$ определяют остаточный ресурс — время выхода элемента из строя t_{\max} .

Выводы

Принципы оптимизации включают в себя соответствующие инженерные решения всех основных этапов процесса диагностики — от разработки технологии контроля до проведения аттестации и выбора квалифицированного персонала с целью оценки энергоэффективности, безопасности эксплуатации и остаточного ресурса диагностируемого объекта.

Оптимизация касается применения эффективных расчетных моделей теплопередачи, технологии проведения контроля, включающей выбор аппаратуры и способов анализа измерительных данных с заданной точностью, режимов контроля и обработки результатов, оценки квалификации и эффективности специалистов по НК и, в конечном итоге, прогнозирования эксплуатационных характеристик контролируемого объекта.

1. *Тепловой неразрушающий контроль изделий* / О. Н. Будадин, А. И. Потапов, В. И. Колганов и др. — М.: Наука, 2002. — 476 с.
2. *РД-13-04-2006*. Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. Сер. 28. Вып. 11 / Под общ. ред. К. Б. Пуликовского. — М.: ОАО «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2007. — 32 с.
3. *Инженерные основы ТК*. Опыт промышленного применения / З. Г. Салихов, О. Н. Будадин, Е. Н. Ишметьев и др. — М.: ИД МИСиС, 2008. — 476 с.

Поступила в редакцию
02.03.2011

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОТИВООПОЛЗНЕВЫХ АНКЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Сообщение 1. Анализ напряженно-деформированного состояния и собственных частот анкера

Н. И. БУРАУ, Ю. В. КЛЕФА, Э. В. КУЛИШ (НТТУ «Киевский политехнический институт»)

Выполнено теоретическое обоснование и анализ модели стержня анкера. Разработана дискретная модель противооползневого анкерного сооружения, исследовано влияние изменения натяжения стержня анкера на параметры напряженно-деформированного состояния опорной стенки, определены собственные частоты колебаний элементов конструкции при некоторых видах закрепления стержня анкера.

Theoretical substantiation and analysis of anchor rod model were performed. A discrete model was developed of anti-landslide anchor construction, influence of the change of anchor rod tension on the parameters of the stressed-strained state of retaining wall was studied, and inherent frequencies of structural element oscillations for some types of anchor rod fastening were determined.

Одним из видов защиты территорий и расположенных на них сооружений от распространения и катастрофических последствий оползневых процессов, происходящих в районах со сложными эколого-геологическими условиями и повышенной сейсмической активностью, являются противооползневые анкерные сооружения. Они устанавливаются в потенциально опасных местах с подпорными стенками. Основным фактором, определяющим плотность установки анкеров, принимается их начальное натяжение, которое полагается неизменным на протяжении всего периода эксплуатации сооружения. Однако под влиянием оползневых процессов натяжение анкеров со временем может изменяться. В некоторых случаях это может привести к тому, что анкер будет вырван из коренной породы и не будет выполнять поддерживающую функцию без каких-либо видимых внешних признаков изменения его технического функционального состояния. Поэтому для противооползневых сооружений необходимо периодически проводить контроль натяжения анкеров, что является важной информацией для оценки их текущего состояния, состояния оползневых процессов и прогнозирования их дальнейшего развития.

Анкерное противооползневое сооружение является (рис. 1) сложным инженерным сооружением, состоящим из подпорной плиты 1, натяжного устройства 2, стержня 3 и замкового устройства 4. Замковое устройство служит для закрепления анкера в горной породе, натяжное — для создания в стержне анкера напряжений для уменьшения или устранения деформации и смещения «сшиваемых» горных пород. В качестве стержня

на практике чаще всего используются сталеполимерные конструкции, арматурный металлопрокат, сталеорганические конструкции, канатно-тросовые конструкции [1, 2]. Последние представляют собой распорные анкеры глубокого залегания длиной до 30 м, состоящие из четырех стержней из металлопроката, которые внедряются в пробуренный до коренной породы шурф.

Проводимые теоретические исследования горных анкеров в основном касаются вопросов прочности и надежности их креплений (замковых устройств) для различных этапов эксплуатации. В работе [1] предложены и исследованы разнообразные конструктивные решения элементов анкерного крепления, а также исследованы нагрузки, действующие на стержень анкера на всех этапах его работы. Для математического описания анкер представлялся моделью пространственно-криволинейного стержня, который находится под действием статических и динамических нагрузок. Полученные результаты позволяют выработать требования к геометрическим размерам и характеристикам используемых материалов всех эле-

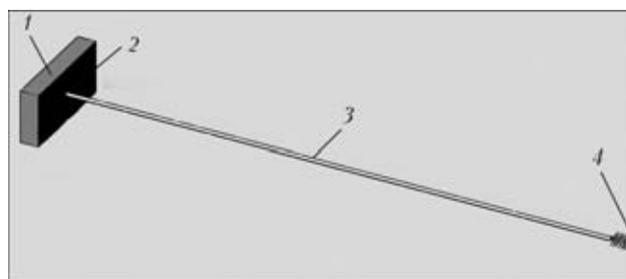


Рис. 1. Схема конструкции анкерного противооползневого сооружения: 1 — подпорная плита; 2 — натяжное устройство; 3 — стержень; 4 — замковое устройство

ментов анкерного крепления, но не являются достаточными для контроля возможных деформаций и смещений горных пород в месте закрепления анкера под воздействием естественных возмущений земли.

Целью данной работы является установление характера и функциональных зависимостей параметров напряженно-деформированного состояния противооползневого сооружения и собственных частот стержня анкера от изменения его натяжения, на основании чего может быть разработан новый метод диагностики функционального технического состояния противооползневых анкерных устройств.

Теоретическое обоснование и анализ модели противооползневого анкера. В работах [2, 3] для математического описания закрепленного и натянутого анкера использовали модель упругого тела с распределенными параметрами — модель закрепленной и натянутой струны с первоначальным значением осевой растягивающей силы P . В первом приближении не учитывается ограничение прогиба струны стенками шурфа. Появление прогиба (отклонение струны в поперечной плоскости) характеризует поперечные колебания модели.

Как известно [4], поперечные вибрации струны под влиянием осевой растягивающей силы P описываются выражением:

$$y = \sin \frac{n\pi}{l} x \left(A_n \cos \frac{\alpha n \pi}{l} t + B_n \sin \frac{\alpha n \pi}{l} t \right), \quad (1)$$

где $a = \sqrt{Pgl/Q}$; g — ускорение силы тяжести; Q — вес струны; l — длина струны; A_n, B_n — коэффициенты, определяющие амплитуды колебаний струны по первой ($n = 1$) и высшим ($n = 2; 3; \dots$) формам колебаний; x, y — соответственно осевое и поперечное перемещение.

Частоты f_{no} в общем случае для n -й формы колебаний (1) определяются как

$$f_{no} = \frac{an}{2l} = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{Pg}{lQ}}. \quad (2)$$

Пусть при деформации и смещении места закрепления анкера осевая сила P меняется:

$$P_1 = P \pm \Delta P,$$

где ΔP — изменение величины растягивающей силы; знак «+» соответствует увеличению натяжения в стержне анкера под действием оползня; «-» — уменьшению натяжения и случаю, когда анкер вырван из коренной породы.

Обозначив относительное изменение растягивающей силы $z = \Delta P/P$, последнее выражение принимает вид $P_1 = P(1 \pm z)$. В этом случае собственные частоты колебаний (2) будут функцией коэффициента z :

$$f_{n1} = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{P_1 g}{lQ}} = f_{no} \sqrt{1 \pm z}. \quad (3)$$

Показатель изменения собственных частот R колебаний стержня при изменении величины осевой растягивающей силы P определяется из (2) и (3) выражением:

$$R = \frac{f_{n1}}{f_{no}} = \sqrt{1 \pm z}. \quad (4)$$

В табл. 1 приведены результаты расчетов показателя изменения собственных частот R в зависимости от значения относительного изменения растягивающей силы z при увеличении ($R_{(+)}$) и уменьшении ($R_{(-)}$) растягивающей силы.

Как видно из приведенных результатов, малые изменения растягивающей силы ($z \leq 0,1$) приводят к изменению собственных частот не более, чем на 5 % при любом знаке изменения показателя R . Изменение осевой растягивающей силы в диапазоне $0 < z \leq 0,3$ приводит к изменению собственных частот по всем формам колебаний примерно на 14...16 %, а в диапазоне изменения параметра z до 0,5 — к изменению частот до 30 %.

Как следует из приведенных результатов, изменение собственных частот стержня анкерного противооползневого сооружения может быть использовано для контроля его натяжения и, соответственно, диагностики состояния анкерного противооползневого сооружения и возможности его осуществлять поддерживающие функции.

Разработка и анализ дискретной модели противооползневого анкера. При разработке метода диагностики состояния анкерных сооружений необходимо учитывать ряд факторов, связанных с конструкцией анкерного сооружения, технологией его установки и контролепригодностью, накладывающих значительные ограничения на возможность и эффективность проведения контроля [1, 5]. Одним из таких факторов является недоступность стержня анкера для измерения его натяжения или собственных частот. Анкерные противооползневые сооружения устанавливаются таким образом, что для проведения измерений доступной остается только подпорная стенка. Поэтому одной из важных задач при разработке метода диагностики противооползневых анкерных сооружений является определение влияния изменения натяжения стержня анкера на величины напряжений, перемещений и деформации подпорной стенки.

Для этой цели с использованием метода конечных элементов разработали дискретную модель противооползневого анкерного сооружения. Стержень анкера моделировался стальным тросом из углеродистой стали со следующими характеристиками: плотность 7850 кг/м³; модуль упру-

Таблица 1. Зависимости показателя R от коэффициента z

z	0,01	0,05	0,1	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50
$R_{(+)}$	1,005	1,025	1,049	1,072	1,095	1,140	1,183	1,225
$R_{(-)}$	0,995	0,975	0,949	0,922	0,894	0,837	0,774	0,707



гости $2,05 \text{ Н/м}^2$; коэффициент Пуассона $0,29$; модуль сдвига 8 Н/м^2 ; предел прочности при растяжении $5,85 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$. Подпорная стенка в модели представлена бетонной плитой со следующими характеристиками: плотность 2000 кг/м^3 ; модуль упругости $2,75 \text{ Н/м}^2$; коэффициент Пуассона $0,2$. Сетка модели содержит 8444 элемента и 14572 узла.

Для исследования зависимостей параметров напряженно-деформированного состояния подпорной стенки от параметров, характеризующих состояние анкерного сооружения, в процессе моделирования изменялась (уменьшалась) величина жесткости стержня анкера. Уменьшение жесткости проводилось за счет уменьшения диаметра стержня (утончение стержня).

Пусть исследуемый объект описывается моделью линейной колебательной системы, состоящей из инерционного (масса m) и упругого (жесткость C) элементов, тогда собственная частота такой системы определяется выражением $\omega_* = \sqrt{C/m}$. При уменьшении жесткости на величину Δ собственную частоту ω_Δ можем определить в виде:

$$\omega_\Delta = \sqrt{\frac{C-\Delta}{m}} = \omega_* \sqrt{1 - \frac{\Delta}{C}}$$

В полученном выражении отношение $\Delta C = \Delta/C$ будем рассматривать как относительное изменение жесткости, тогда отношение собственных частот ω_Δ и ω_* будет функцией относительного изменения жесткости:

$$\frac{\omega_\Delta}{\omega_*} = \sqrt{1 - \Delta C} \quad (5)$$

Как видно из выражения (5), увеличение относительного изменения жесткости ΔC приводит к уменьшению собственной частоты ω_Δ по сравнению с первоначальным значением ω_* . Результаты расчетов функциональной зависимости отношения частот (5) от параметра ΔC приведено в табл. 2.

Учитывая характер влияния уменьшения жесткости исследуемого объекта на его собственную частоту, а также с учетом приведенных в табл. 1 результатов, можно в первом приближении сопоставить влияние на собственные частоты изменения жесткости стержня анкера и уменьшения его натяга. Это позволит несколько упростить процедуру моделирования противооползневое анкерного устройства.

С учетом изложенного выше, относительное изменение жесткости ΔC принималось равным

Таблица 2. Зависимость отношения собственных частот от параметра ΔC

ΔC	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,40	0,45	0,50
ω_Δ/ω_*	0,95	0,92	0,89	0,87	0,84	0,81	0,77	0,74	0,71

$0,15$, что соответствует значению показателя изменения собственных частот $R_{(-)} = 0,92; 0,25$ ($R_{(-)} = 0,87$); $0,5$ ($R_{(-)} = 0,7$). Таким образом, моделирование стержня с дискретно изменяющейся для каждого модельного эксперимента жесткостью косвенно (по влиянию на собственные частоты) соответствует моделированию стержня анкера в виде струны с изменяющимся натяжением. В этом случае параметр ΔC может рассматриваться как параметр, характеризующий состояние анкерного сооружения, причем величина относительного изменения жесткости $\Delta C = 0$ характеризует начальное состояние анкера после его установления и требуемого натяжения. Увеличение ΔC характеризует уменьшение $R_{(-)}$, что, в соответствии с приведенными в табл. 1 результатами, свидетельствует об уменьшении растягивающей силы.

Анализ влияния изменения состояния анкера на параметры напряженно-деформированного состояния подпорной стенки. В процессе моделирования противооползневое анкерное сооружение были установлены зависимости величины перемещений D , напряжений V и деформации S подпорной стенки от значения относительного изменения жесткости ΔC стержня анкера.

На рис. 2 представлен пример моделирования и определения перемещений подпорной стенки для случая $\Delta C = 0$. Как видно из представленного рисунка, максимальное перемещение имеет плита, а стержень анкера имеет минимальное перемещение в области его закрепления в корневой породе (замковом устройстве). Значения максимального и минимального перемещений изменяются с изменением жесткости стержня, а именно, значения перемещений увеличиваются с уменьшением жесткости.

Изменение минимального значения перемещения D_{\min} при моделировании и исследовании дискретной диагностической модели противооползневое анкерное сооружение может быть интерпретировано как перемещение корневой породы и активизации оползневых процессов. Относительное изменение жесткости стержня ΔC и соответствующее изменение собственных частот $R_{(-)}$

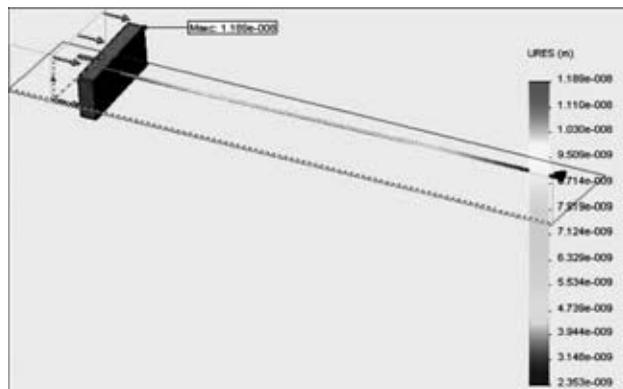


Рис. 2. Пример моделирования и определения перемещений подпорной стенки

будем рассматривать как параметры, которые характеризуют функциональное состояние анкера и его способность выполнять поддерживающую функцию.

Изменение максимального перемещения D_{\max} при исследовании будем рассматривать как признак изменения натяжения анкера и его собственных частот. Соотношение значений минимального и максимального перемещений также зависит от изменения жесткости стержня анкера. Величина D_{\max} превышает D_{\min} в пять раз для случая $\Delta C = 0$, с увеличением ΔC разница между ними уменьшается, а при $\Delta C = 0,5$ значения максимального и минимального перемещений практически совпадают. В последнем случае это свидетельствует о том, что анкер вырван из коренной породы, а противооползневое анкерное устройство не выполняет своей поддерживающей функции.

В табл. 3 приведены зависимости относительных значений максимального ΔD_{\max} и минимального ΔD_{\min} перемещений от относительного изменения (уменьшения) жесткости ΔC , которые по результатам моделирования были рассчитаны по выражениям:

$$\Delta D_{\max} = \frac{D_{\max}(\Delta C)}{D_{\max}(0)}, \quad \Delta D_{\min} = \frac{D_{\min}(\Delta C)}{D_{\min}(0)}, \quad (6)$$

где $D_{\max}(\Delta C)$ и $D_{\min}(\Delta C)$ — соответствующие перемещения при изменении жесткости стержня анкера ($\Delta C \neq 0$); $D_{\max}(0)$ и $D_{\min}(0)$ — перемещения при начальном значении жесткости стержня ($\Delta C = 0$).

Как видно из полученных результатов, значения минимальных перемещений существенно (более, чем на два порядка) увеличиваются с уменьшением жесткости стержня анкера. Однако эти перемещения недоступны измерению, так как они происходят в месте закрепления анкера в коренной породе.

Значение максимальных перемещений увеличивается незначительно (на 4%) в диапазоне значений относительного уменьшения жесткости стержня $\Delta C \leq 0,15$, что соответствует $R_{(-)} \leq 0,97$ и $z \leq 0,005$. Дальнейшее уменьшение жесткости стержня приводит к более значительному увеличению максимальных перемещений.

При определении напряжений V было установлено, что максимальные напряжения испытывает стержень анкера, а минимальные — плита (подпорная стенка). С изменением жесткости стержня величины напряжений практически не изменяют-

ся (изменения в пределах 0,4 %). При этом минимальные напряжения V_{\min} однозначно уменьшаются в указанном диапазоне с уменьшением жесткости, а для V_{\max} нет однозначной зависимости от изменения жесткости стержня.

При определении деформации S , как и в предыдущем случае, максимальные значения деформации имеет на стержне анкера, а минимальные — на плите. В результате моделирования установлено, что максимальные значения деформации S_{\max} практически не зависят от жесткости стержня анкера, а минимальные значения S_{\min} незначительно увеличиваются с уменьшением жесткости стержня (около 3 % для $\Delta C = 0,5$).

Таким образом, исследования дискретной модели противооползневого анкерного сооружения показали, что наиболее чувствительным к изменению жесткости стержня анкера является перемещение его элементов конструкций. Изменение перемещения, измеренного на плите противооползневого сооружения, может служить диагностическим признаком изменения натяжения анкера.

Анализ собственных частот дискретной модели противооползневого анкерного сооружения. Для определения собственных частот элементов конструкции противооползневого сооружения моделирование проводилось с учетом следующих условий: стержень анкера жестко закреплен в подпорной стенке; замковое устройство стержня жестко закреплено в коренной породе; не учитывается влияние стенок шпура (скважины); подпорная стенка не закреплена на грунте; анализируются три первые формы колебаний; относительное изменение жесткости ΔC принималось равным 0 и 0,15. Примеры колебаний приведены на рис. 3.

Как видно из представленных результатов, наибольшие напряжения наблюдаются в замковом устройстве и в узлах колебаний. В результате моделирования определены и проанализированы собственные частоты колебаний по первым трем формам для указанных выше значений ΔC . Уменьшение жесткости стержня ($\Delta C = 0,15$) в данном случае является уменьшением жесткости всей конструкции «стержень–подпорная стенка» и приводит к уменьшению собственных частот колебаний в 3 раза по первой форме, на 72 % по второй и в 2 раза по третьей форме колебаний.

Кроме того, проведено моделирование и определены собственные частоты для описанных выше условий в случае жесткого закрепления подпорной стенки на грунте. Примеры колебаний приведены на рис. 4. В этом случае наблюдаются колебания только стержня анкера, как и при представлении стержня моделью натянутой и закрепленной струны.

Таблица 3. Зависимости ΔD_{\max} и ΔD_{\min} от относительного изменения жесткости стержня

ΔC	0	0,15	0,25	0,50
ΔD_{\max}	1	1,04	2,61	28,82
ΔD_{\min}	1	1,79	9,15	143,41



Рис. 3. Колебания анкера с закрепленным замковым устройством и свободной подпорной стенкой по первой (а), второй (б) и третьей (в) формам

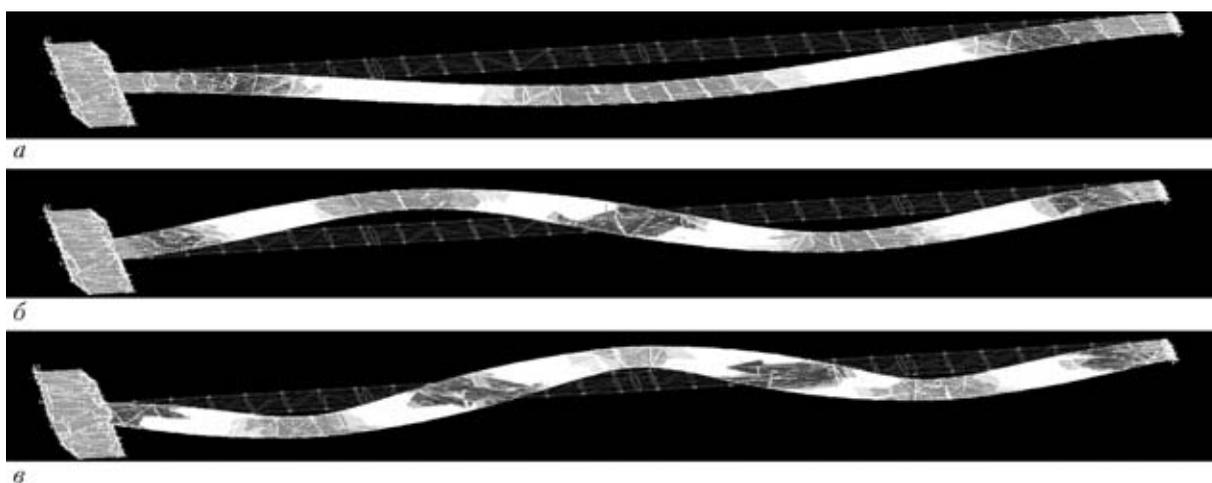


Рис. 4. Колебания стержня анкера с закрепленными замковым устройством и подпорной стенкой по первой (а), второй (б) и третьей (в) формам

Как видно, наибольшие напряжения анкерное сооружение испытывает в местах закрепления (в замковом устройстве, на подпорной стенке) и в узлах колебаний. Для случая $\Delta C = 0,15$ отношение собственных частот ω_{Δ}/ω_* по всем трем формам колебаний составило 0,77, что существенно отличается от результатов теоретических расчетов, представленных в табл. 2. Это связано с достаточно грубым приближением при моделировании стержня анкера линейной колебательной системой без учета подпорной стенки. Если сравнить значения относительных частот с результатами, приведенными в табл. 1, можно сделать вывод, что утончение стержня (изменение ΔC) на 0,15 приводит к таким же изменениям собственных частот анкера, как относительное изменение натяга более, чем на 0,4.

Таким образом, для каждого из рассмотренных способов закрепления элементов конструкции противооползневого анкерного сооружения наблюдается уменьшение собственных частот при уменьшении натяга стержня анкера, что может быть использовано в качестве диагностического

признака изменения функционального состояния исследуемого объекта.

Выводы

Рассмотрены аналитическая модель стержня анкера в виде натянутой струны, которая позволяет установить зависимость собственных частот стержня анкера от изменения его натяжения, и модель в виде линейной колебательной системы. Показано, что по влиянию на собственные частоты моделирование стержня с изменяющейся жесткостью соответствует моделированию стержня анкера в виде струны с изменяющимся натяжением. Предложено при исследованиях противооползневых анкерных сооружений рассматривать относительное изменение жесткости стержня анкера как параметр, характеризующий его состояние (косвенно — его натяжение).

С использованием метода конечных элементов разработана дискретная модель противооползневого анкерного сооружения и проведен анализ влияния изменения состояния анкера (изменение жесткости его стержня) на параметры напряженно-деформированного состояния подпорной стен-

ки. Установлено, что наиболее чувствительным к изменению жесткости стержня анкера является перемещение подпорной стенки. Изменение перемещения, измеренного на плите противоположного сооружения, можно использовать в качестве диагностического признака изменения натяжения анкера.

Проведено моделирование, определение и анализ собственных частот и форм колебаний элементов конструкции противоположного анкерного сооружения при некоторых видах закрепления стержня (с закрепленным замком и свободной подпорной стенкой, с закрепленным замком и закрепленной подпорной стенкой). Проанализировано влияние изменения жесткости стержня анкера на его собственные частоты. Показано, что уменьшение жесткости стержня приводит к уменьшению собственных частот по всем формам колебаний сооружения, но в гораздо большей степени, чем в теоретических расчетах. Это связано с тем, что дискретная модель противоположного сооружения в большей степени по сравнению с используемой теоретической моделью отражает его сложную структуру (стержень анкера, подпорная стенка, способы закрепления стержня) и влияние

изменения состояния на собственные частоты и формы колебаний.

Полученные результаты являются новыми и могут быть использованы при разработке метода вибрационной диагностики функционального технического состояния противоположных анкерных сооружений.

1. *Мошкин Н. В.* Исследование нагружений и деформаций горных анкеров как пространственно-криволинейных стержней и совершенствование их элементов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Томск: Томск. политехн. ун-т, 2004. — 22 с.
2. *Аврутова І. В.* Методологія вібраційної діагностики протизсувного анкеру для визначення зміни його натягу / І. В. Аврутова, Н. І. Бурау, Ю. Г. Жуковський // Будівельні конструкції. — 2007. — Вип. 67. — С. 508–515.
3. *Theoretical bases of vibration diagnostics of anchor against landslide constructions* / N. Bouraou, Iu. Klofa, Yu. Zsukovskij, E. Kulish // *Vibrations in Physical Systems*. — 2010. — 24. — P. 63–68.
4. *Сопротивление материалов: Учебник для вузов* / Под общ. ред. Г. С. Писаренко. — 4-е изд., перераб. и доп. — Киев: Вища шк., 1979. — 696 с.
5. *Демченко А. И., Яйцов А. А.* Результаты испытаний сталеполлимерных анкеров на вытягивание в сложных горно-геологических условиях // *Наукові праці УкрНМДІ НАН України*. — 2007. — № 1. — С. 239–247.

Поступила в редакцию
18.03.2011



6-9 сентября 2011 г.,

г. Сумы, Украина

XIII Международная научно-техническая конференция "Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования"

Международный форум "Компьютерное моделирование, проектирование, изготовление и эксплуатация насосного оборудования"

Организаторы

Сумский государственный университет, Украина
Управляющая компания "ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И СИСТЕМЫ", Москва, Россия
Ассоциация компрессорщиков и пневматиков, Санкт-Петербург, Россия
Технологический Университет, Кельце, Польша
Словацкий технологический университет, Братислава, Словакия
Технологический университет, Гливице, Польша
Орловский государственный технический университет, Россия

Тематика

- ▶ Проблемы снижения стоимости жизненного цикла насосного и компрессорного оборудования
- ▶ Уплотнения неподвижных, аксиально-подвижных соединений и вращающихся валов, повышение надежности и эффективности уплотнительных устройств насосов и компрессоров
- ▶ Вопросы гидрогазодинамики, оптимизации, динамики и прочности турбомашин и их узлов
- ▶ Снижение шума и вибрации, вибродиагностика и прогнозирование остаточного ресурса, балансировка и динамика роторов насосов и компрессоров
- ▶ Вопросы трибологии и метрологии опор и уплотнений, новые материалы и технологии
- ▶ Экологически безопасная эксплуатация насосного и компрессорного оборудования, проблемы энерго- и ресурсосбережения.

Сумский государственный университет,
ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, 40007, Украина
Тел./Факс: +38(0542) 33-35-94
E-mail: hervicon@sumdu.edu.ua

ОАО "Сумский завод "Насосэнергомаш",
Привокзальная пл., 1, г. Сумы, 40011, Украина
Тел./Факс: +38(0542) 61-99-78
E-mail: otd@nempump.com
Web: www.hervicon.sumdu.edu.ua



ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ДИАГНОСТИРОВАНИИ КРАНОВ-ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ ЗАВОДА «СИБТЯЖМАШ»

В. А. ГУДОШНИК (ООО СП «ТЮФ НОРД-ДИЭКС», г. Днепропетровск), **С. А. ГУБСКИЙ** (НТУ «ХПИ», г. Харьков),
В. А. ПОПОВ (ПТАН Украины, г. Харьков), **Ю. В. ЧМЫРЬ** (ОАО «НИПКТИ «Укркранэнерго», г. Харьков)

На основании многолетних исследований и практики применения магнитной структуроскопии при техническом диагностировании рассматриваются проблемы предотвращения аварий при эксплуатации кранов-перегрузателей завода «Сибтяжмаш».

Problems of accident prevention in operation of loading cranes produced by "Sibtyashmash" are considered, based on many years of investigations and practical application of magnetic structuroscopy at technical diagnostics.

В 1980–1990-х гг. на предприятиях горно-металлургического комплекса, тепловых электростанциях начали широко применяться краны-перегрузатели трубчатой конструкции производства завода «Сибтяжмаш».

Причины их востребованности следующие: во-первых, высокая производительность — до 600 т/ч, пролет 76,2 м, консоли с вылетом до 25...31 м, режим работы — А6, скорость передвижения грузовой тележки до 240 м/мин; во-вторых, передовые (на то время) системы управления приводами (системы Г-Д, либо преобразователи постоянного тока).

Однако в дальнейшем популярность сменилась скандальной известностью.

Причины серьезных аварий с обрушением консолей и гибелью людей связывались только с наличием дефектов в сварных соединениях. Лишь после аварий на Беловской ГРЭС, Криворожском центральном ГОКе, Гусиноозерской ГРЭС завод-изготовитель обратил внимание потребителей на необходимость усиления надпорных узлов на перегружателях с длиной консолей 30 и более метров независимо от срока эксплуатации, а также на всех других, отработавших срок службы 15 лет. Изменение форм собственности предприятий и смена собственников проблемы безопасной эксплуатации кранов-перегрузателей, как впрочем и другого оборудования повышенной опасности, отодвинула на второй план. Новые собственники предприятий не торопились вкладывать средства в обновление кранового парка или хотя бы в реконструкцию грузоподъемного оборудования. «Косметические ремонты» в местах появления дефектов зачастую не улучшали, а ухудшали состояние металлоконструкций кранов-перегрузателей, а экспертными организациями в большинстве

случаев не выполнялся весь комплекс работ, обеспечивающий установление причин раннего трещинообразования. Систематический мониторинг нарастания усталостных явлений в элементах металлоконструкций с прогнозированием остаточного ресурса не проводился.

В журнале «Подъемные сооружения. Специальная техника» поднимался вопрос о небезопасности дальнейшей эксплуатации кранов-перегрузателей, которые отработали нормативный срок [1], а также освещался накопленный опыт по реконструкции кранов с установкой шпренгельной системы по про-



ектам «НИПТКИ «Укркранэнерго» на Запорожской ТЭС, Криворожском Центральном ГОКе, Приднепровской ТЭС, Криворожстали.

Очередная авария с обрушением консоли произошла в мае 2006 г. на Ясиновском коксохимическом комбинате всего лишь после 14 лет эксплуатации крана (рис. 1). При этом за несколько лет до аварии металлоконструкция моста крана-перегрузателя неоднократно подвергалась сложным ремонтам. И хотя через каждые шесть месяцев проводили техническую диагностику для установления срока дальнейшей временной эксплуатации, авария произошла.

При изучении причин аварии и решении вопроса о возможности и целесообразности ремонтно-восстановительных работ металлоконструкций моста крана Донецким экспертно-техническим центром, ОАО «НИПТКИ «Укркранэнерго» и ООО «Подъемсервис» (г. Харьков) был применен комплекс методов неразрушающего контроля и исследований.

Исследования образцов, вырезанных из ненагруженных участков обечайки трубы, показали, что химический состав и механические свойства металла соответствовали требованиям, предъявляемым к стали 10ХСНД по ГОСТ 19281–89 класса прочности 390, а в микроструктуре металла не выявлено каких-либо аномалий: неметаллических включений, полосчатости, видманштеттовой структуры (рис. 2).

Визуальный осмотр в месте разрыва обечайки трубы (рис. 3, 4) и последующие металлографические исследования образцов (рис. 5) показали, что разрушение элемента (обечайки) несущей трубы произошло из-за охрупчивания металла в околошовной зоне (в металле ЗТВ) с последующим развитием магистральной трещины в основной металл.

Сварные соединения подвергали ультразвуковому контролю и магнитопорошковой дефектоскопии, а металл элементов металлоконструкции моста — ультразвуковой толщинометрии и твердометрии, а затем магнитному (коэрцитиметрическому) контролю.

Твердость и механические свойства на отдельных участках металлоконструкций моста были ниже требований, предъявляемых к стали 10ХСНД по ГОСТ 19281–89 для класса прочности 390, особенно в зонах, подвергшихся разрушению и ремонту, что подтвердилось механическими испытаниями.

Вместе с тем образцы, вырезанные из наиболее нагруженных элементов, не могут отражать структурное и напряженное состояние металлоконструкции в целом по критериям подобия. Поэтому для оценки процессов накопления усталостных повреждений анализировали данные магнитного контроля по изменению величины коэрцитивной силы H_c .

Процесс накопления повреждений в металле может быть описан линейной зависимостью типа

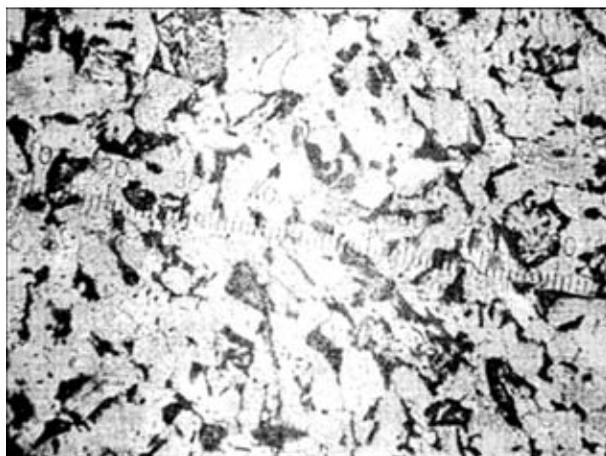


Рис. 2. Микроструктура ($\times 500$) металла образца № 5, удаленного от разрыва



Рис. 3. Общий вид разрыва несущей трубы моста



Рис. 4. Место вырезки образца № 2

$$\Delta H_c / \Delta T = C \Delta G^n,$$

где $\Delta H_c / \Delta T$ — прирост значений коэрцитивной силы за период эксплуатации крана; ΔG^n — внутренние напряжения; C, n — свойства стали [2].

Согласно принципу неопределенности и положениям теории подобия академика Седова средние значения не могут характеризовать накопленные повреждения и остаточный ресурс конструкции в целом. Это связано с тем, что различные расчетные элементы нагружаются по разному и



не имеют одинаковую жесткость и прочность. Более того, даже в одном элементе на различных участках накопление усталостных повреждений происходит по-разному. Поэтому контроль величины H_c по «слабому звену», т. е. максимальным значениям ($\max H_c$), имеет близкую к линейной зависимость накоплений повреждений и может с вероятностью 0,95 характеризовать состояние металла в зависимости от срока эксплуатации и режима нагружения.

Исследования металла в верхней части обечайки (непосредственно возле зоны разрушения) показали максимальные значения H_c (до 12,5 А/см), а средняя скорость нарастания коэрцитивной силы $\Delta H_c / \Delta T$ характерна для металлоконструкций кранов мостового типа при работе в тяжелом режиме эксплуатации [2], что свидетельствует о недостатках конструкции крана-перегрузателя и ненадежности узла консоли трубы в месте присоединения обечайки к ригелю.

Металлографическими исследованиями образцов, вырезанных из верхней части обечайки трубы (на 200 и 300 мм от начала разрушения) выявлены микротрещины (рис. 6, 7), при этом значения H_c уменьшались по мере удаления от места разрыва и составляли от 9,2 до 8,4 А/см. Значительно изменялись значения H_c вокруг сварного соединения (по диаметру обечайки) — от 12,5 (в верхней части) до 6,2 А/см на средней части трубы (рис. 8).

Такое распределение H_c характерно для начала трещинообразования при достижении предельных усталостных изменений в металле, достигшем критического режима эксплуатации (область пластической деформации в соответствии с диаграммой нагружения ISO 4301 [3]).

Для исследования напряженно-деформированного состояния металлоконструкций моста крана-перегрузателя с применением магнитного (коэрцитиметрического) метода контроля были определены зоны контроля и места расположения точек контроля относительно сварных соединений несущей трубы моста и двутавровых балок (рис. 9), диафрагм и тормозных листов.

Выбор зон и точек контроля обусловлен также тем, что магнитные свойства стальных металлоконструкций при циклическом нагружении формируются в условиях сложнапряженного состояния под влиянием растягивающих, изгибающих нагрузок и крутящих моментов.

В периоды изготовления, монтажа и последующей эксплуатации кранов в несущих элементах металлоконструкций при циклическом нагружении идет процесс накопления микропластических деформаций и повреждений, приводящих к усталостному разрушению металла с потерей несущей способности конструкции. Одновременно происходят и изменения ряда магнитных параметров, однозначно связанных с количеством нару-

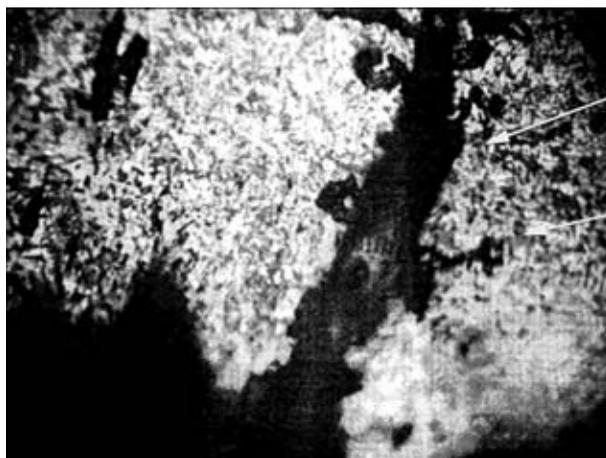


Рис. 5. Микроструктура ($\times 500$) металла образца № 5 в зоне разрыва (стрелки указывают на микротрещины)

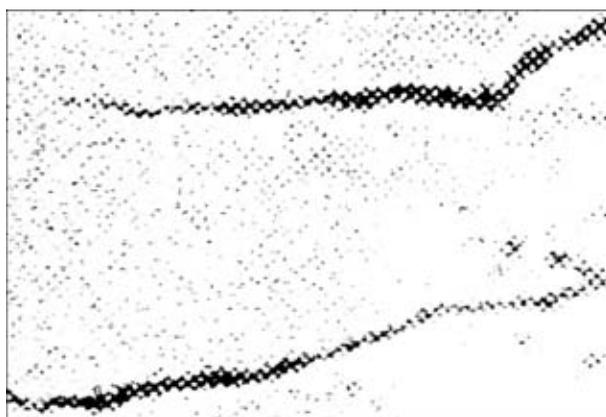


Рис. 6. Микроструктура ($\times 500$) образца № 2 (микротрещина на расстоянии 200 мм от зоны разрыва)

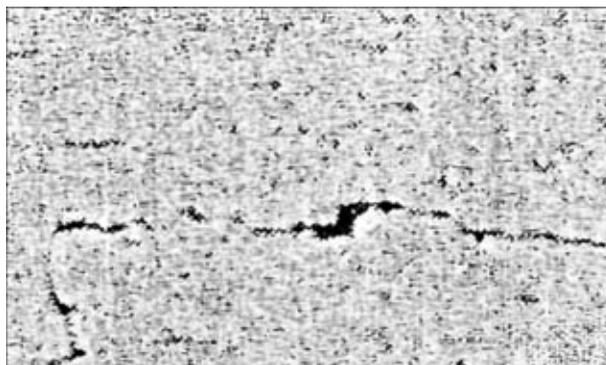


Рис. 7. Микроструктура ($\times 500$) образца № 4 (микротрещина на расстоянии 300 мм от зоны разрыва)

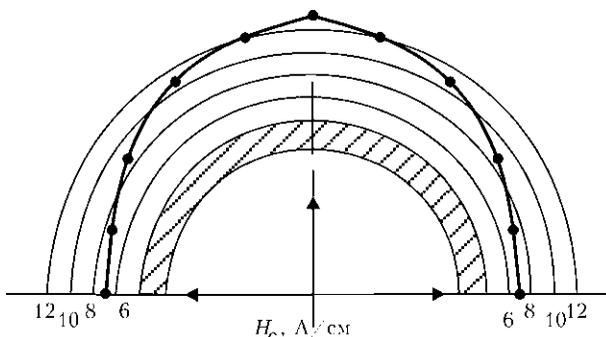


Рис. 8. Распределение H_c (А/см) по диаметру обечайки трубы в зоне разрушения

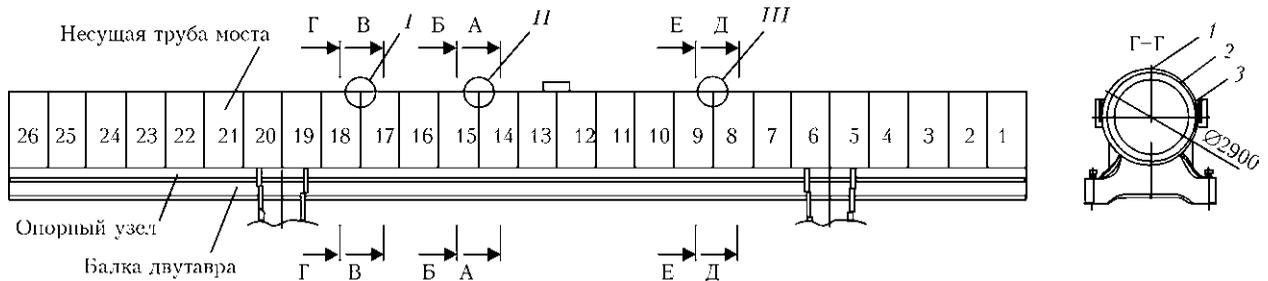


Рис. 9. Зоны контроля и места расположения точек контроля относительно сварных соединений несущей трубы моста и двутавровых балок крана-перегрузателя

шений структуры металла и являющихся своеобразным отражением силового режима работы конструкции, т. е. в процессе накопления нарушений структуры металла изменяются (возрастают) значения H_c в элементах металлоконструкции.

Исследования осуществляли с применением структуроскопов типа КРМ-ЦК-2М (рис. 10) с последующим анализом и аппроксимацией полученных значений H_c в зависимости от марок сталей и толщин элементов металлоконструкций с помощью программы METALL, написанной на языке программирования Delphi. Также проводились необходимые расчеты, в том числе методом конечных элементов [4, 5].

Из-за ограниченного объема публикации ниже приводятся лишь отдельные фрагменты распределения H_c в несущей трубе моста (рис. 11, без учета обрушившейся консоли, зоны 21-26).

Как видно из рис. 11, наибольшие значения H_c имеют место в зонах 3-4, 7-8, 17-18, т. е. в тех элементах обечайки трубы, которые примыкают к металлоконструкции ригелей опор моста перегружателя, а также в средней части моста (зона 12), где проводилось усиление несущей трубы моста с применением сварочных работ. Средняя скорость нарастания усталостных явлений составляла 0,22...0,25 А/см, что характерно для металлоконструкций мостовых кранов при работе в весьма тяжелом режиме эксплуатации.

В этих зонах металл элементов обечайки находится в области упругопластических деформаций, а напряжения, возникающие при этом, достигали предела текучести $\sigma_{0,2}$.

Аналогичные исследования по оценке напряженно-деформированного состояния металлоконструкций мостов кранов-перегрузателей с применением магнитного (коэрцитиметрического) метода контроля проводили на ряде других предприятий, в том числе в течение нескольких лет на Запорожской ТЭС (г. Энергодар), где на кране была установлена шпренгельная система для усиления надопорных узлов (рис. 12) по проекту ОАО «НИПТКИ «Укркранэнерго».

Результаты замеров коэрцитивной силы H_c , А/см, в аварийно-опасных зонах (при входе трубчатой обечайки в ригель) показали, что нап-



Рис. 10. Сравнительные замеры H_c на образцах различными структуроскопами

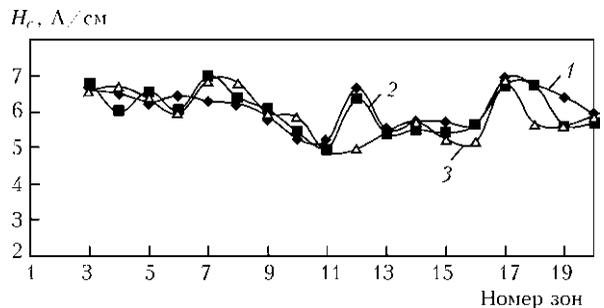


Рис. 11. Изменения значений H_c в элементах несущей трубы моста крана-перегрузателя Ясиновского КХК (кривые 1-3 — соответствуют точкам контроля 1-3 на рис. 2)



Рис. 12. Общий вид шпренгельной системы усиления на одной из опор крана-перегрузателя

ряжения в этих зонах остаются стабильными на протяжении последних пяти лет (рис. 13). Значения H_c ниже, чем в приведенных выше исследованиях металлоконструкций моста крана на Ясиновском КХК (рис. 11), хотя кран отработал два

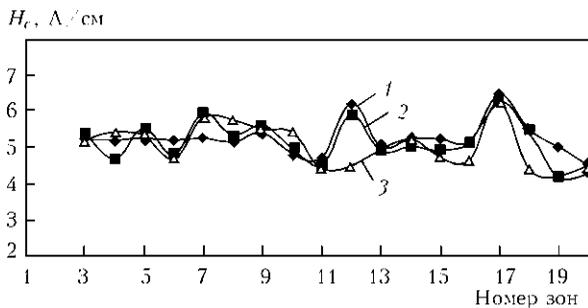


Рис. 13. Изменения значений H_c в элементах несущей трубы моста крана-перегрузателя Запорожской ТЭС (кривые 1–3 соответствуют точкам контроля 1–3 на рис. 2)

нормативных срока эксплуатации в весьма тяжелом режиме работы.

Вместе с тем замеры H_c на раскосах шпренгельной системы показали, что напряжения в раскосах распределяются неравномерно. Раскосы северной консоли работают в области упругих деформаций, что соответствует режиму надежной эксплуатации. В более сложном напряженно-деформированном состоянии находятся раскосы 1–3 южной консоли, где значения H_c достигают 5,5...6,8 А/см. При этом значения H_c в верхнем и нижнем узлах раскосов распределяются неравномерно, как по длине, так и по диаметру, т. е. раскосы подвергаются не только растягивающим напряжениям, но и крутящим моментам при нагрузках, связанных с неудовлетворительным состоянием системы контроля перекуса при движении крана.

Скорость роста $\Delta H_c / \Delta T$ в элементах раскосов шпренгельной системы южной консоли составляет от 0,2 до 0,67 А/см в год, т. е. за 5 лет эксплуатации крана после установки шпренгельной системы отдельные участки раскосов достигали области упругопластической деформации.

Фрагмент распределения значений H_c по диаметру одного из раскосов приведен на рис. 14.

Из приведенных выше фрагментов материалов исследований можно сделать вывод, что при комплексном научном подходе к диагностированию кранов-перегрузателей аварий можно было бы избежать. Более того, совершенно непонятно игнорирование рекомендаций завода-изготовителя о необходимости усиления надпорных узлов как собственниками кранов, так и экспертными организациями, более того инспекторами Госгорпромнадзора Украины, допускающими дальнейшую эксплуатацию аварийноопасного грузоподъемного оборудования.

В случае аварии на Ясиновском КХК количество обследований не переросло в качество и достоверность прогнозирования предельного состояния металлоконструкции крана. Информация об убытках

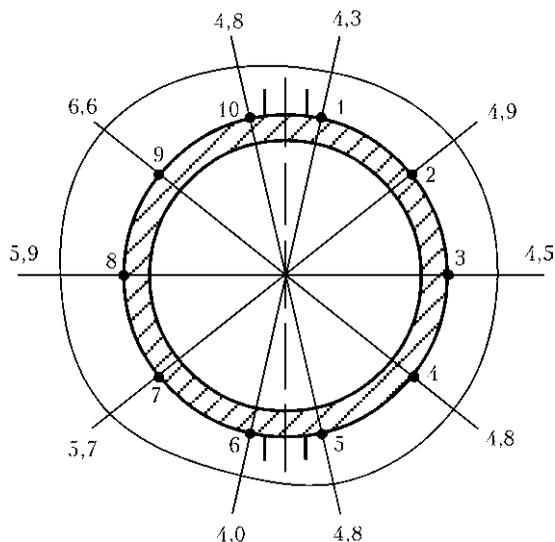


Рис. 14. Результаты замеров H_c (А/см) по сечению 7 раскоса № 3 шпренгельной системы южной консоли

от аварии (десятки миллионов гривен) возможно научит других собственников считать свои деньги.

Вывод

Анализ материалов исследований и практика применения современных методов неразрушающего контроля при оценке напряженно-деформированного состояния металлоконструкций кранов-перегрузателей [2, 6] диктуют необходимость научного подхода к разработке нормативной базы для экспертных организаций, создание специальных методик по технической диагностике специальных кранов, таких как краны-перегрузатели, а также при экспертизе промышленной безопасности грузоподъемного оборудования, работающего во взрывоопасной и пожароопасной средах, для избежания не только аварий, связанных с человеческими жертвами, но и для предотвращения техногенных катастроф.

1. Чиковани А. Е. Экспертное обследование и ремонт мостовых перегружателей. Медлить опасно // Подъемные сооружения и специальная техника. — 2004. — № 2.
2. Котельников В. С. и др. Практика магнитной диагностики подъемных сооружений при проведении экспертизы промышленной безопасности // Там же. — 2003. — № 6.
3. Международный стандарт ISO 4301. — Ч. 1–5.
4. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. — М.: Мир, 1972. — 314 с.
5. Метод аналізу вимірювань коерцитивної сили під час діагностики металоконструкцій кранів з різними товщинами елементів / О. В. Григоров, С. О. Губський, В. А. Попов, Н. Ф. Хорло // Метрологія та прилади. — 2009. — № 5. — С. 51–55.
6. Иванов В. Н., Кобзев В. А., Суций О. В. и др. Применение метода акустической эмиссии при диагностировании металлоконструкций // Подъемные сооружения и специальная техника. — 2002. — № 8. — С. 19–24.

Поступила в редакцию
03.03.2011

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНДОСКОПИИ ПРИ ОСМОТРАХ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

А. Ю. ДУХОВСКИЙ (Науч.-произв. предприятие «Интрон-СЭТ», г. Донецк),
В. А. СИДОРОВ (Донецк. нац. техн. ун-т)

Рассмотрена возможность применения эндоскопии металлургических машин, позволяющая снизить время осмотра оборудования, исключить операции по разборке и сборке механизмов, продлив тем самым ресурс узлов и деталей. Рассмотрена необходимость разработки справочника поврежденных механического оборудования относительно категорий технического состояния, исходя из факторов работоспособности и уровней отклонения.

Results of an integrated approach to problems of optimization of diagnostic systems of thermal control are set forth, covering: control technology, diagnostic equipment, specialist training, work performance by service personnel (flaw detection operators), diagnostic procedures aimed at increase of safety of functioning and energy effectiveness of various industrial facilities, including potentially hazardous technical devices, buildings and constructions, electrical engineering facilities and housing and communal services.

Современные металлургические машины представляют собой комплекс механизмов, обеспечивающих технологический процесс производства металлопродукции. Остановка одного механизма часто приводит к остановке всего металлургического агрегата. Эффективная работа металлургического предприятия требует постоянного поддержания высокого уровня безотказности механического оборудования. Достигается это путем проведения своевременного технического обслуживания и ремонта оборудования. Получение информации о техническом состоянии и определение объема ремонтных работ для восстановления работоспособного состояния механического оборудования на металлургических предприятиях проводится во время осмотра оборудования [1–3].

Осмотр осуществляется в динамическом и статическом режиме после неполной разборки при ревизии механизмов. Практически все руководства по эксплуатации механического оборудования в обязательном порядке содержат требования к проведению визуального осмотра, основанием для которого может стать результат технического диагностирования. В этом случае визуальное обнаружение дефекта подтверждает поставленный диагноз и служит неоспоримым доводом для оценки технического состояния механизма. Возможности эндоскопии металлургических машин позволяют снизить время осмотра оборудования, исключить операции по разборке и сборке механизмов, продлив тем самым ресурс узлов и деталей [4].

Перед исследованием механического оборудования металлургических предприятий методами эндоскопии, включая формирование рациональ-

ных подходов и приемов при оценке технического состояния машин и механизмов, необходимо:

- провести обзор конструкций металлургических машин, определив возможность визуального и эндоскопического осмотра;
- определить требования к эндоскопическому оборудованию;
- формировать справочник визуальных признаков технического состояния деталей механизмов.

Анализ отказов механизмов и накопленный опыт позволит определить рациональную периодичность осмотров механического оборудования.

Обзор конструкций металлургических машин. Технические характеристики и назначение металлургических машин весьма разнообразны. Например, мощность привода ролика рольганга мелкосортного прокатного стана 150 составляет порядка 1 кВт, что позволяет перемещать заготовку массой 2 т со скоростью до 1,5 м/с; мощность привода чистового блока этого же стана 150 составляет 2×2500 кВт, что обеспечивает скорость прокатываемой заготовки на уровне 80...120 м/с. Частота вращения прокатных валков чистового блока достигает 15000 об/мин, а механизм поворота свода электродуговой печи выполняет поворот на 90° за 20 с. Значительно отличаются массы (от нескольких килограмм до десятков тонн) и габариты (от 100 мм до 10 и более метров, диаметры валов — 10...800 мм) деталей металлургических машин. Такое многообразие типоразмеров и характеристик не характерно для других отраслей промышленности.

Разнообразие конструкций металлургических машин вызвано требованиями технологического процесса и необходимостью разделения операций. Оно основано на нескольких типовых конструк-



торских решениях, основным из которых является двухпорный вал с консольным или межпорным расположением исполнительного органа. Расположение валов может быть горизонтальным, вертикальным, реже наклонным. Главное преимущество данной схемы — статическая определенность, что обеспечивает стабильность работы оборудования при переменных силовых и температурных воздействиях. При использовании гидромеханического привода применяются рычажные системы для реализации поступательного или вращательного движения. Типичным примером является привод клапанов загрузочных устройств доменных печей, механизм перемещения электродов электродуговой печи, механизмы вертикального и горизонтального перемещения нагревательных печей с шагающими балками прокатных станов. Использование гидромеханического привода в настоящее время находит все более широкое применение в доменном, сталеплавильном и прокатном производствах.

Наибольшие трудности при осмотре возникают при ревизии шестеренных клетей прокатных станов и комбинированных редукторов приводов прокатных клетей мелко- и среднесортных непрерывных прокатных станов. Характеристики данного оборудования использованы для анализа возможности обследования металлургических машин с помощью визуального и эндоскопического осмотра как наиболее сложных механизмов.

Основными элементами, определяющими техническое состояние механизмов, является состояние подшипников качения, зубчатых передач и валов. При проведении предварительного анализа конструкций данных механизмов выявлены следующие особенности, затрудняющие визуальный осмотр:

– необходимость проведения осмотра в нескольких направлениях: для подшипников качения (наиболее часто используемых двухрядных роликоподшипников) необходим осмотр роликов, сепаратора и беговых дорожек по каждому ряду ро-

ликов, для зубчатых передач необходим осмотр как рабочей, так и нерабочей стороны зуба (при неререверсивном приводе) или двух сторон зуба (при реверсивном приводе);

– непригодность оборудования для проведения визуального осмотра — в лучшем случае на корпусе механизма расположены несколько лючков для осмотра. Для осмотра внешней стороны подшипников необходимо снимать торцевые крышки, а осмотр внутренней стороны подшипников затруднен из-за конфигурации зубчатых колес;

– расстояние от смотрового лючка до точки осмотра может составлять 1,0...1,5 м при отсутствии прямой видимости осматриваемого объекта;

– необходимость получения общего вида осматриваемого элемента и детального вида обнаруженного повреждения;

– отсутствие приспособлений для медленного проворачивания деталей механизма для всестороннего осмотра.

Требования к эндоскопическому оборудованию. Для визуального осмотра с использованием эндоскопического оборудования пригодны только механизмы, смазываемые жидкими маслами: шестеренные клетки, комбинированные редукторы привода прокатных клетей, редукторы скиповых подъемников доменных печей, редукторы механизмов металлургических кранов, редукторы ножиц горячей резки, внутренние поверхности гидроцилиндров. Применение пластичных смазок практически исключает возможность визуального осмотра элементов, в частности, крупногабаритных поворотных колец механизмов поворота свода электродуговых печей.

Известны три основных вида эндоскопических приборов (рис. 1): бороскопы, фиброскопы и видеоскопы. Бороскопы имеют жесткую рабочую часть и используются при возможности прямого доступа к осматриваемому объекту. Высокое качество изображения в бороскопе обеспечивается

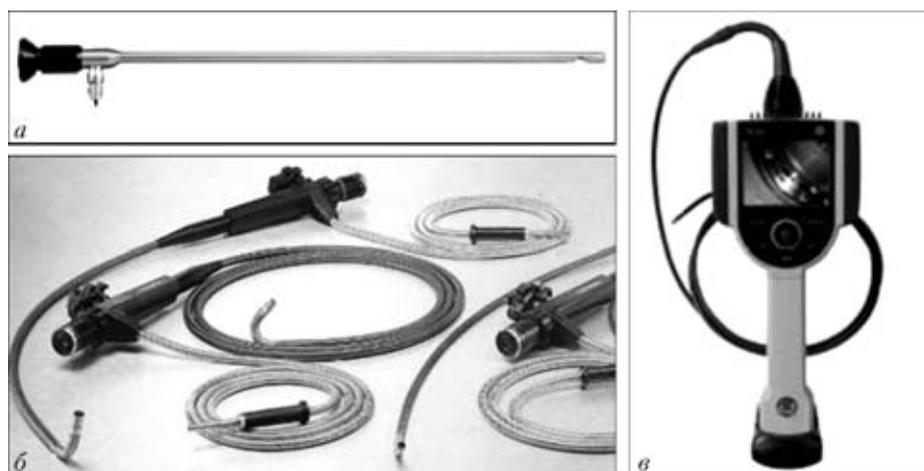


Рис. 1. Промышленные эндоскопы: а — бороскоп; б — фиброскоп; в — видеоскоп

Матрица работоспособности механизма

Уровни (категории) состояния	Факторы работоспособности				
	Состояние неподвижных соединений	Состояние узлов трения	Равномерность распределения сил	Взаимное расположение деталей	Накопление усталостных повреждений
Исправное состояние (хорошее состояние)	Неподвижность сопрягаемых поверхностей	Жидкостное трение	Равномерное распределение нагрузки между резьбовыми соединениями	Пятно контакта соответствует требованиям	Отсутствие трещин
Малые отклонения (удовлетворительное состояние)	Малые перемещения сопрягаемых деталей	Граничное трение	-	Изменение положения пятна контакта (смещение от делительной окружности)	Зарождение трещин
Необходимость проведения ремонтных воздействий (плохое состояние)	Смещения сопрягаемых деталей относительно друг друга — проворачивание	Сухое трение	-	Уменьшение площади пятна контакта до 30 % нормативных значений	Развитие фарфоровидной зоны усталостной трещины
Предотказное (аварийное состояние)	Возникновение ударов при раскрытии и закрытии зазора	Схватывание поверхностей (образование адгезионных связей)	Нагрузка воспринимается одним элементом	Снижение размеров пятна контакта до 10...20 % нормативного значения	Развитие зоны ускоренного разрушения усталостной трещины

оптической системой из твердотельных линз. Подсветка рабочей зоны обеспечивается от внешнего источника света через съемный световод. Простота и удобство в работе при высоком качестве изображения являются основными преимуществами приборов данного типа.

Фиброскопы — эндоскопы с гибкой рабочей частью, применяются для осмотра труднодоступных зон, для доступа к которым необходимо пройти несколько изгибов. Данные эндоскопы используют передачу изображения с объектива в окуляр по стекловолоконному жгуту с регулярной укладкой волокон. Дополнительные жгуты с нерегулярной укладкой волокон, также проходящие внутри рабочей части, используются для передачи подсветки в зону осмотра от наружного источника света. Возможность управления изгибом головной части существенно упрощает прохождение обследуемых полостей. Фиброскопы могут использоваться совместно с видео- или цифровой фотокамерой для документирования (записи) эндоскопических изображений.

Видеоэндоскопы в наибольшей степени отвечают требованиям визуального осмотра металлургических машин, к которым следует отнести необходимость освещения объекта; защиту объектива и удлинительной трубки от механического контактного повреждения; высокую устойчивость объектива к воздействию воды и масла; возможность изменять и фиксировать направление осмотра при использовании полужестких (гибких) зондов; автоматическую настройку контраста и фокусировки.

Основными характеристиками видеоскопов, используемых для осмотра металлургических машин, по мнению авторов, должны быть следующие:

- автономность и портативность видеосистемы;

- возможность использования сменных оптических объективов: с широким и узким полем зрения; с различной глубиной фокусировки, обеспечивающей обзор объектов с расстояния 3...5 и 100...250 мм; с прямым и боковым направлением обзора; желательное использование измерительных объективов;

- возможность использования взаимозаменяемых зондов диаметром 3...5 и 8...12 мм при общем и детальном осмотре;

- желательное дистанционное управление объективом в одной или двух плоскостях;

- использование светодиодной подсветки, обеспечивающей регулируемую освещенность объекта в пределах 1000...2000 лк;

- автоматическая или ручная экспозиция;

- длина полужесткого зонда 1,0...2,0 м;

- функция цифрового увеличения изображения до десятикратного должна обеспечиваться характеристиками видеоматрицы;

- простое управление;

- прочный корпус, защита от ударов, пыли и влаги;

- четкий цветной жидкокристаллический дисплей и передача изображения на компьютер для документирования.

Специальные требования к эндоскопическому оборудованию — возможность осмотра оборудования во время кратковременных остановок оборудования на мониторах поста управления, использование стробоскопического эффекта или стоп-кадра при анализе изображения вращающихся объектов, дистанционное изменение угла осмотра объекта.

Формирование справочника визуальных признаков технического состояния деталей ме-



анизмов. Эффективность использования визуального осмотра во многом определяется квалификацией оператора, его умением распознать характерные признаки поврежденной поверхности и провести диагностирование — установить категорию технического состояния. Определяемые в настоящее время дефекты: трещины, задиры, следы схватывания поверхности, коррозия, осповидное выкрашивание, очаги коррозии, правильность расположения деталей, забоины, прогары [5]. К сожалению, простая констатация наличия данных повреждений не позволяет установить категорию технического состояния объекта.

Так, обычно различают следующие виды повреждений [5].

Трещины — разрывы деталей, преимущественно двухмерного характера. Ограничивающие поверхности трещин часто располагаются перпендикулярно к поверхности детали. *Абразивный износ* — участки с повышенной шероховатостью вдоль направления действия абразива. *Цвета побегалости* — дефект поверхности в виде пятнистой (от желтого до синевато-серого цвета) оксидной пленки. *Пятна ржавчины* — дефект поверхности в виде пятен или полос с рыхлой структурой оксидной пленки. *Вмятины* — дефект поверхности в виде произвольно расположенных углублений различной формы, образовавшихся вследствие повреждений и ударов поверхности. *Риска* — дефект поверхности в виде канавки без выступа кромок с закругленным или плоским дном, образовавшийся от царапания поверхности металла. Могут быть тонкими и широкими.

При трении и изнашивании возникает ряд явлений и процессов, повреждающих и разрушающих поверхности деталей. *Схватывание при трении* — явление местного соединения материалов сопряженных поверхностей вследствие взаимодействия молекулярных сил. *Перенос металла* — явление, состоящее в местном соединении материалов сопряженных поверхностей, последующем его отрыве и переходе материала на другую поверхность. *Заедание* — процесс возникновения

и развития повреждений поверхностей трения вследствие схватывания и переноса материала. *Задыр* — повреждение поверхности в виде широких и глубоких борозд в направлении скольжения. *Царапание* — образование углублений на поверхности трения в направлении скольжения при воздействии выступов твердого тела или твердых частиц с рабочей поверхностью детали. *Отслаивание* — отделение с поверхности трения материала в форме чешуек. *Выкрашивание* — отделение с поверхности трения материала, приводящее к образованию углублений на поверхности трения.

Наиболее сложным является не только распознавание характера повреждения, но и построение логических причинно-следственных цепочек появления зарегистрированных видов повреждений и связи обнаруженных повреждений с фактическим состоянием механизма. Для решения данной задачи предлагается оценить влияние внутренних параметров для соответствующих категорий технического состояния, исходя из факторов работоспособности и уровня отклонения (таблица).

Визуальное проявление категорий технического состояния имеет характерные особенности [6, 7]. При неподвижной посадке наружного кольца подшипника поверхность матовая (рис. 2).

При перемещении контактирующих поверхностей под воздействием переменных сил или вибраций возникает фреттинг-коррозия, которая проявляется в виде интенсивного окисления поверхностей, темных пятен на посадочных поверхностях колец подшипников (рис. 3). Фреттинг-коррозия приводит к стуку, ударам при работе подшипника, а при дальнейшем развитии может служить причиной зарождения усталостных трещин.

Ослабление посадки подшипника часто приводит к проворачиванию подшипника на валу и в корпусе (рис. 4). Проворот подшипника сопровождается увеличением температуры узла, изменением характера шума и вибрации и приводит к недопустимому износу корпусных деталей.

Трещины поперек беговых дорожек — результат воздействия динамических нагрузок, ударов



Рис. 2. Матовая поверхность внутреннего кольца подшипника при неподвижной посадке на вал

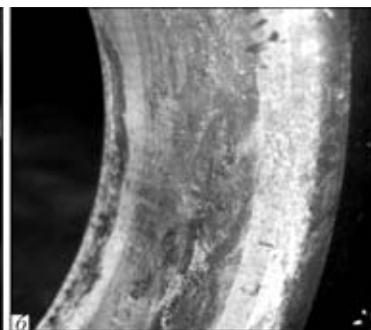


Рис. 3. Следы фреттинг-коррозии на посадочной поверхности наружного (а) и внутреннего (б) колец шарикоподшипника



Рис. 4. Следы проворачивания колец подшипника вследствие ослабления его посадки

Рис. 5. Поперечная трещина на кольце подшипника (а) и сколы бортов кольца (б) при воздействии ударной нагрузки

(рис. 5, а). Сколы бортов колец — результат динамических воздействий осевой силы (рис. 5, б).

Выводы

Применение эндоскопии позволяет уменьшить время осмотра оборудования, исключить операции по разборке и сборке механизмов, продлив тем самым ресурс узлов и деталей металлургических машин.

В настоящее время отсутствуют единые требования к конструированию механического оборудования, предусматривающие возможность проведения эффективного эндоскопирования.

Назревает необходимость разработки справочника повреждений деталей и узлов механического оборудования относительно категорий технического состояния, исходя из факторов работоспособности и уровней отклонения.

1. *Правила* технической эксплуатации механического оборудования блюмингов и непрерывно-заготовочных станков. — М.: Металлургия, 1979. — 192 с.
2. *Правила* технической эксплуатации механического оборудования доменных цехов. ВНИИОЧЕРМЕТ. — М.: Металлургия, 1968. — 212 с.
3. *Правила* технической эксплуатации механического оборудования конвертерных цехов металлургических предприятий. ВНИИМЕХЧЕРМЕТ. — М.: Металлургия, 1984. — 79 с.
4. *Кравченко В. М., Сидоров В. А., Седуш В. Я.* Техническое диагностирование механического оборудования / Учебник. — Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2009. — 459 с.
5. *Визуальный и измерительный контроль* / В. В. Ключев, Ф. Р. Соснин, В. Ф. Мужижкий и др. / Под ред. В. В. Ключева. — М.: РОНКТД, 1998.
6. *Сидоров В. А.* Классификация повреждений подшипников // Оборудование и инструмент для профессионалов. Сер. Металлообработка. — 2009. — **113**, № 3. — С. 76–79; 2009. — **115**, № 4. — С. 70–73.
7. *Сидоров В. А.* Повреждения зубчатых передач: классификация // Там же. — 2010. — **125**, № 3. — С. 28–34.

Поступила в редакцию
23.02.2011

Девятнадцатая ежегодная международная конференция и выставка

«Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»

3–7 октября 2011, Ялта

Организаторы

УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ», Украинское общество НК и ТД, Российское общество НК и ТД, Белорусская ассоциация НК и ТД, Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Днепропетровский нац. ун-т, НПП «Машиностроение»

Тематика конференции и выставки

• Общие вопросы неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД) • Теоретические вопросы взаимодействия физических полей с веществом контролируемых объектов • ТД и мониторинг состояния производственных объектов • Контроль напряженного состояния конструкций, изделий и сварных соединений • Опыт и перспективы НК на предприятиях горно-металлургического комплекса • НК и ТД в нефтегазовой отрасли и энергетике • Контроль и диагностика строительных конструкций • Вибрационные методы диагностики • Вопросы обучения, аттестации и сертификации специалистов, подразделений НК и ТД • Разработка и гармонизация стандартов в области НК и ТД • Метрологическое обеспечение средств НК • Состояние и развитие НК и ТД в Украине • Заседание Правления УО НКТД

В работе выставки предполагается участие представителей фирм: НПП «Машиностроение», НПП «Ультракон», НПП «Диагностические приборы», НПП «ИНТРОН-СЭТ», НПП «Ультракон-сервис», МЧТПП «Онико», Фирмы «GE Inspection Technologies», SEIFERT, «Krautkramer», «Интек», НПП «КонТест», ППЦ «Диагностика и контроль», «Кром», «Шерл», «Сперанца-Украина», ЗАО НИИ МНПО «Спектр», ЗАО «Константа», Микроакустика, Панатест (Россия), АО «VOTUM»-АО «Интроскоп» (Молдова) и др.

Информационная поддержка

Журналы: «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», «Сварщик», «В мире неразрушающего контроля», сборник ВАК Украины «Системные технологии», бюллетень УО НКТД «НК-Информ», Сайт УО НКТД: www.usndt.com.ua, сайт НПП «Машиностроение»: www.ndt.in.ua

Оргкомитет

02094, г. Киев, ул. Минина, 3, к. 47
тел./факс: (+38 044) 5733040
e-mail: office@conference.kiev.ua,
www.conference.kiev.ua



ДИПЛОМ

ПРЕЗИДІЯ
НАЦІОНАЛЬНОЇ
АКАДЕМІЇ НАУК
УКРАЇНИ

На своєму засіданні 16 лютого 2011 року присудила

премію імені Є.О. Патона

академіку НАН України

Назарчуку Зіновію Теодоровичу,

доктору технічних наук

Недосеці Анатолію Яковичу,

доктору технічних наук

Скальському Валентину Романовичу

за цикл праць

"Акустико-емісійна діагностика матеріалів
і конструкцій"

Президент
Національної академії наук
України
академік НАН України
Б.Є. Патон

Головний учений секретар
Національної
академії наук України
академік НАН України
А.Г. Загородній



10-я ЮБИЛЕЙНАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА «NDT RUSSIA – 2011 НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

Для специалистов сферы неразрушающего контроля первый весенний месяц был ознаменован важнейшим событием отрасли: в Москве, на территории СК «Олимпийский» состоялась 10-я Юбилейная международная выставка и конференция «NDT RUSSIA – 2011 Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности».

Выставка проводилась при официальной поддержке государственных структур и специализированных ассоциаций: **Федерального космического агентства, Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД), Департамента науки и промышленной политики Москвы.**

Представители официальной поддержки приняли участие в единой церемонии официального открытия выставок «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности» и «Покрытия и обработка поверхности», которые по традиции проводятся совместно.

Подобное проведение выставок очень актуально, поскольку тематические разделы и область применения представленных товаров и услуг взаимно дополняют друг друга, и посетители с удовольствием посещают обе экспозиции.

Выставка NDT RUSSIA – 2011 собрала на одной площадке производителей оборудования и специалистов отрасли НК, и как утверждают участники, позволила не только наиболее выгодно продемонстрировать новое оборудование и современные технологии, но и установить прямые деловые контакты для эффективного сотрудничества как с уже существующими, так и с потенциальными клиентами.

Основой демонстрации на выставке послужили разделы: техногенная диагностика, экологическая диагностика, лабораторный контроль, антитеррористическая диагностика.

Экспозиция выставки включала демонстрацию разработок и достижений более 110 компаний из России, Германии, Нидерландов, Украины и Израиля.

Из года в год выставка NDT RUSSIA доказывает свою значимость для профессионалов и специалистов отрасли. Подтверждением этому являются компании, которые на протяжении 10 лет принимали участие в выставке и в этом году отмечали юбилей вместе с проектом, за что были награждены специальными дипломами и подарками от ор-

ганизаторов. Это компании Акустические Контрольные Системы, Аптек, Вотум, Интерюнис, Диагност, Константа, Кропус-ПО, ЛУЧ, Олимпас Москва, Спектрофлэш, Стройприбор, Тестрон, Технотест.

Помимо интересной экспозиции, посетителей и участников выставки привлекала насыщенная деловая программа. В этом году в рамках мероприятия РОНКТД были организованы круглые столы: «Техническая диагностика рельсовых путей», «Вихретоковая дефектоскопия металлоконструкций», «Многоракурсные рентгеновские сканеры», «Диагностирование опасных ситуаций в атомной энергетике».

Кроме того, в формировании деловой программы в этом году активно участвовали сами экспоненты. Свои семинары организовали компании: ИНТЕРПРИБОР, СИНЕРКОН, компания ZETEC (Канада), Virtual Media Integration (США), Пергам Инжиниринг, Интрон Плюс.

Деловая программа завершилась в последний день выставки награждением победителей конкурса дефектоскопистов, организованного НУЦ Качество при содействии РОНКТД.

Традиционно в рамках мероприятия проведен конкурс новейших достижений и разработок в области неразрушающего контроля «Инновация НДТ», победители которого были награждены дипломами и специальными призами:

III место — Ультразвуковой дефектоскопотограф для бетона А1040 MIRA (ООС «Акустические Контрольные Системы»);

II место — Система контроля Dolphin G3 (МНПО «Спектр»);

I место — Георадар для коммунального хозяйства «Цитрин» ГОРО «АКА-ГЕО».

Кроме того, дипломом и специальным призом от РОНКТД был награжден Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» за разработку портативной гамма-камеры «Гаммавизор».

Совместно с проектом NDT RUSSIA традиционно работала «Международная выставка «MERATEK – Измерительные Приборы и Промышленная Автоматизация», которая позволила продемонстрировать новейшее контрольно-измерительное оборудование, которое традиционно используется при технической диагностике.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ВЫСТАВКИ
ПАТОН ЭКСПО

12–14 апреля 2011 г. в выставочном центре «КиевЭкспоПлаза» состоялся международный промышленный форум ПАТОН ЭКСПО, который каждый год весной проводит НТК «Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины».

В рамках выставки «Неразрушающий контроль–2011» 12–13 апреля проходила Международная научно-техническая конференция «Остаточный ресурс и проблемы модернизации систем магистральных и промышленных трубопроводов». В ее работе приняли участие ученые и ведущие специалисты ряда институтов Национальной академии наук Украины, ГК «Укртрансгаз», НАК «Нефтегаз Украины», ОАО «Укртранснефть», МВТУ им. Н. Э. Баумана, ОАО «Газпром», сертификационных центров и других организаций.

Открыл конференцию зам. директора ИЭС им. Е.О. Патона академик НАН Украины **Л. М. Лобанов**. Он отметил, что в странах СНГ в исторически короткий срок была создана уникальная по протяженности и производительности система трубопроводов для транспорта природного газа, нефти и продуктов их переработки. Протяженность магистралей превышает 250 тыс. км, при этом преобладают в этой системе трубопроводы большого диаметра, работающие при высоком давлении. Газотранспортная система Украины, включая магистральные газопроводы и газопроводы ответвления, имеет суммарную длину более 35 тыс. км. Транспорт нефти осуществляется по магистральным трубопроводам общей длиной более 4,6 тыс. км. Работу системы обеспечивают около 40 нефтеперекачивающих и более 70 компрессорных станций.

Интенсивное строительство магистральных трубопроводов в Украине было начато в 1960-х годах, а основные, в том числе транзитные трубопроводы большого диаметра, были проложены в 1970–1980-х годах. Таким образом, большая часть трубопроводов эксплуатируется уже длительное время. По этой причине весьма актуальными являются проблемы оценки технического состояния и остаточного ресурса магистральных трубопроводов.

Серьезность проблемы заключается в том, что уровень таких работ во многих случаях не соответствует современным требованиям диагностики объекта. В основном эти работы ограничиваются проведением внутритрубной диагностики с выявлением мест коррозионного повреждения металла. Вместе с тем, определение реального состояния действующих трубопроводов и оценка ресур-

са их эксплуатации требуют комплексного подхода при проведении диагностических работ.

Обеспечение безопасной и надежной работы систем трубопроводного транспорта в значительной степени достигается своевременным выполнением ремонтно-восстановительных работ и реконструкции. Важная роль в выполнении таких работ принадлежит сварочным работам. Поэтому не случайно одновременно в выставочном центре проводятся совместные выставки: по трубопроводному транспорту, сварке и родственными технологиям, неразрушающим методам контроля и диагностики.

В пленарном режиме на конференции было заслушано 30 докладов. Наибольший интерес был проявлен к докладам: Е. М. Вышемирского (ОАО «Газпрома») «Техническая политика ОАО «Газпром» в области сварочного производства»; А. Я. Красовского, И. В. Лохмана, И. В. Орыняка (ИПП НАНУ) «Оценка остаточного ресурса магистрального трубопровода, поврежденного стресскоррозией»; В. И. Махненко, А. С. Миленина, О. И. Олейника (ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ) «Современные проблемы ремонта сухопутных магистральных трубопроводов без вывода их из эксплуатации»; Ю. В. Банахевича, И. В. Лохмана, И. З. Буры (ГК «Укртрансгаз») «Прогнозирование остаточного ресурса трубопровода с учетом эксплуатационных условий нагружения»; В. А. Троицкого, А. И. Бондаренко (ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ) «Ультразвуковой контроль протяженных и труднодоступных участков трубопроводов»; В. С. Романюка (ГП «ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ») «Способ и конструкции, обеспечивающие ликвидацию аварий, связанных с подводной добычей и транспортировкой нефти и газа»; В. С. Бута, О. И. Олейника (ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ) «Новые технологии ремонта магистральных трубопроводов» и др.

Участники конференции отметили существенный вклад ее в решение проблем обеспечения, эксплуатации, надежности систем трубопроводного транспорта.

12–14 апреля 2011 г. в рамках выставки «Неразрушающий контроль–2011» прошла 12-я Международная специализированная конференция-выставка «Неразрушающий контроль–2011». Организатор – Ассоциация «ОКО».

Конференция-выставка по проблемам и достижениям в области неразрушающего контроля проходит ежегодно уже в течение двенадцати лет и пользуются поддержкой ряда таких ведущих



украинских организаций, институтов и компаний, как: *Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины; Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики (УОНКТД); Национальная акционерная компания «Нафтогаз Украины»; Национальная атомная энергогенерирующая компания «Энергоатом»; Государственная администрация по железнодорожному транспорту «Укрзалізниця»; Национальный авиационный университет; Госпотребстандарт Украины и др.*

В работе конференции-выставки активно участвовали отечественные и зарубежные компании и специалисты из стран СНГ и дальнего зарубежья: «ИНТРОН - СЭТ» НПП (Украина); ИНЕТЕК – Институт ядерных технологий (Хорватия); «КАЧЕСТВО» Научно-Учебный Центр (Россия); НКЦЕНТР (Россия); «ОНИКО» МЧТПП (Украина); «ПРОМПРИЛАД» НПФ (Украина); «ПРОМТЕХНОЛОГИИ» НТЦ (Украина); «СИНТЕЗ НДТ» ЗАО (Россия); «СПЕКТРОФЛЕШ» ООО (Россия); «СПЕКТРОИМПУЛЬС» ООО (Россия); «СИНЕРКОН ООО (Россия); «ТД «ТЕХНЕКОН» (Россия); TIME GROUP, Ltd (Китай), «УкрНИИНК» (Украина); «УКРАИНСКОЕ ОБЩЕСТВО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ»; НПФ «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» (Украина), ООО «КВАРЦ» (Украина), «ФАРМЕК» НП ОДО (Беларусь), ЦНИИТМАШ НПО (Россия); «ШЕРЛ OLYMPUS» ООО (Украина).

В рамках конференции работали секции «ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА – ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ», «АТОМНАЯ И ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА», а также был проведен семинар по обмену опытом между органами по сертификации персонала по неразрушающему контролю, учебными и аттестационными центрами «Сертификация персонала в области НК».

На пленарном заседании со вступительной речью выступил председатель Организационного комитета Луценко Г.Г. Он отметил, что НК стремительно развивается в Украине и в этой связи выставки-конференции «Неразрушающий контроль» становятся особенно актуальными, способствуя развитию и укреплению экономики нашей страны, международных связей и сотрудничества. В работе выставки участвуют практически все ведущие украинские производители и поставщики средств НК и ТД, а также ряд зарубежных компаний.

Большой интерес вызвали экспонаты выставки: современные приборы и материалы для дефектоскопии и диагностирования промышленных изделий и сооружений, разработанные и изготовленные в Украине, России и др. странах.

Подводя итоги конференции-выставки «Неразрушающий контроль–2011» можно с уверенностью констатировать, что все участники достигли поставленных перед собой целей и подтвердили своё желание принимать участие в таких мероприятиях и в дальнейшем.

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ

Объявляет ежегодный набор в

ДОКТОРАНТУРУ по специальностям:

- сварка и родственные технологии
- автоматизация технологических процессов
- металловедение и термическая обработка металлов
- металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

АСПИРАНТУРУ по специальностям:

- сварка и родственные технологии
- автоматизация технологических процессов
- металловедение и термическая обработка металлов
- металлургия высокочистых металлов и специальных сплавов

Прием в аспирантуру проводится в сентябре месяце.

Контактный телефон: 289-84-11

Подробная информация на сайте института (раздел аспирантура):

www.paton.kiev.ua

Документы направлять по адресу: 03680, Украина, Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ученому секретарю



7-я НАЦИОНАЛЬНАЯ ВЕНГЕРСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ

С 12 по 15 апреля 2011 г. по приглашению Совета Международной Академии неразрушающего контроля (ANDTI) делегация УОНКТД приняла участие в 7-й Национальной венгерской конференции по неразрушающему контролю, которая состоялась в г. Эгере (Венгрия). Город с тысячелетней историей гостеприимно встретил участников конференции, в рамках которой прошли третьи научные чтения, организованные ANDTI. На конференции были представлены пять лекций, посвященных фундаментальным научным подходам к проблемам неразрушающего контроля.

1. Прогнозирование разрушений и нанотехнология. Автор – *Норберт Кроо* (вице-президент Венгерской Академии наук, директор Института физики твердого тела и оптики) сообщил о достижениях в области исследования изображений с помощью туннельного сканирующего микроскопа. Такая техника позволяет изучать топологию поверхности с разрешением, близким к 1 нм.

2. Микромагнитное исследование усталостных трещин микроструктур стали для применения при неразрушающем контроле в области ядерной энергии (температурное старение, усталость и нейтронное охрупчивание). Автор – *Герд Добман* (советник директора Фраунгоферского Института неразрушающего контроля) доложил об исследованиях усталостных изменений в сталях с помощью методологии микромагнитного неразрушающего контроля. Отмечены многочисленные зависимости между прочностными свойствами материалов и такими усталостными явлениями, как термальное старение, усталость металла и нейтронное охрупчивание. В рамках мероприятий по обеспечению ядерной безопасности проведение постоянного мониторинга усталости является чрезвычайно важным. Для его реализации особо перспективным является on-line контроль микроизменений структуры металла путем использования наукоемных сенсоров, объединенных в сети. Особое внимание при этом уделяется процедурам микромагнитного контроля и технике контроля, использующей эффект изменения электропроводности.

3. Применение рентгеновских методов для изучения микродефектов. Автор – *Янош Лендвэй* (руководитель отдела физики материалов, Будапештский университет) рассказал о новых направлениях: методе уширения рентгеновских структурных линий и рентгеновской томографии, которые позволяют получать количественную информацию о неоднородностях и дефектах микроструктуры. Метод уширения линий или анализ

дифракции (XLPA) является наиболее эффективным методом исследования микроструктуры кристаллических материалов, в том числе металлов. Причина уширения дифракционных линий – наличие в кристаллической структуре доменов, дислокаций, двойных границ и точечных дефектов, а также вакансий. Метод XLPA позволяет получить информацию как о типе дефекта, так и их плотности одновременно.

Для 3-D микроструктурного анализа гетерогенных материалов весьма перспективным является применение рентгеновской томографии. Такой подход позволяет исследовать объекты структуры размером менее микрона. Использование синхротронного излучения позволяет значительно повысить разрешение, а применение усовершенствованной рентгеновской оптики дополнительно увеличивает разрешение до 100 нм и менее. Применение для обработки экспериментальных данных мощных численных методов дает возможность определять свойства и ресурс конструкций.

4. Нелинейная суперпозиция волн — перспективный метод передачи, оценки и метрологической обработки информации. Автор – *Серж Дос Сантос* (Университет Блуа) прочитал лекцию о передаче информации с помощью модуляции электромагнитных волн. Благодаря использованию частотного диапазона, в котором волны легко распространяются, появляется возможность оптимизации электромагнитных сигналов. Этот принцип является краеугольным камнем при передаче информации. Его внедрение в совокупности с соответствующей метрологией частотной стабильности дает возможность использовать свойства суперпозиции частот. Такой подход в неразрушающем контроле (нелинейная суперпозиция акустических волн) представляется перспективным для проведения неразрушающего контроля ультразвуковым методом и позволяет повысить чувствительность испытаний композитов. В настоящее время этот метод рекомендован для локального определения механических свойств и старения на микроуровне биоматериалов. Различные методы нелинейной спектроскопии с использованием упругих волн (NEWS) отличает единая схема контроля и перспектива применения для неразрушающих испытаний композитов.

5. Исследование коррозионной усталости железнодорожных осей. Автор – *проф. Стефан Берта* доложил о многолетних исследованиях процессов старения, усталости в сочетании с коррозионными изменениями в межкристаллитных



структурах, что является предвестником образования трещин и разрушения осей колесных пар.

Все заслушанные выступления отличает высокий научный уровень и актуальность изложенного материала. Следует также отметить атмосферу доброжелательности и понимания, которая характерна для всех заседаний ANDTI.

В соответствии с планом работы Академии следующие научные чтения состоятся 14 ноября 2011 г. в Брешиа (Италия).

На заседании Совета ANDTI принято решение об издании «Трудов Международной Академии неразрушающего контроля».

Издание должно выйти под девизом «Окно в будущее НК» и издано к началу Всемирной конференции по NDT в г. Дурбане (ЮАР) в 1912 г. В торжественной обстановке были приняты новые члены ANDTI: проф. P. Trampus, президент Венгерской ассоциации NDT; проф. Н. Кроо, вице-президент Венгерской акаде-



Участники заседания ANDTI (слева направо): Serge Dos Santos, Париж; Казакевич М.Л., Киев; Бабицкая Н.П., Киев; Cerd Dobmann, Saarbrucken; Троицкий В.А., Киев; Peter Trampus, Будапешт; Пушкина П.Ю., Москва; Uwe Ewert, Берлин

мии наук, директор Института физики твердого тела и оптики.

*В.А. Троицкий, ИЭС им. Э.О. Патона НАНУ
М.Л. Казакевич, ИФХ им. Л.В. Писаржевского НАНУ*



АТТЕСТАЦИЯ СЛОВЕНСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ

В марте 2011 г. ИЭС им. Е.О.Патона и Центр сертификации при Украинском обществе по неразрушающему контролю посетили специалисты компании ECOPLIN ZADEL d.o.o. из Словении, занимающейся мониторингом состояния резервуаров для хранения газо- и нефтепродуктов. Основным направлением деятельности этой компании длительное время являлась диагностика состояния подземных резервуаров для хранения газа на автостоянках с помощью гидравлических испытаний. В связи с трудоемкостью этих испытаний и отсутствием возможности компьютеризации процесса в настоящее время компания переориентировалась на мониторинг состояния сосудов и резервуаров методом акустической эмиссии. Еще задолго до приезда словенских специалистов в Украину Центром сертификации были проведены длительные переговоры с руководителем компании ECOPLIN ZADEL d.o.o., в ходе которых обсуждались детали предстоящего обучения пяти специалистов с последующей их аттестацией и сертификацией.

После успешной сдачи экзаменов специалистам были вручены сертификаты компетентности I и II уровней квалификации.



Атестованные (в центре) словенские специалисты НК и преподаватели ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ

Словенские коллеги поблагодарили преподавателей – специалистов III уровня по разным методам неразрушающего контроля сотрудникам ИЭС им. Е.О.Патона и ЦС при УОНКТД и выразили желание приехать в Украину снова, чтобы продолжить изучение других методов НК.

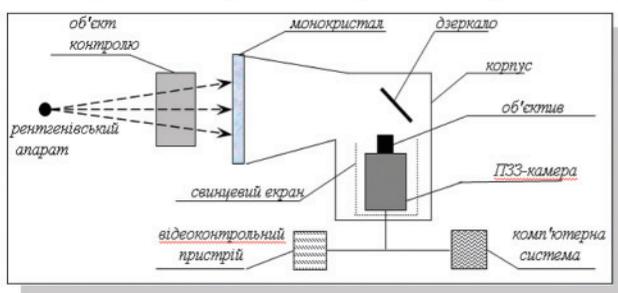
Н.В.Троицкая, ИЭС им. Э.О. Патона НАНУ



АКЦИЯ,

в которой может принять участие организация, располагающая источником R-излучения непрерывного действия – на объектах этой организации проводится бесплатно РТ- контроль с использованием разработанной ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины аппаратуры

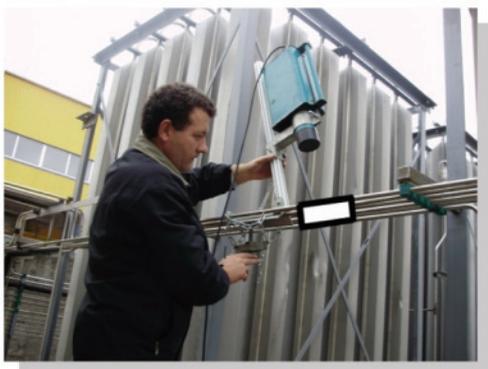
В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины создан экспериментально-промышленный образец портативной рентгентелевизионной системы (РТ) с использованием монокристаллического экрана CsI(Tl) и телевизионной камеры на основе высокочувствительной ПЗС-матрицы, благодаря чему появилась реальная возможность для применения рентгеноскопического контроля в полевых условиях с цифровой обработкой результатов контроля без промежуточных носителей информации (типа пленок, полупроводниковых пластин и т.д.).



Структурная схема портативной РТ

Основные преимущества созданной РТ:

- высокая производительность и мобильность;
- высокое разрешение и стабильность изображения;
- низкая стоимость контроля;
- возможность контроля движущихся объектов;
- высокоэффективная цифровая обработка изображений;
- возможность архивирования изображений;
- небольшие габариты детектора РТ.



Установка аппаратуры на объекте



Наблюдение R-изображения на экране ноутбука

Данная рентгентелевизионная система обеспечивает чувствительность радиационного контроля порядка 1,5 – 2 %, что соответствует чувствительности пленочных систем. Использование данного оборудования снижает почти в 10 раз стоимость рентгеновского контроля металлоконструкций, в том числе трубопроводов.



Э. Ф. ГАРФУ – 70

Исполнилось 70 лет доктору технических наук, главному научному сотруднику отдела новых конструктивных форм сварных сооружений и конструкций ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, лауреату Государственной премии Украины, Премии им. академика М. С. Будникова Академии строительства Украины, известному ученому в области прочности материалов и конструкций **Гарфу Эдуарду Феофиловичу**.

После окончания в 1962 г. Киевского инженерно-строительного института творческая, трудовая и научная деятельность Эдуарда Феофиловича Гарфа непрерывно связана с Институтом электросварки, где он возглавлял отдел новых конструктивных форм сварных сооружений и конструкций.

Приоритетными в научной деятельности Э. Ф. Гарфа были исследования прочности и долговечности сварных конструкций и разработка методов расчета сварных соединений в металлоконструкциях из труб. Особое внимание он уделяет исследованиям прочности узловых соединений в решетчатых конструкциях из элементов полого сечения. В 1970 г. Э. Ф. Гарф защитил кандидатскую диссертацию, а в 1987 г. — докторскую.

Эдуардом Феофиловичем разработаны аналитические методы расчета напряженно-деформированного состояния элементарных узлов, которые в сочетании с экспериментальными исследованиями позволяют получить оценку несущей способности для более сложных соединений, а также метод оценки прочности трубчатых узлов, учитывающих реальные условия нагружения. Эти разработки использовались при проектировании глубоководных оснований для добычи нефти и газа.

Эдуард Феофилович занимается исследованием прочности сварных конструкций, которые исчерпали свой плановый ресурс, а также влиянием эксплуатационных повреждений конструкций на их остаточный ресурс. Э. Ф. Гарф является активным участником проекта по созданию нового укрытия поврежденного реактора на ЧАЭС, участвует в разработке ряда нормативных документов, которые регламентируют проектирование сварных конструкций и определение остаточного ресурса при наличии эксплуатационных повреждений.

Э. Ф. Гарф — автор и соавтор около 120 научных трудов. Награжден Почетной грамотой Президиума Верховного Совета Украины, Почетной грамотой Президиума НАН Украины.

*Поздравляем Эдуарда Феофиловича с 70-тилетием.
Желаем крепкого здоровья, новых творческих успехов!*



Н. П. МИГУНУ – 60

Исполнилось 60 лет известному ученому в области физики неразрушающего контроля, директору Института прикладной физики НАН Беларуси, председателю Белорусской ассоциации неразрушающего контроля и технической диагностики, действительному члену Международной академии неразрушающего контроля, доктору физико-математических наук **Мигуну Николаю Петровичу**.

Николай Петрович окончил физический факультет, а затем аспирантуру Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук (1992 г.). С 1980 г. работает в Институте прикладной физики НАН Беларуси, в 1993–2004 гг. — заместитель директора института по научной работе, а с 2005 г. по настоящее время — директор института.

Мигун Н. П. — известный в стране и за рубежом ученый в области физики неразрушающего контроля и исследования свойств жидких и капиллярно-пористых материалов. Им созданы научные основы материаловедения дефектоскопических средств для НК проникающими веществами, впервые установлены и определены свойства дефектоскопических материалов, характеризующие чувствительность контроля, построена теория гидродинамических процессов капиллярной дефектоскопии, впервые обнаружен и объяснен ряд физических явлений, лежащих в основе капиллярной дефектоскопии, разработаны и внедрены программно-аппаратные средства определения уровня чувствительности дефектоскопических материалов. За эти работы дважды удостоивался премий НАН Беларуси (1990 и 2001 гг.). В 2009 г. награжден медалью Франциска Скорины.

Николай Петрович — автор более 200 научных работ, среди которых 6 монографий и учебных пособий. Важнейшие результаты его исследований отражены в первой в мире монографии по теории явлений и процессов, лежащих в основе капиллярной дефектоскопии «Введение в теорию капиллярного контроля» (1988 г.) и в опубликованной в 1999 г. в Германии монографии «Theoretical principles of liquid penetrant testing».

Научные работы Мигуна Н. П. широко известны за рубежом, он неоднократно стажировался и проводил совместные исследования с коллегами ведущих научных центров Франции, США, Германии. Его отличают огромная работоспособность и доброжелательное отношение к людям, готовность помочь словом и делом.

Поздравляем Николая Петровича с юбилеем! Желаем творческого вдохновения, новых научных идей и долголетия!

ПОДПИСКА—2011 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	52 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) 200-82-77, 205-23-90; факс: (38044) 200-54-84, 200-82-77.

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) (400x 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 7.06.2011. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
 Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отг. 9,6. Уч.-изд. л. 9,2+4 цв. вклейки.
 Цена договорная. Печать ООО «Фирма «Эссес»,
 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.