

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

№ 2, 2010

Издается с января 1989 г.

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

Издатель: Международная ассоциация
«Сварка»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:
Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

А. Я. Недосека (зам. гл. ред.),
В. А. Троицкий (зам. гл. ред.),
З. А. Майдан (отв. секр.),
Н. П. Алешин, А. И. Бондаренко,
В. Л. Венгринович, А. А. Грузд,
А. Т. Зельниченко, М. Л. Казакевич,
О. М. Карпаш, В. В. Ключев,
А. А. Лебедев, Л. М. Лобанов,
Г. Г. Луценко, З. Т. Назарчук,
Н. В. Новиков, Г. И. Прокопенко,
В. А. Стороженко, В. А. Стрижало,
В. Г. Тихий, В. Н. Учанин,
С. К. Фомичев, Н. Г. Чаусов,
В. Е. Щербинин

Адрес редакции:

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

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

Редактор:
Т. В. Юштина

Электронная верстка:
Л. Н. Герасименко, Д. И. Середа,

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

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А. Об оценке надежности эксплуатирующихся конструкций (состояние вопроса и перспектива развития)..... 7

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

УЧАНИН В. Н. Автогенераторные вихретоковые дефектоскопы: основные принципы, классификация, сравнительный анализ (Обзор) 18

МАЕВСКИЙ С. М. Относительная достоверность – объективная оценка качества контроля 24

САНДОМИРСКИЙ С. Г. Анализ режимов магнитного контроля качества термической обработки среднеуглеродистых сталей 28

ПАВЛЮЧЕНКО В. В., ДОРОШЕВИЧ Е. С. Распределение составляющей напряженности магнитного поля, прошедшего через электропроводящие объекты 32

КОШЕВОЙ В. В., РОМАНИШИН И. М., РОМАНИШИН Р. И., ШАРАМАГА Р. В. Ультразвуковая компьютерная томография на основе регистрации рассеянного структурой материала сигнала (Часть 1) 37

КОСТИВ Б. В., КИСИЛЬ И. С. Усовершенствование методики профилирования при бесконтактном контроле изоляционного покрытия подземных металлических трубопроводов 43

ДУБОВ А. А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования 49

БОРЯК К. Ф., ЗОРИЧ Э. А., КАЛАШНИК В. А., СИЛКИН В. И. Методика вибрационных испытаний на прочность и определения технического состояния карданных валов на стенде «ВИК-4000» 55

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

9-я Международная выставка и конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности – NDT RUSSIA» 61

Отраслевое совещание ГК «Укртрансгаз» «Повышение надежности и эффективности работы линейной части магистральных газопроводов газотранспортной системы» 62

Поздравляем юбиляра! 63

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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



Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

TECHNICAL DIAGNOSTICS and NON-DESTRUCTIVE TESTING

№ 2, 2010

Founded in January, 1989

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

Publisher: International Association «Welding»

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B. E. PATON

A. Ya. Nedoseka (vice-chief ed.),
V. A. Troitsky (vice-chief ed.),
Z. A. Maidan (exec. secr.),
N. P. Aleshin, A. I. Bondarenko,
V. L. Vengrinovich, A. A. Gruzd,
A. T. Zelnichenko, M. L. Kazakevich,
O. M. Karpash, V. V. Klyuev,
A. A. Lebedev, L. M. Lobanov,
G. G. Lutsenko, Z. T. Nazarchuk,
N. V. Novikov, G. I. Prokopenko,
V. A. Storozhenko, V. A. Strizhalo,
V. G. Tikhy, V. N. Uchanin,
S. K. Fomichev, N. G. Chausov,
V. E. Shcherbinin

Address:

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

Scientific editors:

N. G. Bely, A. A. Gruzd

Editors:

T. V. Ushtina

Electron galley:

L. N. Gerasimenko, D. I. Sereda

State Registration Certificate
KV 4787 of 09.01.2001.
All rights reserved.

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

CONTENTS

NEWS 3

TECHNICAL DIAGNOSTICS

NEDOSEKA A. YA., NEDOSEKA S.A. On assessment of reliability
of operating structures (current status and development prospects) 7

NON-DESTRUCTIVE TESTING

UCHANIN V.N. Self-oscillating eddy current flaw detectors: main
principles, classification, comparative analysis (Review) 18

MAEVSKII S.M. Relative validity - objective assessment of
quality control 24

SANDOMIRSKII S.G. Analysis of the modes of magnetic
inspection of the quality of heat treatment of medium-carbon steels 28

PAVLYUCHENKO V.V., DOROSHEVICH E.S. Distribution of
the normal component of intensity of magnetic field, which has
passed through electrically conducting objects 32

*KOSHEVOJ V.V., ROMANISHIN I.M., ROMANISHIN R.I.,
SHARAMAGA R.V.* Ultrasonic computer tomography based on
recording of a signal scattered by material structure (P.1) 37

KOSTIV B.V., KISIL I.S. Improvement of profiling procedure at
contactless testing of insulating coating of underground metal
pipelines 43

DUBOV A.A. Problems of assessment of residual life of
ageing equipment 49

K.F.BORYAK, E.A.ZORICH, V.A.KALASHNIK, V.I.SILKIN
Procedure of vibration strength testing and determination of
technical condition of cardan shafts 55

NEWS AND INFORMATION

9th International Exhibition and Conference "Non-destructive
testing and technical diagnostics in industry – NDT RUSSIA" 61

Interindustry meeting of SC "UKRTRANSGAZ" on "Improvement
of reliability and effectiveness of operation of linear portion of the
main gas pipelines of gas transportation system" 62

Jubilee congratulations! 63

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

МНОГО- ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ АКУСТИКО- ЭМИССИОННАЯ СИСТЕМА КАЭМС

ФГУП ЦНИИ им. А. Н. Крылова разработано оригинальное оборудование «Экситон» (прибор и преобразователи) для проведения контроля методом акустической эмиссии с получением результатов контроля в режиме реального времени.

Оригинальной особенностью разработанной аппаратуры «Экситон» является получение оператором результатов контроля в реальном времени. Прибор представляет собой переносную систему, состоящую из ПК блокнотного типа, усилительно-преобразовательного блока с автономным питанием, ПАЭ и кабелей, уложенных в чемодан. В настоящее время имеется несколько модификаций аппаратуры, отличающиеся количеством каналов (от 4 до 32), мощностью центрального процессора, дополнительными программными функциями (например, спектральный анализ), источником питания.



в обслуживании и компактные они служат для измерения толщины стенок изготавливаемого и работающего оборудования, в особенности объектов, подвергающихся коррозии. Модели DM 5E и DM 5E DL имеют режим DUAL MULTI для измерения толщины материала, за исключением толщины покрытия или коррозии. Пригоден для измерения на изделиях из различных материалов. Толщиномер DM 5E прост в управлении, достаточно автоматизирован и не требует квалифицированного персонала. Для обеспечения прибора высокоэффективными характеристиками при работе с высокими температурами компания выпустила новые датчики, способные постоянно работать при температурах от -20 до +204 °С, а при определенных условиях и до +540 °С с частотой 5 МГц, а также датчики для глубокого проникновения с частотой 2 МГц и миниатюрный с частотой 7,5 МГц.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОП «УИУ СКАНЕР»

ООО «АЛТЕС» разработан малогабаритный УЗ дефектоскоп «УИУ-СКАНЕР» — ручной прибор универсального применения для контроля металлов, полиэтилена, пластмасс, керамики. В приборе многообразие

технических возможностей сочетается с простотой управления и компактностью. Хорошие дефектоскопические характеристики, практичная конструкция, яркий электролюминесцентный экран, автономное питание, малые габариты и масса обеспечивают удобство эксплуатации. Дефектоскоп может работать с любыми пьезоэлектрическими преобразователями в рабочем частотном диапазоне.



МАЛАХИТ АС-12А И АС-14А

МАЛАХИТ АС-12А И АС-14А АЭ — системы, выпускаемые ЗАО «НПФ Диатон», отличаются высокой надежностью, удобным пользовательским интерфейсом, конкурентной стоимостью. Аппаратура, набор АЭ преобразователей, стандартное и специализированное программное обеспечение АЭ систем рассчитаны на контроль любых объектов, для диагностики которых применяется метод АЭ. АЭ системы серии «Малахит» используются на предприятиях многих отраслей промышленности.



ТОЛЩИНОМЕР DM 5E

Компанией General Electric выпущен новый толщиномер DM 5E, созданный как обновление семейства толщиномеров Krautkramer DM 4. Простые

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОП ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ DIO-562

ЗАО «Системы Старманс» выпущен УЗ дефектоскоп общего назначения **DIO-562**, предназначенный для контроля продукции на наличие дефектов типа нарушения сплошности и однородности материала в изделиях из металлов и пластиков, для измерения глубины и координат их залегания, измерения отношений амплитуд сигналов от дефектов.



Цифровая обработка сигналов, большой объем памяти, возможность интегрирования в прибор различных методик контроля через интерактивную «СПРАВКУ», оптимизация управления прибором с помощью программирования «горячих клавиш», получение протоколов с А или В изображением или с картой TOFD, запись голосовых комментариев к протоколам контроля, архивы DAC и АРД кривых для любых 100 ПЭП, АСД или В РЧ по DAC и АРД кривым, три независимых строга, возможность работы с любыми ПЭП в диапазоне частот 0,5...15,0 МГц, автоматическая регулировка усиления по опорному сигналу, одноканальное и двухканальное исполнение.

ТОМОГРАФИК 2.1 УД4 – Т

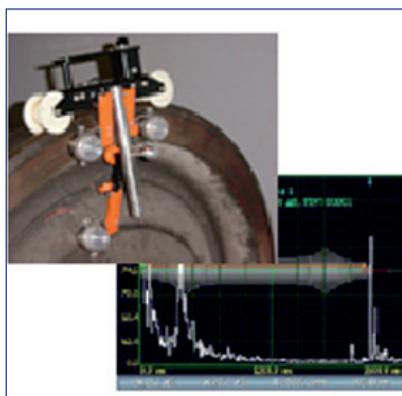
ООО «Votum» разработан УЗ дефектоскоп **ТОМОГРАФИК 2.1 УД4-Т**, предназначенный для контроля колесных пар вагонов в соответствии с РД 07.09-97.



Концепция развития дефектоскопа ориентирована на максимальное уменьшение роли человеческого фактора

Объекты контроля: оси типа РУ, РУ-1, РУ-1Ш; ободья цельнокатаных колес; приободная зона дисков и гребни цельнокатаных колес.

Для контроля колесных пар вагонов разработано сканирующее устройство нового типа – **УСК-4Т**. В отличие от применяемого ранее **УСК-4** оно позволяет отслеживать линейное перемещение ПЭП на колесе и автоматически передавать в дефектоскоп координаты дефектных участков, что очень важно при включении в протокол томографических изображений.



УЛЬТРАЗВУКОВОЙ- НИЗКОЧАСТОТНЫЙ ДЕФЕКТОСКОП A1220

Разработанный фирмой «СПЕКТР – Акустические Контрольные Системы» дефектоскоп **A1220** предназначен для поиска инородных включений, пустот и трещин внутри изделий и конструкций из железобетона, камня, пластмасс и подобных им материалов при одностороннем доступе к объекту контроля. Дефектоскоп можно использовать для измерений толщины изделий, для исследования внутренней структуры материалов и оценки их прочности. Области применения: поиск дефектов в железобетоне и камне, измерения толщины при одностороннем доступе; оценка структуры и прочности неметаллов сквозным прозвучиванием.



АГАТ-М – АНАЛИЗАТОР ВИБРАЦИИ / БАЛАНСИРОВОЧНЫЙ ПРИБОР ДИАМЕХ 2000

АГАТ-М – современный двухканальный анализатор параметров вибрации, лучший в своем классе прибор для проведения 2-х плоскостной динамической балансировки вращающегося оборудования, разработан фирмой «ДИАМЕХ 2000»

В комплекте с прибором поставляется программное обеспечение «Агат-Протокол», которое значительно упрощает процесс разгрузки обработки и хранения данных балансировок.

Использование прибора в качестве коллектора/сборщика данных совместно с программным обеспечением «Диамант-2» позволяет создать полноценную систему прогнозируемого обслуживания оборудования.

Отличительной особенностью прибора «АГАТ-М» является наличие функции экспресс-диагностики подшипников качения, которая по однократному замеру позволяет определить дефекты монтажа, зарождающиеся дефекты подшипников, а также степень их износа.



вых уравнивающих канатов, обнаруживает наружные и внутренние локальные дефекты в виде обрыва проволок и пятен коррозии.

ИНТРОС обеспечивает два режима работы: оперативный, с индикацией на дисплее и самописце текущих значений потери сечения и наличия локальных дефектов, и режим запоминания и передачи данных в компьютер по окончании контроля, с последующей обработкой и представлением отчета.

ПОРТАТИВНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ АППАРАТЫ СЕРИИ «САРМА»

ЗАО «Спектр КСК» запущена в производство серия простых, удобных и надежных при эксплуатации в любых климатических условиях портативных рентгеновских аппаратов **Сарма 300 / Сарма 500**. Изготавливаются с применением новой современной технологии. Отличаются от существующих аналогов сверхмалыми массогабаритными характеристиками.



Предназначены для радиогрaфии в нестационарных условиях, при контроле конструкций в труднодоступных местах, контроле швов трубопроводов. Рабочие комплекты аппаратов укладываются в носимые чемоданы-укладки.

Базовый комплект поставки: рентгеновский излучатель; пульт управления; съемный высоковольтный соединительный кабель; источник бесперебойного питания с преобразователем постоянного напряжения в переменное, с аккумулятором и зарядным устройством; пыле-влагозащитный чемодан-укладка.

ИЗМЕРИТЕЛЬ ЗАЩИТНОГО СЛОЯ БЕТОНА ИПА-МГ4

СКБ Стройприбор разработан микропроцессорный прибор «ПА-МГ4», предназначенный для измерения толщины защитного слоя бетона и расположения стержневой арматуры в железобетонных изделиях и конструкциях магнитным методом.

Прибор «ИПА-МГ4» имеет три основных режима работы: поиск оси арматурного стержня; определение диаметра арматурного стержня при известном защитном слое; определение защитного слоя при известном диаметре.



Для контроля и анализа вибрации газоперекачивающих агрегатов, нефтяных насосов и другого оборудования, установленного во взрывоопасных помещениях категорий В-1а, В-1б, В-1г, прибор может поставляться во взрывозащищенном исполнении.

ИНТРОС — ДВУХКАНАЛЬНЫЙ МАГНИТНЫЙ ДЕФЕКТОСКОП СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ

Компанией Интрон Плюс разработан дефектоскоп **ИНТРОС**, измеряющий вызванную износом относительную потерю сечения канатов круглого сечения, плоских и резинотросо-

ДАМИ-С – НИЗКОЧА- СТОТНЫЙ ДЕФЕКТО- СКОП АВИАЦИОН- НЫХ МАТЕРИАЛОВ

Разработанный ООО «Votum» дефектоскоп ДАМИ-С реализует импедансные, вихрековые и ударные методы контроля и предназначен для обнаружения и построения С-изображений дефектов в композитных материалах и сотовых структурах, а также для выявления коррозии в неферромагнитных сплавах в различных авиационных конструкциях. Благодаря своим уникальным функциональным возможностям, прибор позволяет автоматизировать процесс обнаружения дефектов за счет автоматической настройки преобразователя на объект контроля с учетом плотности и структуры материала.

Основные области применения: авиационная, космическая, судостроительная, автомобильная промышленность и др.



ПОЛИМЕР-4К

Лабораторией неразрушающего контроля и технической диагностики Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа разработана установка **ПОЛИМЕР-4К** для контроля качества пластмассовых труб в процессе их изготовления (одновременный контроль толщины стенки: диаметра и эксцентриситета).

Диапазон диаметров труб – от 20 до 400 мм.

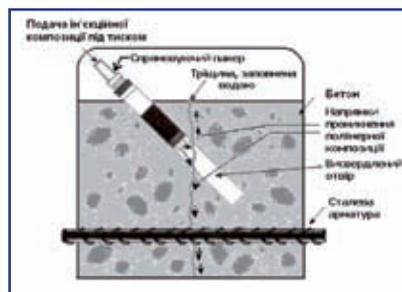
Работа установки базируется на использовании ультразвукового иммерсионного эхоимпульсного метода неразрушающего контроля с применением продольных волн. Контроль осуществляется с помощью четырех пьезоэлектрических ультразвуковых преобразователей, равномерно расположенных по окружности трубы.



С целью обеспечения высоких эксплуатационных и технических характеристик установка осуществляет автоматическую компенсацию влияния температуры охлаждающей среды (воды) и материала трубы на результаты измерений.

ПОЛИУРЕТАНОВА КОМПОЗИЦИЯ ДЛЯ ИН'ЄКТУВАННЯ БЕТОНУ

Учеными Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАНУ розроблено склад нової інгібованої ін'єкційної поліуретанової композиції для підвищення водотривкості та протикорозійного захисту арматури зістарених залізобетонних конструкцій. Досліджено захисну дію неорганічних інгібіторів та їх сумішей по відношенню до корозії арматурної сталі в лужному та слабокислому робочих середовищах, які імітують умови експлуатації нових та зістарених залізобетонних конструкцій. Виявлено синергічний уповільнюючий ефект при використанні суміші нітрату кальцію та



молібдату натрію. Запропоновано механізм осадження захисної плівки на сталі в інгібованому корозійному розчині. Застосування запропонованої композиції зменшує ймовірність розтріскування залізобетону в робочому середовищі. На ін'єкційну композицію одержано патент України № 40707. За сприяння Державного інженерного центру «Техноресурс» проведена дослідно-промислова перевірка нового матеріалу.

ПРОФЕСІОНАЛЬ- НАЯ ПОРТАТИВНА ТЕПЛОВІЗІОННА КАМЕРА

ЗАО «Мир Диагностики» випустил портативну камеру **VarioCAM™**, которая является модульной системой с большим количеством встроенных функций измерения и может поставляться в различных комплектациях. Данная система подходит для широкого спектра промышленных применений, начиная от планово-предупредительных обследований электрических



станций, механического оборудования и анализа производственных процессов и заканчивая контролем качества.



ОБ ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ КОНСТРУКЦИЙ

(состояние вопроса и перспектива развития)

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА

Рассмотрены основные методы оценки состояния материалов конструкций в условиях эксплуатации. Приведены сведения о возможностях различных методов контроля. Рассматривается метод, позволяющий на основе данных акустической эмиссии прогнозировать разрушающую нагрузку и остаточный ресурс конструкций в обычных условиях эксплуатации.

The paper deals with the main methods of assessment of the condition of structure materials under operation conditions. Data on the capabilities of various control methods are given. A method is considered, which allows prediction of the breaking load and residual life of structures under regular operation conditions.

Практика эксплуатации машин, конструкций и сооружений все настойчивее требует создания методов и средств, с помощью которых можно было бы определять их функциональные возможности в любой момент времени как в прошлом, так и в настоящем, а также уметь на базе этих данных получать информацию об их состоянии и поведении в будущем.

Обеспечение безопасности конструкции начинается задолго до пуска ее в эксплуатацию. На *первой стадии* проводятся расчеты, предварительные испытания, проектно-конструкторские и другие работы, связанные с созданием конструкции. Нужно отметить, что прочность объектов, как правило, хорошо обеспечена еще на стадии их проектирования. Проведены расчеты, выбран материал, даны соответствующие запасы, просчитан ресурс конструкции или, что точнее, обеспечен заданный сроком службы ресурс. Однако длительная эксплуатация изделия, нарушение технологии производства и ремонтных работ приводят к необратимым процессам прежде всего в материале, особенно в зонах технологического воздействия, где прочностные свойства нарушаются еще на стадии изготовления. Именно отклонения свойств и структуры материалов конструкции от принятых при расчетах несут основную ответственность за дальнейшую эксплуатацию, причем скорость нарастания таких негативных изменений в материале является решающим фактором. И лишь на *второй стадии* — стадии эксплуатации — начинают проводить мероприятия по контролю ее состояния, оценке ее поврежденности и определению реального остаточного ресурса. На второй стадии, которая наступает после введения конструкции в эксплуатацию, существенную долю неопределенности в фактическое состояние конструкции могут внести случайные просчеты в конструктивных

решениях, нарушения технологии изготовления и эксплуатации, внешняя среда и собственно время эксплуатации. В результате, как уже было сказано, в отдельных локальных областях суммарный объем повреждений может достигнуть критической величины и может начаться разрушение.

Поэтому при разработке мер безопасности основное внимание следует уделять организации мероприятий по приведению условий эксплуатации конструкций в соответствие с техническими требованиями, разработке систем, оборудования и нормативных материалов, обеспечивающих поддержание заданных документацией норм и режимов, поиску методов и средств, которые бы анализировали несущую способность материалов и своевременно предупреждали о ее исчерпании.

Можно отметить, что в настоящее время наука о прочности материалов располагает следующими тремя группами методов, способными решить проблему обеспечения безопасности конструкций.

Первая группа основана на привлечении общих теорий прочности материалов. Они могут быть использованы лишь в случаях, когда предполагаемая авария может произойти в результате не появления трещин, а ослабления несущего сечения конструкции за счет, например, утонения стенки или изменения механических свойств материалов. Такая методика должна применяться после того, как проверка тем или иным способом показала, что трещин в материале нет.

Вторая группа методов основана на общих законах механики разрушения для материалов с появившимися и прогрессирующими трещинами. Эти методы наиболее общие, однако, трудны в применении, так как требуют обнаружения места и параметров трещины, анализа напряженного состояния в ее окрестности, анализа изменившихся за многолетнюю эксплуатацию механических



свойств материала в районе образовавшегося дефекта.

Группа методов третьего типа может быть условно охарактеризована как группа интегральных методов, которые реагируют лишь на активизацию того или иного дефекта по сопутствующим ему процессам, например, по излучению упругих волн, вызванных перемещением дислокаций, появлением их опасной концентрации в каком-либо месте конструкции, появлением и развитием трещины. Эта группа наиболее перспективна. К ней, прежде всего, следует отнести метод акустической эмиссии (АЭ), достаточно хорошо разработанный и используемый в мировой практике в настоящее время.

Представленное выделение трех групп методов оценки состояния материалов при диагностическом контроле позволяет полностью определить процедуру диагностики и необходимое для этих целей оборудование. При этом на первое место выходит процесс выявления в материалах трещин и им подобных дефектов, их идентификация и оценка. Эта часть диагностических работ является коренным вопросом процедуры оценки состояния конструкций и сооружений, особенно тех, которые длительное время находились в эксплуатации, она оказывает решающее влияние на всю дальнейшую процедуру контроля¹.

При изготовлении конструкций доминирующим технологическим процессом является сварка. Умело подобранная технология сварки позволяет создавать прочные и надежные сварные конструкции, работающие без аварий в течение длительного периода времени. Об этом свидетельствует вся отечественная и мировая практика создания сварных конструкций.

В то же время неумелое применение сварки или осуществление ремонтных работ на ее основе может привести к серьезным последствиями, особенно спустя некоторое время после ввода конструкции в эксплуатацию. Сварка имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при ее применении.

В зоне высоких температур, вызванных сваркой, происходят физико-химические превращения. Картина усложняется тем, что в это же время в материале протекают интенсивные пластические деформации из-за неравномерности его нагрева. Пластические деформации, усадка сварного шва вызывают существенные поперечные укорочения. Постепенное в процессе охлаждения формирование поля остаточных напряжений и физико-химические процессы, протекающие в материале в это же время, могут привести к появлению

трещин. Трещины могут появиться и в процессе выполнения сварного шва, когда соотношение между прочностными свойствами материала и достаточно высокими растягивающими остаточными напряжениями может стать неблагоприятным.

Существенным воздействием остаточных сварочных напряжений на работоспособность конструкций является понижение коррозионной стойкости материалов. Растягивающие напряжения способствуют движению и концентрации вредных примесей, понижающих сопротивление материала действию знакопеременных нагрузок и нагрузок, действующих на конструкцию при низких внешних температурах. Поэтому перед изготовлением конструкции необходима тщательная проработка ее проекта, анализ применяемых для ее изготовления материалов и правильный выбор технологии ее изготовления, учет указанных на схеме явлений с тем, чтобы конструкция отвечала техническим условиям ее эксплуатации и имела достаточно продолжительный ресурс. Однако полностью ликвидировать воздействие сварки на сварное соединение удается не всегда. В первый начальный период эксплуатации конструкции эти недостатки сказываются незначительно. С течением времени в материале происходят необратимые процессы, которые, в конечном счете, могут привести к таким изменениям, которые не учитывать нельзя. На рис. 1 приведен один из механизмов деформационного старения материала, так называемая газовая коррозия, когда отдельные атомы таких газов, как водород или азот, мигрирующих в металле и на его поверхности, проникают в микронесплошности, взаимодействуют с поверхностной энергией несплошностей и превращаются в молекулы, имеющие значительно меньшую подвижность [19]. Срабатывает схема «свободный вход и ограниченный выход». При этом внутреннее давление в несплошности дос-

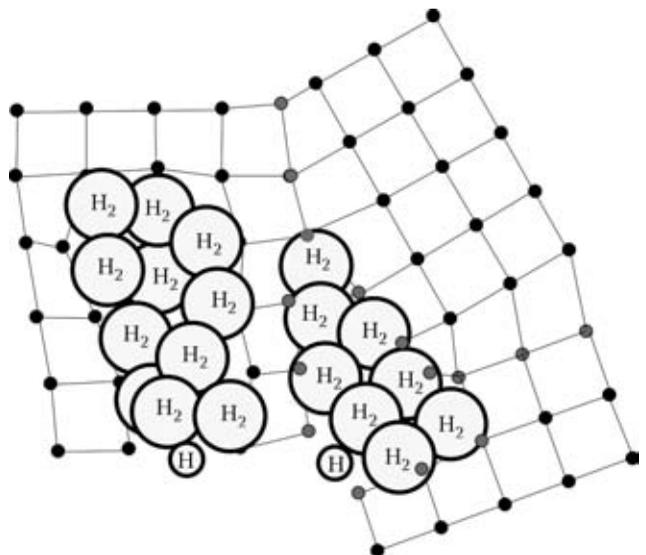


Рис. 1. Накопление водорода в несплошностях

¹ В странах СНГ и в Украине нашел применение метод, основанный на опыте эксплуатации конструкций различных видов. Метод базируется на технологических инструкциях оценки качества конструкции в процессе изготовления и практически не связан с текущей оценкой прочности материала.



тигает громадных величин, приводя к резкому развитию несплошности с таким же резким понижением давления. Далее процесс повторяется и происходит увеличение размеров несплошности. В таких случаях образующаяся и постепенно развивающаяся сеть микротрещин может привести к уменьшению ударной вязкости материала. Это явление хорошо иллюстрирует рис. 2 [5, 9, 18].

Приведенные примеры показывают, что достаточно сложно применять одни и те же подходы к оценкам состояния материалов конструкций, эксплуатирующихся в различных условиях.

Как показывает опыт, существенное влияние на состояние материалов конструкций оказывает обычная коррозия самостоятельно или во взаимодействии с твердыми сыпучими материалами, вызывающими, как правило, ручейковую эрозию стенок труб. Таким образом, оценке возможности нести полезную нагрузку должны подвергаться не только элементы собственно конструкции, но и места, где осуществлялся ее ремонт с применением сварки.

Способы определения состояния материалов конструкций в процессе эксплуатации. К настоящему времени приняты указанные выше три способа оценки состояния материалов конструкций. Первые два по своей сути представляют одно целое и применяются в зависимости от сложившихся обстоятельств. Оба способа базируются на результатах предварительного неразрушающего контроля. Если нет трещин, то расчет ведется с использованием методик, основанных на тех или иных теориях прочности. При наличии трещин методика усложняется и привлекается более сложный расчетный аппарат, базирующийся на механике разрушения (МР).

Каковы трудности, возникающие при использовании этих методов? Первая связана с неполнотой данных НК. В большинстве случаев возможность проконтролировать всю поверхность конструкции отсутствует. Некоторые инструкции предусматривают контроль 20...25 % сварных швов. Естественно, в этих условиях определить наличие дефектов затруднительно, а иногда просто невозможно. В случае применения АЭ, позволяющей получить координаты акустической активности материалов под нагрузкой, можно обнаружить развивающиеся дефекты, хотя это и дает определенный процент ложных показаний, связанных с различными условиями прохождения волны и общей шумовой обстановкой на объекте. При этом контроль можно считать 100%-м и далее проверять показания АЭ обычными методами НК. Однако это не все трудности. Далее для расчетов необходим определенный набор данных не только о найденной трещине, но и о материале конструкции на данный момент времени. Так, автор работы [1] показывает, что для оценки состояния

материала конструкции необходимо получить 34...37 параметров материала. Основные из этих параметров он свел в таблицу. В табл. 1 перечислены 12 основных параметров, необходимых для принятия решения о состоянии конструкции. Измерение и оценка приведенных в табл. 1 параметров представляет достаточно большие трудности. Каждый параметр измеряется с вполне определенной погрешностью, которая, в конечном счете, суммируется. Необходима очень высокая квалификация и большой опыт специалистов, готовящих материал для прочнистов, которые и будут определять возможность дальнейшей эксплуатации контролируемого объекта.

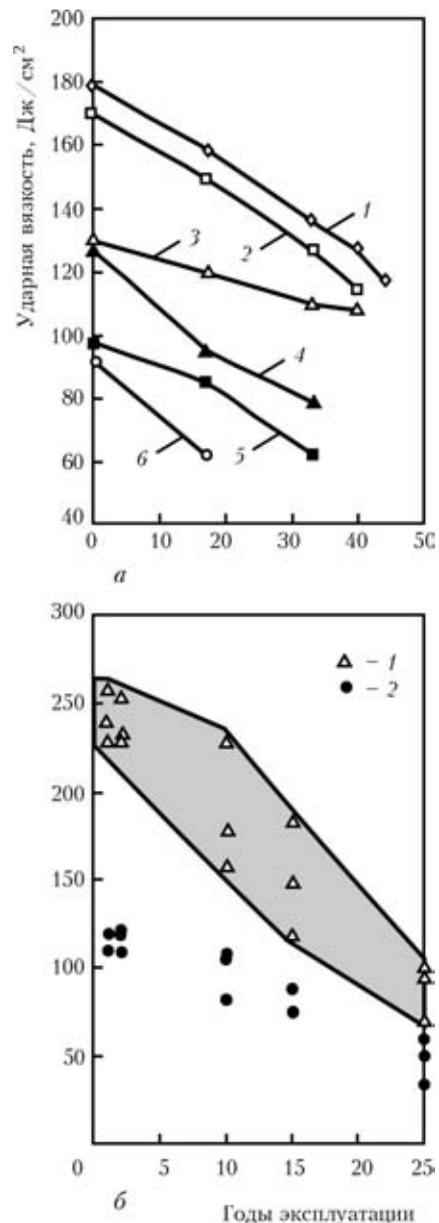


Рис. 2. Изменение ударной вязкости материалов труб газопроводов в Украине (а: 1 — 09Г2С; 2 — Ст.20; 3 — 14ХГС; 4 — 19Г; 5 — 17Г1С; 6 — 17ГС) и в РФ, Уренгой (б: 1 — основной металл; 2 — сварной шов для сталей 09Г2С, 17Г1С, 17Г) в зависимости от времени эксплуатации [18]



Таблица 1. Параметры дефекта и характеристики материала конструкции, необходимые для оценки ее состояния

Данные об исследуемом объекте	
1.1	Тип и габариты сварной конструкции
1.2	Химический состав основного металла и сварного шва
1.3	Характер и величина рабочей нагрузки
1.4	Условия эксплуатации (окружающая среда, температура)
1.5	Действующий срок эксплуатации
Данные о выявленных дефектах	
2.1	Тип дефекта (поверхностный, внутренний, плоскостной, объемный)
2.2	Место расположения (основной металл, шов, зона термического влияния)
2.3	Размеры и глубина залегания от поверхности изделия
2.4	Определение напряженно-деформированного состояния (НДС) в зоне дефекта
Данные о свойствах материала в зоне дефекта	
3.1	Исходные механические свойства и измеренные прибором
3.2	Критерий трещиностойкости (K_{IC} , K_{IIc}) и предельная пластичность ($\epsilon_{лпрел}$) в зависимости от объемности НДС
3.3	Степень ухудшения (деградации) свойств материалов в процессе эксплуатации

Порядок действий контролеров и расчетчиков, работающих по первому и второму методам, можно представить схемой, показанной на рис. 3. Первая методика такой схемы (1) представляет процедуру, при которой сначала рассчитываются недопустимые дефекты, а затем найденные на объекте дефекты сравнивают с рассчитанными и определяют их опасность.

Другая методика (2) предусматривает полный цикл исследований на объекте с выполнением (например, для внутритрубной диагностики трубопроводного транспорта) работ по шурфованию в потенциально опасных местах, подъем трубы и установка ее на опору для обеспечения удобства дальнейших измерений, проведение УЗК и томографии, затем проводится измерение напряженно-деформированного состояния на поверхности трубы. Следующим этапом определяют механические характеристики материала трубы. По совокупности полученных

результатов проводят оценку состояния материала трубы методами механики разрушения. Двойной линией выделены наиболее сложные и трудоемкие этапы контроля.

Специалисты ЦНИИ КМ «Прометей», работающие в направлении оценок состояния конструкций [4], считают, что очень сложно с достаточной для практических расчетов точностью получить методами НК необходимые исходные данные. Так, авторы работы [4] пишут, что контроль материала конструкции выполнен, получены исходные данные, а прогнозировать его состояние по этим данным нельзя. Другими словами, для проведения расчета прочности конструкции с дефектом зачастую надо знать те параметры дефектов, которые на реальных конструкциях получить чрезвычайно трудно или практически невозможно средствами и методами НК. Далее авторы приходят к выводу, что простейший способ решить вопрос о наличии дефектов — необходимо ждать, пока в процессе эксплуатации они появятся. Естественно, это вынужденное решение, хотя трудно прогнозировать как проявится этот дефект и не поздно ли будет говорить о его развитии. Надо отметить, что сделан достаточно четкий вывод о тех трудностях, которые пытаются преодолеть специалисты в области прочности, используя данные НК. Выбор в этом случае небольшой — комплексная диагностика и контроль с повышением надежности оценки за счет сопоставления различных схем.

Акустическая эмиссия. Раскроем более подробно возможности третьей группы методов — интегральных. Выше мы говорили, что применение простейшей (координатной) аппаратуры на основе АЭ позволяет с достаточной для практики точностью определять координаты АЭ активности материала под нагрузкой. И хотя часть этих координат не соответствует реальным дефектам, все же это большой шаг вперед к 100%-му контролю конструкций, ибо лучше лишний раз проверить место, указанное АЭ аппаратурой, чем пропустить дефект. Опыт работы показывает, что с приме-

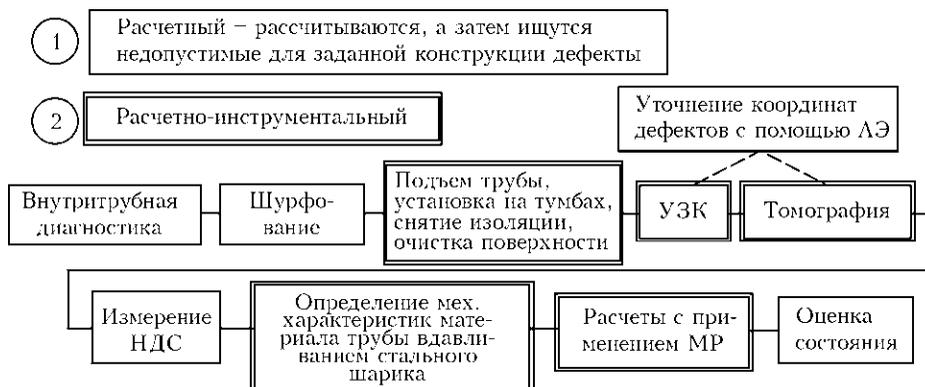


Рис. 3. Методы оценки состояния конструкций на примере трубопроводов



нением АЭ объем работ по контролю уменьшается.

Следует, однако, отметить, что поиск дефектов, указанных АЭ аппаратурой, бывает затруднен из-за отсутствия к ним доступа. Как правило, опасные дефекты появляются в зонах пересечения многих конструктивных элементов, приваренных к главному несущему элементу, или доступ к месту контроля затруднен другими частями конструкции. В этих случаях необходимо местное разрушение конструкции, а это не всегда можно сделать без серьезного ущерба производству.

В то же время к проблеме обеспечения безопасности эксплуатации конструкций можно подойти с другой стороны. Если принять во внимание, что важно знать состояние конструкции, а не причины, приведшие к нему, то аварийную ситуацию, в которой оказалась конструкция, можно оценить более простым способом. Итак, наша задача — определить, в каком состоянии находится конструкция в момент контроля. Анализировать причины, по которым наступило такое состояние — последующая задача специалистов в области прочности, как и разработка мероприятий, необходимых, чтобы не допустить повторения подобной ситуации в будущем.

При таком подходе не обязательно оценивать каждый фактор, представленный в табл. 1, с точки зрения его влияния на прочность материала конструкции. Ведь только неблагоприятное сочетание каких-либо факторов, влияющих на несущую способность материала, приводит к появлению дефекта или развитию существующего. Данная схема хорошо иллюстрируется рис. 4.

Воспользоваться представленной на рис. 4 схемой пытались и пытаются многие исследователи как у нас в стране, так и за рубежом. Так, разработки в области АЭ контроля фирмы «Ниппон

Стил Корпорейшин» в Японии еще в 1972 г. позволили провести АЭ испытания сосуда высокого давления с указанием зон повышенной опасности, на которые необходимо обратить внимание традиционными методами НК [28, 29]. Некоторое время спустя специалисты этой же фирмы разработали систему оценки развивающихся дефектов по степени их опасности. Система оценивает основные параметры АЭ, возникающей в материале при его деформировании. Вначале эти явления классифицируются как группа событий. Затем полученная таким путем группа разбивается на ряд заранее установленных классов в зависимости от интенсивности эмиссии, определяемой по выделенной энергии и количеству всплесков АЭ. Далее система классифицирует характер АЭ группы в зависимости от заранее установленных типов, выбранных по результатам испытания образцов, на которых оценивалась акустическая активность. Степень опасности сигналов определенной группы определяется путем комбинации класса и типа. Представленный подход оценки опасности дефектов применяется на практике при производственных испытаниях крупных сосудов высокого давления и в настоящее время.

Американским обществом инженеров-механиков (ASME) в 1976 г. завершена разработка и опубликован проект стандарта E 569-76 и позднее ASTM E569-02 по испытанию давлением сосудов с применением акустико-эмиссионной аппаратуры. Стандарт, также как и японская система оценки опасности дефектов, предусматривает группирование источников акустических всплесков, возникающих в материале при деформировании, и разделение их по активности на три группы. Тип *A* — неактивный источник, тип *B* — активный (т. е. указывающий на рост дефектов), который необходимо оценить с помощью других методов

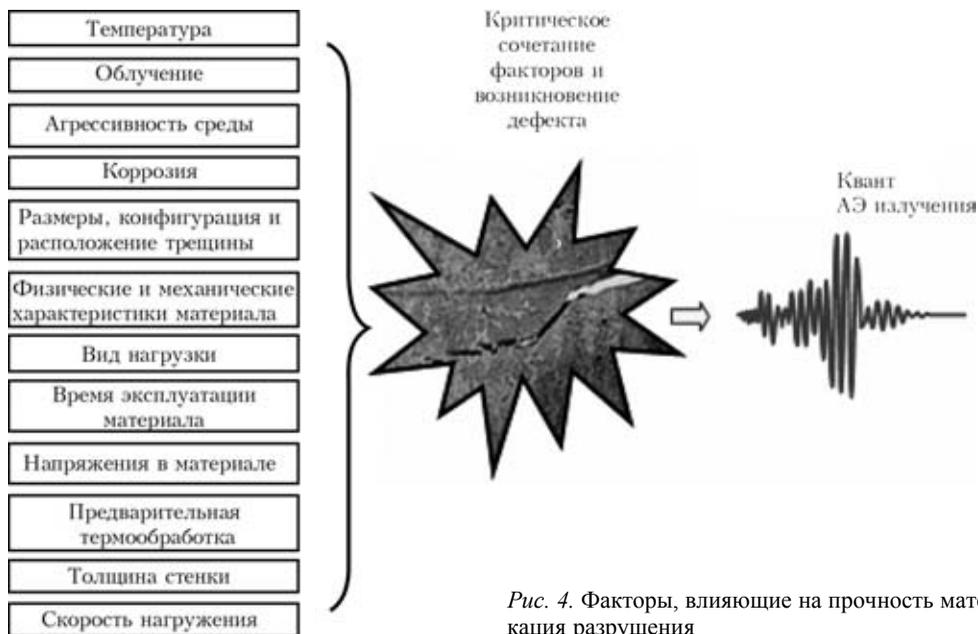


Рис. 4. Факторы, влияющие на прочность материала, и индикация разрушения



НК, тип С — источник с критической активностью (в этом случае испытания необходимо приостановить, источник оценить другими методами контроля).

Описанные работы японских и американских специалистов хорошо иллюстрируют развитие средств акустико-эмиссионного контроля. Из вспомогательных при НК они постепенно превращаются в средства диагностики несущей способности сварных конструкций, хотя неопределенность критериев в оценках авторы рекомендуют «закрывать» дополнительным контролем другими методами и окончательное решение принимать после осуществления такого контроля.

Используя приведенные выше разработки, фирма «Monsanto» (США) создала свою несколько усовершенствованную методику оценки состояния материала конструкций на основе АЭ, используя видимую связь между параметрами АЭ и подвижностью дефекта. Схема принятия решения представляет собой двухкоординатную диаграмму. По оси координат отложена энергия импульсов АЭ, а по оси абсцисс — активность источника. Сочетание активности и интенсивности представляет определенную степень опасности для контролируемого материала. Так, рассмотрено три степени активности источника АЭ — неактивный, активный и критически активный. Интенсивность сигнала АЭ (энергия) рассматривается в четырех вариантах — неактивный, низкой активности, активный и критически активный. Неопределенность заключена в расшифровке указанных понятий. Нет методики, дающей количественные значения этим параметрам. Поэтому методика носит качественный характер и должна настраиваться в каждом отдельном случае. Рекомендации по настройке отсутствуют. Типичная схема принятия решения о состоянии конструкций, принятая многими фирмами, представлена на рис. 5, где различные сочетания уровней активного (амплитуда) и интенсивного (число импульсов в секунду) источников определяют ту или иную степень опасности.

На основании этого подхода построены модели принятия решения о состоянии материала конструкции аппаратурой некоторыми другими фирмами, в частности, «Интерюнис» (Россия) [22].

Критически интенсивный	Критически интенсивный источник Уровень 4 (красный цвет)		
Интенсивный	Интенсивный источник Уровень 3 (оранжевый)		
Низкой интенсивности Неактивный	Низкой активности Уровень 1 (зеленый)	Активный, но неинтенсивный Уровень 2 (желтый)	
	Характер источников	Неактивный	Активный

Рис. 5. Классификатор источников АЭ

При этом разработчики предполагают, что основной расчетной модели служат известные закономерности механики разрушения применительно к трещинам. Предварительная дефектоскопия и анализ конструкции позволяют разбить ее на отдельные участки, которые затем исследуют при помощи АЭ с учетом выявленных особенностей. Решение принимается по установленному для каждой части конструкции критическому числу импульсов. На основании решения делаются выводы о состоянии материала конструкции. В обоих случаях технология, приведенная на рис. 5, не имеет метрологической аттестации и является сугубо «прикладной». Несколькими позднее фирма PAC (Physical Acoustic Corporation, США) увеличила число градаций значимости источников АЭ, лоцируемых на испытуемом объекте, и представила свою схему принятия решения Монрас (табл. 2) [32].

По существу принятие решения о состоянии конструкции по методике Монрас ничем не отличается от рассмотренных выше. Надо отметить, что число компаний, использующих АЭ при контроле конструкций, растет быстрыми темпами как в Украине, так и за рубежом.

Достаточно интересную методику оценки состояния материала предложил Т. Б. Петерсен [17]. Им разработана автоматическая система классификации на принципе распознавания образа. В своей работе автор использует известное в теории распознавания образа расстояние между исследуемыми кластерами информации. Минимизируя это расстояние, Т. Б. Петерсен добился положительных результатов, сравнивая искусственные источники излучения в лабораторных условиях. При этом в качестве исходных использовали 10 параметров, включая амплитуду АЭ и число событий. На основании этого подхода и образуются кластеры АЭ параметров. Подобный подход использовали В. А. Стрельченко, В. В. Данилин и С. Н. Пичков [20]. Их технология использует так называемые кластеры поврежденности материала, определяемые величиной рабочего параметра АЭ, значение которого принимается во внимание, если коэффициент корреляции между напряжениями и обобщенным параметром АЭ по отношению к энтропии становится наибольшим. На основании такого анализа принимается решение о возможном разрушении.

Применение разработанных схем для практического анализа состояния материала не приводится. Следует отметить, что Т. Б. Петерсен наиболее близко подошел к решению задачи количественной оценки состояния материала, однако, если судить по публикации, выбранное сочетание параметров и схема решающего правила в приведенном виде не позволяют приме-



Таблица 2. Распознавание опасности АЭ излучения

Тип источника	Характер источника	Действие персонала
Незначительный источник	Незначительный источник	Продолжить эксплуатацию в штатном режиме
A	Очень незначительный источник	Продолжить эксплуатацию в штатном режиме
B	Незначительный источник	Визуальный внешний осмотр
C	Действующий источник	Исследование НК
D	Активный источник	Немедленное применение НК
E	Интенсивный источник	Немедленное решение

нить полученное решение для распознавания состояния материала при контроле промышленных объектов.

Анализ применяемых в мире методик для распознавания состояния контролируемых конструкций показывает, что все методики базируются на японской технологии с попытками ее улучшения для конкретных условий испытаний. При этом методики остаются приближенными, причем степень приближения к действительности не оценивается.

В то же время промышленность все более жестко выдвигает требования количественной с определенной степенью достоверности оценки несущей способности контролируемых конструкций.

Подводя промежуточный итог, можно констатировать, что развиваемые методики и технологии контроля конструкций с применением АЭ до сих пор в мировой практике не получили количественной оценки результатов контроля. Качественно новую технологию контроля помогла создать методика, базирующаяся на теории дискриминантного анализа. Первые шаги в этом направлении были сделаны Т. Б. Петерсеном, как было показано выше. Ему не удалось решить эту задачу из-за сложности и громоздкости решающих правил, которые он применял при анализе АЭ. Прорыв

в этом направлении может быть сделан, если соединить эксперимент с аналитическим описанием распространяющихся в конструкциях акустических волн.

Для этого в классификатор событий, разделяющий поступающую на анализ информацию, необходимо включить канал самообучения, что даст возможность решить поставленную задачу до конца в определенных границах ошибки при заданной вероятности протекания процесса разрушения. На рис. 6 представлена блок-схема работы одного из вариантов такой технологии [9].

Здесь информация с контролируемого объекта поступает в расчетно-аналитический блок, где формируется вектор состояния материала (ВСМ) по параметрам АЭ и другим параметрам, характерным для работоспособности данной конструкции. Информативность всех параметров определяет решающее правило, позволяющее отбросить те из них, которые не несут информации в пределах установленных значений вероятности и ошибки. На следующем этапе проводится анализ ВСМ по существующим эталонам. При несовпадении показаний сравнения вводится блок самообучения, построенный на базе аналитических разработок АЭ. Блок самообучения устраняет «невязку» до уровня принятых допущений по ошибке и информация поступает в блок принятия решения, где на основе минимизации риска принимается решение о состоянии материала конструкции. На рис. 7 представлены действия дежурного персонала в зависимости от возникшей ситуации при контроле, например, крупногабаритной емкости, наполненной жидким продуктом. Там же для иллюстрации процесса расчета остаточного ресурса по данным прогнозируемой разрушающей нагрузки приведен график-схема со случайными по годам значениями разрушающей нагрузки. На графике виден физический остаточный ресурс. Допустимый остаточный ресурс определяется по допустимому превышению прогнозируемой разрушающей нагрузки над рабочей. Сверху в левой части графика приведена вероят-



Рис. 6. Адаптивная система распознавания состояния материалов



ность рассчитанной тенденции развития процесса разрушения.

Оборудование и нормативная документация. В настоящее время существует достаточно большое количество аппаратуры, работающей на основе АЭ, и разработчиков этой аппаратуры [8, 19, 22]. Выпускаемая АЭ аппаратура может быть условно разбита на два вида:

– аппаратура, основное назначение которой, как уже было сказано, определять координаты областей активности АЭ в конструкции. При этом последующий анализ состояния материала на участках с высокой активностью АЭ при помощи методов НК позволяет определить, какая часть полученной АЭ информации соответствует наличию реальных дефектов в конструкции. Следует отметить, что при работе по такой схеме необходимы предварительные настройки оборудования во избежание большого количества ложных сигналов;

– аппаратура, прогнозирующая разрушающую нагрузку и остаточный ресурс конструкций с заданной вероятностью и погрешностью. Такая аппаратура в настоящее время выпускается в двух модификациях — переносная (мобильная) и стационарная для непрерывного мониторинга конструкций в течение длительного времени. Последняя наиболее предпочтительна, так как позволяет получать информацию непрерывно, что дает возможность более точного определения параметров работоспособности материала конструкции.

Подавляющее большинство выпускаемой АЭ аппаратуры относится к первому виду, хотя ее возможности и пытаются расширить, комплектуя различными специализированными программами обработки АЭ сигналов. Имеются попытки использовать такую аппаратуру для оценки состояния материала конструкций. Однако, как было сказано, эти попытки не дают возможности количественной оценки и, тем более, не могут прогнозировать ситуацию, возникшую

в материале при его разрушении, особенно на начальных стадиях, когда еще можно успеть принять решение по действиям персонала и выводе конструкции из аварийной ситуации.

Применение любой контролирующей аппаратуры и методик регламентируют нормативные документы. С учетом особенностей осуществления контроля в странах СНГ и в Украине можно выделить три уровня документации:

– первый уровень — разрешительная документация, которая определяет общие правила, установленные государственной организацией, в ведении которой находится контроль за безопасностью эксплуатации конструкции. Данный уровень документации разрешает применять тот или иной метод контроля, не указывая, каким образом следует это делать;

– второй уровень — общая документация по применению метода в промышленности с формулировкой общих положений. Как правило, такая документация разрабатывается Госпотребстандартом Украины или службами на ее основе, например, техническими комитетами Госпотребстандарта Украины по определенным направлениям деятельности;

Штатный режим (зеленая полоса) Первое предупреждение (желтая полоса) Второе предупреждение (оранжевая полоса) Аварийная ситуация (красная полоса)

Операция	Показания индикатора в левом верхнем углу дисплея	Действия персонала
1	Зеленая полоса	Штатный режим. Продолжить эксплуатацию.
2	Желтая полоса	Внимание! При появлении прогнозируемого разрушающего давления и превышении его над рабочим более чем в два раза – продолжить эксплуатацию.
3	Оранжевая полоса	При превышении прогнозируемого разрушающего давления над рабочим менее чем на 30 % остановить эксплуатацию.
4	Красная мигающая полоса	Остановить эксплуатацию. После появления продолжительного прерывающегося звукового сигнала – срочный сброс нагрузки.

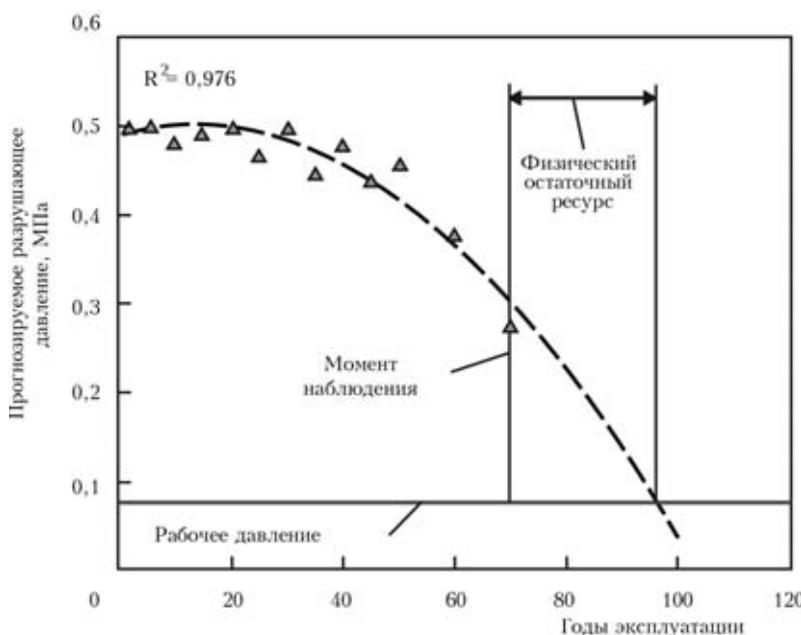


Рис. 7. Действие персонала и расчет остаточного ресурса



– третий уровень — специализированная по отношению к изделию или их группе документация относительно конкретного применения технологии контроля. Как правило, это подробная документация, описывающая все особенности применения технологии с учетом конкретного изделия.

Работы в области контроля с применением АЭ технологии нормативная документация, определяющая технику и специфические особенности применения оборудования и методик, регламентируется правилами изготовления и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением НАОП 0.00-1.07–94 (нормативная документация первого уровня). Общеизвестно, что применение АЭ технологии в производстве, как и любой другой, требует специальной подготовки персонала. За рубежом подготовке контролирующего персонала уделяется исключительно важное на государственном уровне значение, хотя непосредственный контроль во многих случаях осуществляют частные фирмы, например TUV в Германии и других странах. TUV, кроме контролеров, готовит также технических экспертов, на которых возложена ответственность за принятие решения о возможности дальнейшей эксплуатации конструкций по результатам контроля. В странах СНГ и в Украине подготовка специалистов в области контроля также имеет определенную специфику, так как именно контролеры в этих странах должны давать заключение о состоянии конструкций и назначать срок ее дальнейшей эксплуатации. Такая постановка задачи требует введения в программу обучения курса технической диагностики с понятием прогнозирования состояния конструкций с заданной вероятностью, что предусматривает соответствующая нормативная документация. С учетом изложенного выше в Украине по

специальности «АЭ контроль» готовятся специалисты трех уровней. Первый и второй уровень — это специалисты по НК с применением АЭ. При этом решение о состоянии контролируемого объекта принимается на основании традиционной нормативной документации или специалистами, прошедшими обучение с курсом технической диагностики. На третий уровень подготовки аттестуются специалисты, принимающие решение о состоянии объекта на основании показаний диагностической АЭ аппаратуры. В программу подготовки специалистов третьего уровня входит курс технической диагностики, даются более глубокие представления об АЭ и технологии контроля на ее основе. Эту работу проводят специальные центры на государственной основе. Структура применения АЭ технологии в Украине представлена на рис. 8. Как видно из схемы, технология контроля состояния конструкций предусматривает все необходимые элементы системы — аппаратуру контроля, ее метрологию, метрологию методики контроля, необходимую документацию по применению технологии и аппаратуры и документацию по принятию решения. Технология также предусматривает подготовку контролирующего персонала и обслуживание клиентов и техники.

Следует отметить также общемировые тенденции в разработке и применении АЭ технологии при контроле состояния конструкций и сооружений. В последнее время возникло понятие так называемой интеллектуальной технологии и интеллектуальной конструкции. Понятие интеллектуальных конструкций, например мостов, все чаще встречается в употреблении и подразумевает конструкции, которые сами дают знать, в каком состоянии они находятся, и следует ли прекращать их эксплуатацию. Такие конструкции начали по-

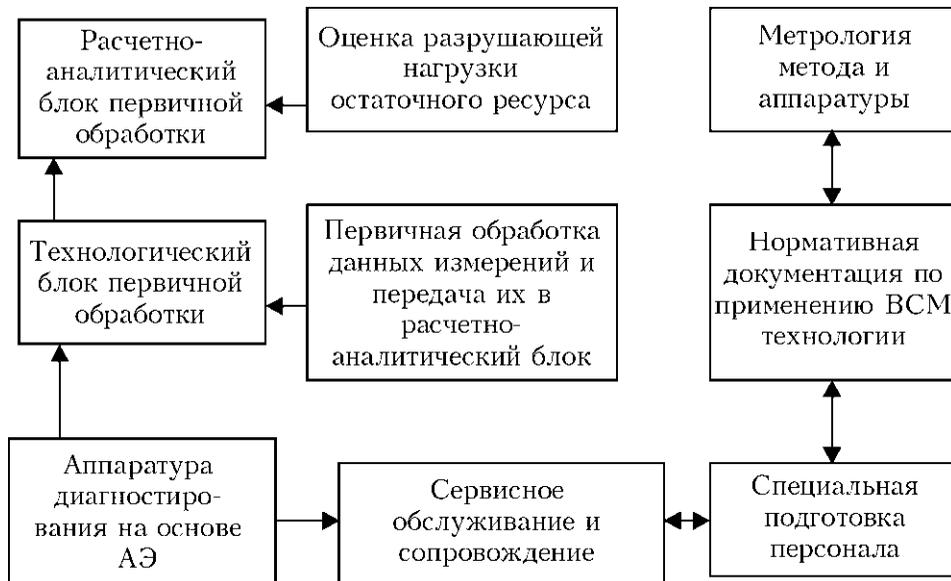


Рис. 8. Блок-схема технологии по обеспечению безопасности эксплуатации конструкций

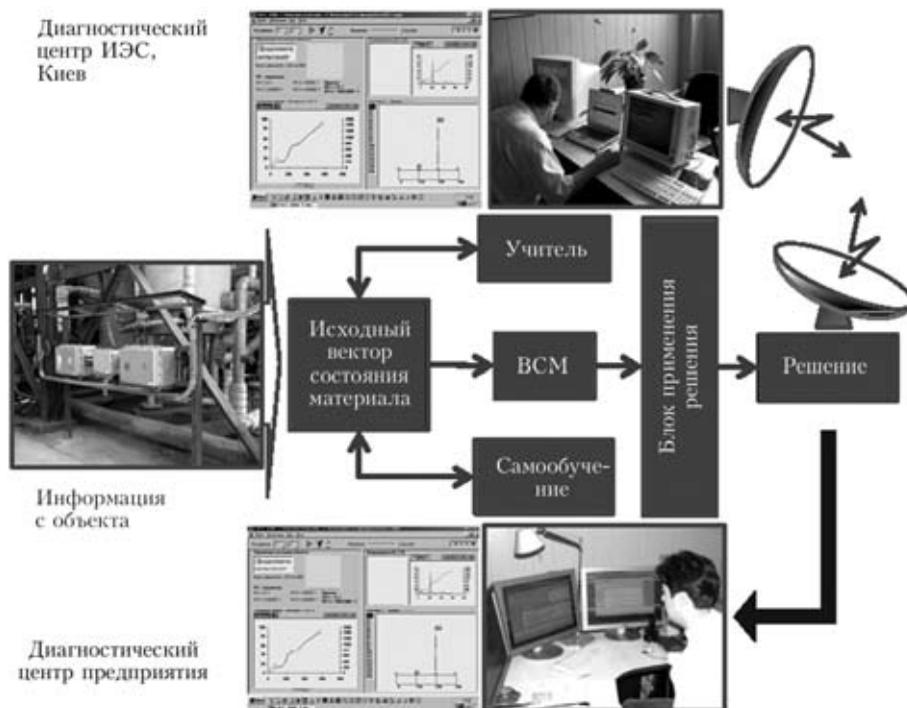


Рис. 9. Дистанционное управление эксплуатацией конструкций

являться в США, Финляндии и в Украине. На ряде предприятий Украины уже более 8 лет работают стационарные диагностические системы непрерывного мониторинга, определяя состояние конструкций с заданной вероятностью и при установленных пределах погрешности. При этом диагностическая информация передается по компьютерным сетям как в диагностический центр предприятия, так и в дублирующие центры, находящиеся на любом расстоянии от контролируемой конструкции (рис. 9).

Для повышения эффективности внедрения в промышленность технологий на основе метода АЭ в ряде стран созданы рабочие группы, объединяющие специалистов-разработчиков АЭ технологий и пользователей. Это следующие группы и объединения:

АЕWГ — Американская рабочая группа по АЭ;
JCAE — Японский комитет по АЭ;
EWGAE — Европейская рабочая группа по АЭ;
GLEA — Латино-американская рабочая группа по АЭ;

УРГАЭ — Украинская рабочая группа по АЭ при ТК 78;

РРГАЭ — Российская рабочая группа по АЭ при Госгорнадзоре России.

Указанные рабочие группы проводят необходимые исследования в направлении АЭ, создают и распространяют необходимую нормативную документацию, проводят научные и практические конференции и семинары. С целью придания работам по АЭ контролю большего значения и усиления их координации, при 135 комитете ИСО

по НК создан подкомитет № 9 «Acoustic emission testing» с центром, расположенным в Бразилии, который в 2006 г. приступил к координации работ в области применения АЭ при контроле и испытании конструкций и сооружений.

Выводы

Стремительное развитие средств контроля конструкций, особенно применяющих АЭ технологию, и то внимание, которое уделяется этому вопросу мировым сообществом, дает возможность предположить широкое применение АЭ для создания «интеллектуальных конструкций и сооружений», которые с заданной точностью и вероятностью сами будут сообщать о своем состоянии и предлагать меры выхода из затруднительных ситуаций. Другими словами, системы непрерывного мониторинга, использующие интегральные методы контроля и, в частности, АЭ, будут все шире применяться при контроле сначала опасных в эксплуатации, а затем, по мере упрощения технологии их создания, и в обычных промышленных конструкциях.

Следует также предположить расширение сети специализированных центров контроля эксплуатирующихся конструкций. Такие центры будут укомплектованы специалистами высокой квалификации, а современные цифровые технологии и средства коммуникации позволят им проводить мониторинг и оценивать состояние конструкций дистанционно, находясь от объекта контроля на любом расстоянии.



1. *Алешин Н. П.* Оценка остаточного ресурса сварных конструкций // Сварка и Диагностика. — 2007. — №2. — С. 4–10.
2. *Бигус Г. А.* Требования к системам технического диагностирования оборудования стартовых комплексов ракет-носителей // Свароч. пр-во. — 2004. — № 10. — С. 50–55.
3. *Бирюкова Н. П., Соловьева М. О.* Опыт организации и работы с экзаменационными центрами при ОС «СертиНК» // В мире неразруш. контроля. — 2002. — № 4. — С. 62–63.
4. *Варовин А. Я., Карзов Г. П., Марголин Б. З.* Проблемы прогнозирования работоспособности конструкций по данным НК // Там же. — 2006. — № 4. — С. 6–11.
5. *Влияние длительной эксплуатации на вязкость трубной стали 17ГС / С. А. Котречко, А. Я. Красовский, Ю. Я. Мешков и др.* // Проблемы прочности. — 2002. — № 6. — С. 21–30.
6. *Кузьмин А. Н., Жуков А. В., Журавлев Д. Б.* Акустико-эмиссионная диагностика магистральных газопроводов с применением тензометрии // В мире неразруш. контроля. — 2002. — № 4. — С. 60–62.
7. *Махненко В. И.* Совершенствование методов оценки остаточного ресурса сварных соединений конструкций длительного срока эксплуатации // Автомат. сварка. — 2003. — 10/11. — С. 112–121.
8. *Назарчук З. Т., Скальский В. Р.* Акустико-емісійне дiагностування елементiв конструкцiй / Наук.-техн. посiбник. — Т. 1–3. — Киев: Наук. думка, 2009. — С. 872.
9. *Недосека А. Я.* Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Индпром, 2008. — 814 с.
10. *Недосека А. Я., Недосека С. А.* Акустическая эмиссия и ресурс конструкций // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 2. — С. 5–19.
11. *Недосека С. А., Недосека А. Я.* Диагностические системы семейства «ЕМА». Основные принципы и особенности архитектуры (Обзор) // Там же. — 2005. — № 3. — С. 20–26.
12. *Недосека С. А., Недосека А. Я.* Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой // Там же. — 2010. — № 1. — С. 9–16.
13. *Применение АЭ технологии при непрерывном мониторинге оборудования Одесского припортового завода / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, М. А. Яременко и др.* // Там же. — 2008. — № 4. — С. 85–95.
14. *Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Партон В. З.* Основы механики разрушения материалов. Справ. пособие в 4 т. / Под общей ред. В. В. Панасюка. — Т. 1. — Киев: Наук. думка, 1988. — 487 с.
15. *О некоторых путях построения автоматических информационно-измерительных систем для диагностики надежности сварных конструкций / Б. Е. Патон, И. В. Кудрявцев, А. Я. Недосека, А. Е. Коротынский* // Автомат. сварка. — № 9. — 1974. — С. 1–5.
16. *Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я.* Техническая диагностика: вчера, сегодня и завтра // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 4. — С. 6–10.
17. *Петерсен Т. Б.* Разработка и использование автоматической системы классификации для идентификации сигналов акустической эмиссии // Там же. — 1993. — № 3. — С. 3–9.
18. *Ремонт магистральных и промышленных газопроводов.* Справ. пособие / Под ред. А. И. Степаненко. — Киев: Интерграфик, 1996. — 191 с.
19. *Смиян О. Д.* Распределение водорода в зоне деформационных трещин // Журн. физич. химии. — 1980. — Т. LIV. — № 11. — С. 2913–2917.
20. *Стрельченко В. А., Данилин В. В., Пичков С. Н.* Определение степени поврежденности конструктивных сталей по сигналам акустической эмиссии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1999. — № 3. — С. 74–81.
21. *Харебов В. Г., Кузьмин А. Н., Жуков А. В.* Совершенствование методики диагностики трубопроводов с применением метода акустической эмиссии // В мире неразруш. контроля. — 2009. — № 4. — С. 5–9.
22. *Харебов В. Г., Бородин Ю. П., Шанорев В. А.* Система комплексного диагностического мониторинга опасных производственных объектов // Там же. — 2006. — № 4. — С. 13–17.
23. *Шаталов А. А., Разуваев И. В., Костюков В. Н.* Опыт реализации стратегии обеспечения безопасности нефтехимических производств при их эксплуатации по фактическому техническому состоянию // Химическая технология. — 2003. — № 3. — С. 11–13.
24. *Черепанов Г. П.* Квантовая механика разрушения // Пробл. прочности. — 1990. — № 2. — С. 3–9.
25. *Эксплуатацию кранов можно продлить / О. Григоров, А. Рахманый, А. Садило, В. Макац* // Охрана труда. — 2009. — № 2. — С. 27–29.
26. *Obodovsky B., Fedchun A., Nedoseka Ya.* Application of a Permanent Acoustic Emission Monitoring System on Four Ammonia Storage Tanks // Ammonia Plant Safety. AIChE Technical Manual. — 2006. — 39. — P. 24–34.
27. *Balderston H. L.* The broad range detection of incipient failure using the acoustic emission phenomena // A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. — Bal Harbour, — 7-8 Dec. — 1971. — P. 297–317.
28. *Watanabe T., Hashirizaki S., Arita H.* Inspection of large pressure vessels by the acoustic emission technique // Weld. and Metal Fabrication. — 1975. — Sept. — P. 525–527.
29. *Watanabe T., Hashirizaki S., Arita H.* Метод оценки дефектов в сооружениях, основанный на контроле акустической эмиссии // ВЦП. — В-40573. — 28 с. — «Хихакай кенса», 1978. — 27, № 4. — С. 225–232.
30. *Acoustic Emission Monitoring of Pressure Vessels During Proof Test / Etienne Soutif, Catherine Herve, Fan Zhang, Marc Deschamps* // Ammonia technical manual. — 1999. — P. 251–263.
31. *Acoustic Emission Monitoring of Bridge Structures in the Field and Laboratory / Rhys Pullin, Karen M. Holford, Robert J. Lark, Mark J. Eaton* // J. of Acoustic Emission. — 2008. — 26, January-December. — P. 172–181.
32. *Stanley R.* Experience of using a non-intrusive approach to the inspection of a 23 year ammonia storage tank // Ammonia Technical Manual. — 2004. — P. 204–230.

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

Поступила в редакцию
15.04.2010

АВТОГЕНЕРАТОРНЫЕ ВИХРЕТОКОВЫЕ ДЕФЕКТОСКОПЫ: ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ, КЛАССИФИКАЦИЯ, СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ (Обзор)

В. Н. УЧАНИН

Проведен сравнительный анализ схем известных автогенераторных вихретоковых дефектоскопов. Выделены классификационные признаки автогенераторных ВД, на основе которых предложена их классификация. Построена и проанализирована схема причинно-следственных связей для анализа влияния дефекта и зазора на параметры вихретокового преобразователя и колебательной системы автогенератора дефектоскопа. Определены оптимальные технические решения для создания современных высокочувствительных автогенераторных вихретоковых дефектоскопов для выявления поверхностных дефектов.

The comparative analyzing of known autogenerator eddy current flaw detectors (AECFD) schemes is conducted. The classification features of AECFD are assigned. It allows proposing of new AECFD classification. The cause to consequence scheme of flaw and lift-of influence to eddy current probe and flaw detector oscillation circuit is formed and analyzed. The optimal technical solutions for high sensitive AECFD creation are defined.

Общей особенностью автогенераторных вихретоковых дефектоскопов (ВД) является включение параметрического вихретокового преобразователя (ВТП) в качестве элемента колебательного контура автогенератора, который представляет собой нелинейный резонансный усилитель, охваченный положительной обратной связью [1, 2]. Приборы такого класса появились еще в середине 1950-х годов, что было связано с освоением производства тяжелых самолетов и мощных авиационных двигателей. К первым приборам этого класса относились ВД типа ВД-1, ВД-1ГА, ВДЦ-1, ППД-1МУ, ППД-2М [1, 2]. В конце 1980-х годов серийно выпускались автогенераторные ВД типа ПРОБА-5 и ТВД-А [3-5]. Благодаря высокой чувствительности к дефектам, автономному питанию, относительно небольшим габаритам и массе эти ВД нашли широкое применение в промышленности, где ими выполнялся значительный объем контроля. Методики их применения обобщены в производственной инструкции Всесоюзного (ныне Всероссийского) института авиационных материалов [6] и являются важной составляющей регламента по техническому обслуживанию самолетов.

Выбор и анализ классификационных признаков. Предложено много вариантов построения автогенераторных ВД, каждый из которых имеет свои недостатки и преимущества [1–28]. Основой сравнительного анализа при выборе оптимальной схемы автогенераторного ВД может быть их классификация (рис. 1). Анализ известных технических решений показывает, что в качестве классификационных признаков может быть использован тип активного элемента, на котором построен автогенератор — основной узел автогенераторного

ВД. Разработано большое количество автогенераторных средств контроля, в которых в качестве активных элементов применяются электровакуумные лампы [1, 7], биполярные транзисторы [1, 8, 9], интегральные усилители [1], полевые транзисторы [5, 10], лямбда-диоды [11–14]. Характеристики электровакуумных ламп позволяют построить на их основе ВД с высокими метрологическими параметрами. Но из-за больших габаритов и потребления энергии автогенераторы на лампах встречаются только в старых моделях ВД. Биполярные транзисторы имеют высокую крутизну переходной характеристики, которая на порядок превышает крутизну полевых транзисторов. Однако биполярные транзисторы имеют небольшое входное сопротивление, на 2...3 порядка ниже, чем у полевых транзисторов, что ограничивает их эффективность при построении автогенератора. Поэтому в современных ВД в качестве активного элемента используют полевые транзисторы, которые кроме высокого входного сопротивления (до 10 МОм) отличаются низким уровнем низкочастотных шумов, линейностью вольт-амперной характеристики, большим динамическим диапазоном, высокой стабильностью и незначительной зависимостью от изменения напряжения питания [29]. Существует два основных типа полевых транзисторов: транзисторы с управляемым $p-n$ -переходом и транзисторы с изолированным затвором (МОП-транзисторы). В известных дефектоскопах используют полевые транзисторы с закрытым $p-n$ -переходом [3, 8]. Перспективный полевой транзистор с изолированным затвором впервые использован в наших разработках [15, 16].

Колебательная система автогенераторного ВД определяет рабочую частоту контроля и может

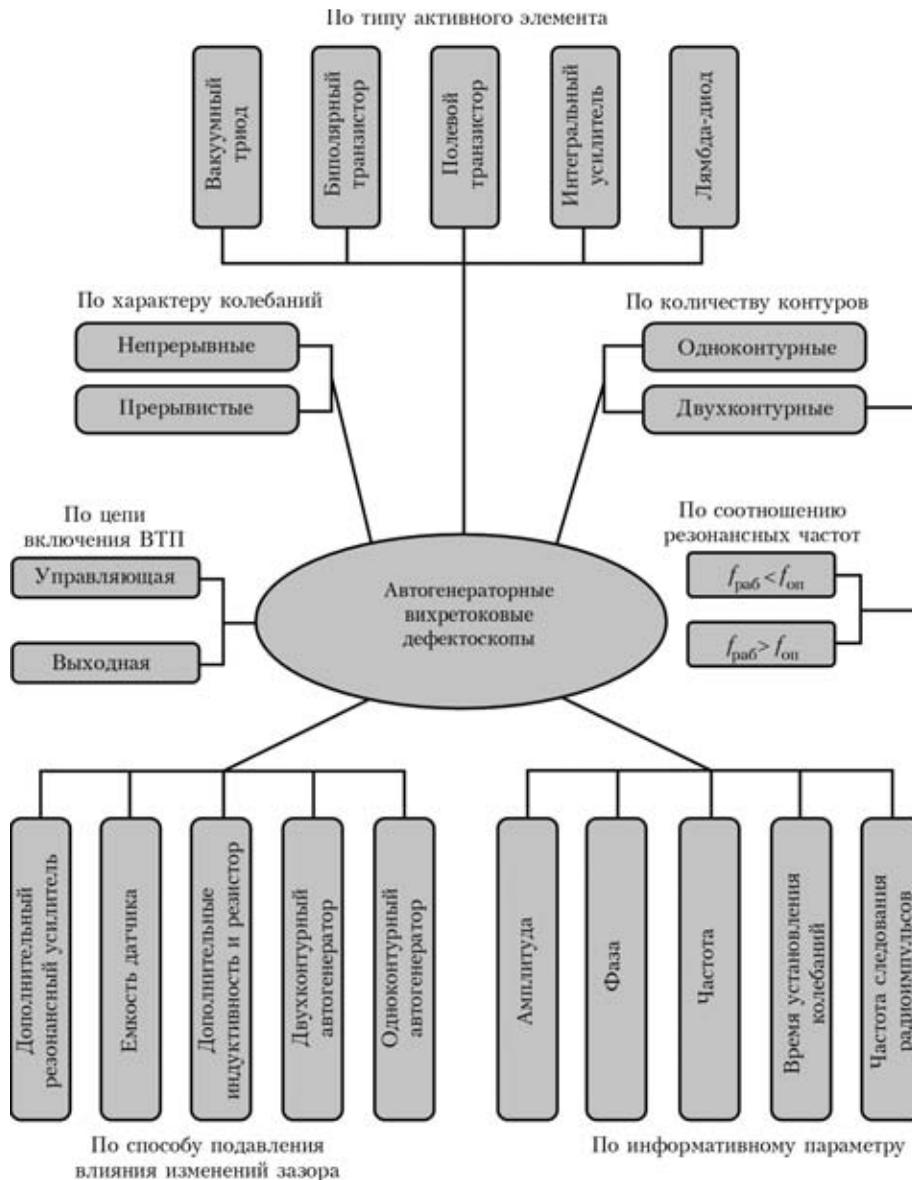


Рис. 1. Классификация автогенераторных вихреговых дефектоскопов

состоять из одного или двух резонансных контуров. Схемы первых автогенераторных ВД имели один рабочий контур [1]. Транзисторные одноконтурные автогенераторы строятся по схеме с общей базой и емкостной обратной связью [1, 10, 18]. Типичным представителем одноконтурного автогенераторного ВД является прибор ППД-2М [1].

Двухконтурные автогенераторные ВД имеют лучшие метрологические характеристики за счет более гибкой перестройки в различные режимы [1, 5, 7]. Важным отличием двухконтурных дефектоскопов (рис. 2) от одноконтурных является зависимость коэффициента обратной связи от частоты, что используют для подавления влияния изменения зазора между ВТП и поверхностью объекта контроля (ОК).

Одним из важных классификационных признаков может быть точка включения ВТП в качестве элемента колебательного контура автогенера-

тора. При этом параметрический ВТП может быть включен в цепь управляющего электрода активного элемента, в цепь обратной связи или во входную цепь. Различные варианты включения резонансных контуров анализировались в работах [18, 19]. Показано, что при измерениях в широком диапазоне преобразований измеряемого параметра при высоких значениях добротности ВТП предпочтительно следует отдавать автогенераторам с контуром ВТП во входной цепи. Для измерений в области малых и средних значений добротности лучше применять автогенераторы с рабочим контуром в цепи управления или обратной связи. В известных двухконтурных автогенераторных дефектоскопах ВТП включен в цепь управляющего электрода [1] (рис. 2).

Следующим отличительным признаком автогенераторных ВД является вид колебаний, генерируемых автогенератором. В некоторых моделях

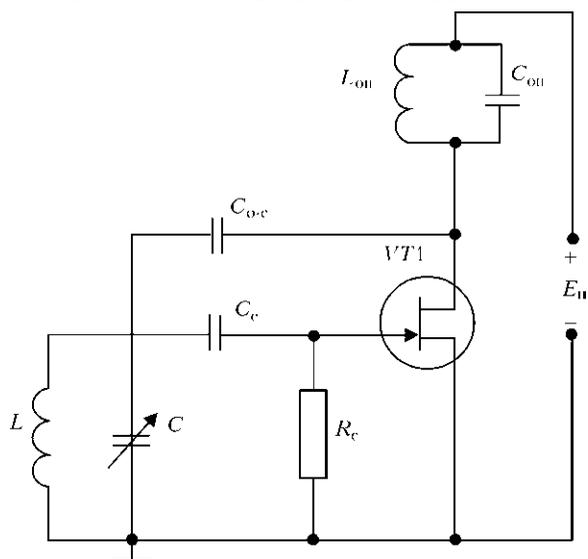


Рис. 2. Схема колебательной системы двухконтурного автогенераторного ВД: $VT1$ — активный элемент; L, C — соответственно индуктивность обмотки ВТП и емкость рабочего контура; L_{on}, C_{on} — соответственно индуктивность и емкость рабочего контура; C_{oc} — емкость обратной связи; C_c, R_c — соответственно емкость и сопротивление смещения; E_n — напряжение питания

дефектоскопов, например ВД-22Н (Проба-5) [3], используются незатухающие непрерывные колебания. В других, таких как ТВД-А [4,5], ВТП возбуждается прерывистыми колебаниями [1, 20]. Режим прерывистых колебаний, в отличие от режима непрерывных колебаний, реализуется при условии, если постоянная времени цепи автоматического смещения ($\tau_3 = R_3 C_p$ (R_3, C_p — сопротивление резистора и емкость разделительной емкости в цепи затвора) будет больше постоянной времени рабочего контура $\tau_k = 2L/R$ (L, R — соответственно индуктивность и активное сопротивление обмотки ВТП), т. е. при условии $\tau_3 \gg \tau_k$. Преимуществом автогенераторных ВД с прерывистыми колебаниями является возможность получения звуковой переменнотональной индикации без применения управляемых напряжением низкочастотных генераторов. Кроме того, ВД с прерывистыми колебаниями за счет переменнотональной индикации позволяют легко контролировать превышение зазора на слух. Частота следования пачек радиоимпульсов при изменении вносимого сопротивления изменяется, так как параметры ВТП влияют на постоянную времени $\tau = 2L/R$ рабочего контура. Выбором величины постоянной времени цепи автоматического смещения можно установить частоту следования пачек радиоимпульсов в звуковом диапазоне. Дополнительным преимуществом автогенераторных ВД с прерывистыми колебаниями является экономичность потребления, так как в промежутки времени, когда генерация прервана, активный элемент заперт и ток не потребляет. Это важно для увеличения времени работы без подзарядки при соз-

дании портативных ВД с автономным питанием. Способ получения прерывистых колебаний описан в работах [1, 20] и определяется выбором значений RC -элементов автоматического смещения в затворной (базовой) цепи транзистора (см. рис. 2).

Автогенераторные ВД можно классифицировать по информативному параметру, изменение которого используется для получения информации о наличии дефекта. Чаще всего в качестве информативного параметра используется амплитуда генерируемого сигнала [22, 23]. При перемещении ВТП в зону дефекта его добротность уменьшается и амплитуда колебаний автогенератора уменьшается порой до полного срыва колебаний. В других автогенераторных ВД используется фаза [24], частота [25, 26] или время установившихся колебаний [13, 14]. В ВД с прерывистыми колебаниями информативным параметром является частота следования пачек радиоимпульсов [1, 4, 5, 7]. В зависимости от информативного параметра обработку сигналов перед выводом информации на индикатор проводят в амплитудном, частотном, фазовом детекторах, в измерителях интервала времени или периода колебаний.

Важной особенностью автогенераторных ВД является способ подавления влияния изменения зазора между ВТП и поверхностью ОК. Отстройку от зазора можно реализовать в автогенераторных дефектоскопах при настройке в закритическом режиме (точка B на рис. 3), который имеет место при больших значениях обобщенного параметра ($\beta > 5$). Причинно-следственные связи между изменениями параметров автогенераторного ВД при появлении дефекта и увеличении зазора показано стрелками на рис. 4. Знаками + и - показано соответственно увеличение или уменьшение параметра. Верхняя часть схемы на рис. 4 касается изменения параметров ВТП, поэтому может быть применена для анализа одноконтурного автогенераторного ВД. Увеличение зазора между ВТП и поверхностью ОК приводит к увеличению его индуктивности L и уменьшению активного сопротивления R . Увеличение индуктивности L приводит к уменьшению резонансной частоты рабочего контура $f_{раб}$, в который включен ВТП, а также к увеличению добротности Q ВТП и напряжения на контуре. При этом добротность Q ВТП при увеличении зазора увеличивается также за счет увеличения активного сопротивления ВТП. На высоких частотах влияние изменения реактивного сопротивления на добротность ВТП намного меньше влияния изменений активной составляющей импеданса [1]. Незначительное влияние изменения индуктивности ВТП на его добротность Q и соответствующее влияние изменения добротности Q на параметры колебательной системы автогенератора на рис. 4 показано пунктирными стрелками. При перемещении ВТП в зону дефекта

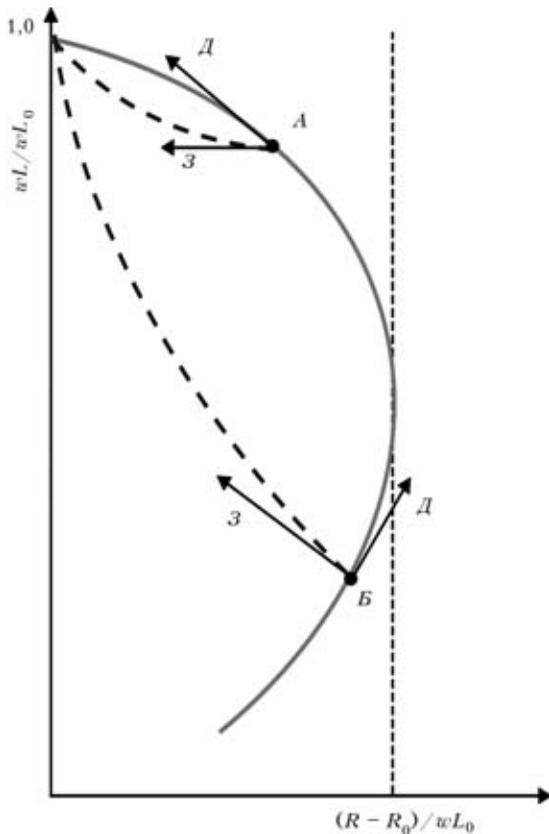


Рис. 3. Влияние дефекта D и изменения зазора Z на годографе импеданса ВТП для рабочей точки в докритическом (т. A) и закритическом (т. B) режимах

увеличиваются оба параметра ВТП (индуктивность L и активное сопротивление R) (рис. 3). Это приводит к уменьшению резонансной частоты контура $f_{\text{раб}}$. Преобладающее влияние увеличения активного сопротивления R приводит к уменьшению добротности Q и уменьшению напряжения генерации U . Таким образом, в одноконтурных ВД влияние дефекта и влияние увеличения зазора приводит, соответственно, к уменьшению или увеличению напряжения генерации, что дает возможность их различать.

Подавление влияния изменения зазора можно обеспечить также введением дополнительного резонансного контура или резонансного усилителя [26], или дополнительных индуктивных и резистивных элементов [27]. Контроль слабопроводящих материалов проводят в докритическом режиме на начальном участке годографа ВТП (рис. 3, т. A), когда линии зазора и дефекта на комплексной плоскости почти совпадают. В этом случае эффективно использование емкости, которая конструктивно объединена с ВТП [9, 17, 20]. Подавление влияния изменений зазора может иметь кроме положительного эффекта негативные последствия, так как оператор при контроле через слой лакокрасочного покрытия не видит увеличение зазора, которое может привести к уменьшению чувствительности контроля. Поэтому некоторые де-

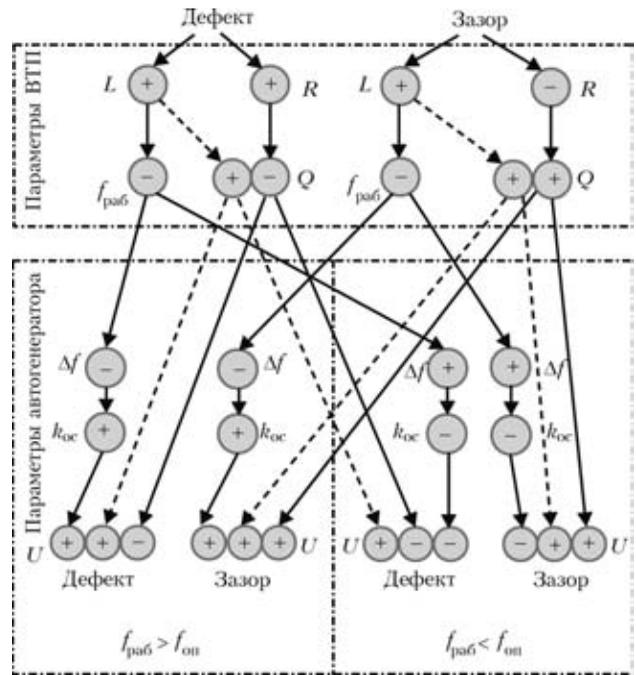


Рис. 4. Схема причинно-следственных связей влияния дефекта и увеличения зазора на параметры ВТП и колебательной системы двухконтурного автогенератора

фектоскопы имеют схему сигнализации превышения заданного зазора между ВТП и ОК [28].

Наиболее эффективным является способ подавления влияния изменения зазора при применении двухконтурных автогенераторов при работе ВТП в закритическом режиме (рис. 3, т. A), для реализации которого используется зависимость коэффициента обратной связи $K_{\text{ос}}$ (рис. 2) от частоты. Проанализируем подробнее этот способ с помощью схемы на рис. 4, тем более, что в литературе есть определенная путаница [1]. При настройке двухконтурных автогенераторных ВД резонансная частота рабочего контура $f_{\text{раб}}$ может быть выбрана больше резонансной частоты опорного контура $f_{\text{оп}}$ ($f_{\text{раб}} > f_{\text{оп}}$) или наоборот, $f_{\text{раб}}$ может быть меньше $f_{\text{оп}}$ ($f_{\text{раб}} < f_{\text{оп}}$) (рис. 5).

Рассмотрим случай, когда $f_{\text{раб}} > f_{\text{оп}}$ (рис. 5, a), которому соответствует нижняя левая часть схемы на рис. 4. При увеличении зазора резонансные частоты контуров будут сближаться за счет уменьшения $f_{\text{раб}}$, что приведет к уменьшению разницы резонансных частот Δf (рис. 5, a). Это улучшает взаимодействие между контурами и увеличивает коэффициент обратной связи $K_{\text{ос}}$, в результате чего условия генерации улучшаются и напряжение генерации U увеличивается. Одновременно увеличивается добротность Q обмотки ВТП, что также уменьшает затухание в контуре и улучшает условия генерации. На схеме видно, что влияние увеличения зазора однозначно приводит к увеличению напряжения генерации U . При перемещении ВТП в зону дефекта резонансные частоты контуров также сближаются за счет увеличения индуктивности L ВТП, что приводит

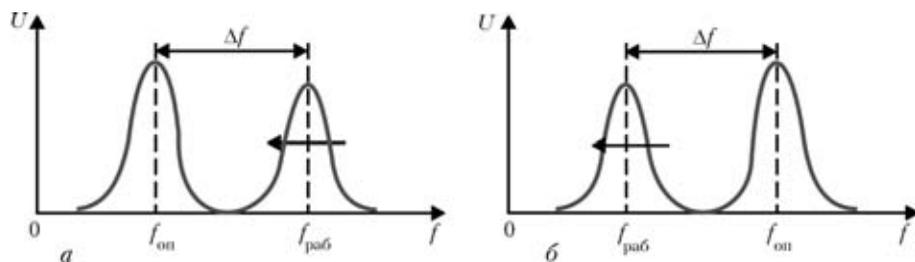


Рис. 5. Варианты настройки резонансных частот контуров колебательной системы двухконтурного автогенератора: а — $f_{\text{раб}} > f_{\text{оп}}$; б — $f_{\text{раб}} < f_{\text{оп}}$

к уменьшению резонансной частоты рабочего контура $f_{\text{раб}}$. Это должно было бы приводить к увеличению коэффициента обратной связи $K_{\text{ос}}$ и увеличению напряжения генерации U . Но при этом добротность обмотки Q уменьшается за счет преимущественного влияния увеличения активного сопротивления R , что приводит к увеличению затухания в контуре, ухудшению условий генерации и уменьшению напряжения U генерации. Таким образом, при дефекте на напряжение генерации влияют два сильных противоположных фактора. При настройке дефектоскопа выбором параметров колебательной системы, в частности, коэффициента обратной связи и начальной разницы резонансных частот контуров, достигают преимущественного влияния активного сопротивления ВТП, при котором дефект приводит к уменьшению напряжения генерации. Таким образом, влияние дефекта и влияние зазора могут быть разделены. Следует заметить, что при $f_{\text{раб}} > f_{\text{оп}}$ увеличение зазора влияет на чувствительность к дефектам. Поэтому при увеличении зазора возможен пропуск дефекта.

Подавление влияния зазора в двухконтурных автогенераторных ВД проводится также в режиме, когда $f_{\text{раб}} < f_{\text{оп}}$ (правая нижняя часть схемы на рис. 4). Здесь перемещение ВТП в зону дефекта приводит к уменьшению частоты $f_{\text{раб}}$ и соответствующему разнорезонансным частотам контуров (Δf увеличивается), что приводит к уменьшению коэффициента обратной связи $K_{\text{ос}}$, ухудшению условий генерации и уменьшению ее напряжения U . Добротность Q при этом также снижается, что приводит также к ухудшению условий генерации. Таким образом, оба процесса ухудшают условия генерации, что уменьшает напряжение генерации до ее возможного срыва. При увеличении зазора резонансные частоты контуров также расходятся за счет увеличения индуктивности обмоток ВТП, которое приводит к уменьшению резонансной частоты $f_{\text{раб}}$. Однако возможна настройка колебательной системы автогенератора, при которой этот процесс можно компенсировать за счет увеличения добротности обмотки ВТП. В таком случае условия генерации при увеличении зазора не изменяются. В этом случае напряжение генерации U при отводе ВТП не меняется, либо условия генерации немного улучшаются за счет преоблада-

ющего влияния увеличения добротности ВТП, что приводит к незначительному увеличению амплитуды генерации U . Таким образом, при $f_{\text{раб}} < f_{\text{оп}}$ дефект приводит к однозначному уменьшению амплитуды генерации, а при увеличении зазора амплитуда генерации U остается постоянной или увеличивается на незначительную величину. При выборе режима двухконтурного автогенератора, при котором $f_{\text{раб}} < f_{\text{оп}}$, пропуск дефекта менее вероятен, что дает ему преимущество. Проведенный анализ причинно-следственных связей раскрывает механизмы влияния дефекта и зазора на параметры колебательной системы автогенератора, что использовано при разработке новых автогенераторных ВД типа ЛЕОТЕСТ ВД [15, 16, 30, 31].

Дефектоскопы типа ЛЕОТЕСТ ВД прошли государственные испытания и включены в государственный реестр измерительной техники Украины. Более сорока приборов типа ЛЕОТЕСТ ВД нашли применение для эксплуатационного контроля авиационной техники. Их применение, в частности, предусмотрено регламентом на техническое обслуживание самолетов АНТК «Антонов» и авиационных двигателей ЗМКДБ «ПРОГРЕСС» И ВАТ «Мотор-Сич» [32–34]. Приборы используются в условиях производства и ремонта авиационной техники на Московском вертолетном заводе, в центре обеспечения летной годности (Люберцы Московской области), на Севастопольском, Конотопском и Львовском авиаремонтных заводах. При необходимости дефектоскопы снабжаются специальными ВТП для контроля грубых поверхностей, что позволяет расширить область их применения в нефтегазовой отрасли и энергетике [16].

Выводы

Проведен сравнительный анализ схем построения известных автогенераторных ВД. Выделены классификационные признаки автогенераторных ВД, на основе которых предложена их классификация. Построена и проанализирована схема причинно-следственных связей для анализа влияния дефекта и зазора на параметры ВТП и колебательной системы двухконтурного автогенератора. Определены оптимальные технические решения для создания современных высокочувствительных автогенераторных ВД для выявления поверхностных дефектов. В частности, показано оптимальное соот-



ношение резонансных частот опорного и рабочего контуров для наилучшего подавления влияния зазора двухконтурного автогенераторного ВД. Результаты анализа использованы для улучшения метрологических характеристик нового отечественного автогенераторного ВД.

1. Дорощев А. Л., Казамапов Ю. Г. Электромагнитная дефектоскопия. — М.: Машиностроение, 1980. — 232 с.
2. Дорощев А. Л. Применение электромагнитного метода контроля качества изделий в машиностроении // Дефектоскопия. — 1979. — № 3. — С. 5–19.
3. Билик Ю. З., Дорощев А. Л. Электромагнитные дефектоскопы типа «Проба» // Там же. — 1981. — № 6. — С. 53–58.
4. Вихретоковый дефектоскоп типа ТВД-А. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. — М.: Мин-во гражданской авиации, 1989. — 34 с.
5. А. с. № 838546, МКИ G 01N 27/90. Вихретоковый дефектоскоп / О. А. Селиванов, Ф. И. Жислин (СССР). — № 2834939/25-28; Заявл. 30.10.79; Оpubл. 15.06.81, Бюл. № 22. — 3 с.
6. Производственная инструкция ПИ 1.2.174–81 «Выявление поверхностных дефектов в металлических материалах с помощью электромагнитных высокочастотных статических дефектоскопов»: Утв. ВИАМ и ГосНИИЭРАТГА 15.05.81 / Минавиапром СССР. — М.: ОНТИ ВИАМ, 1981. — 39 с.
7. А. с. № 418788, МКИ G 01N 27/86. Вихретоковый дефектоскоп / М. Э. Хургин, Ф. А. Жислин, Р. И. Лихачев (СССР). — № 1769326/25-28; Заявл. 06.04.72; Оpubл. 5.03.74, Бюл. № 9. — 3 с.
8. А. с. № 669284, МКИ G 01N 27/86. Вихретоковый дефектоскоп / Н. С. Саворовский, Ю. З. Билик, С. С. Куцевичский, Ф. Д. Гулика (СССР). — № 2589464/25-28; Заявл. 13.03.78; Оpubл. 25.06.79, Бюл. № 23. — 2 с.
9. Серебрянников С. В., Хандецкий В. С. Автогенераторный преобразователь для контроля слабопроводящих материалов // Дефектоскопия. — 1984. — № 8. — С. 16–21.
10. А. с. № 744314, МКИ G 01N 27/86. Устройство для вихретокового контроля электропроводящих изделий / А. Г. Лейзерович (СССР). — № 2579359/25-28; Заявл. 13.02.78; Оpubл. 30.06.80, Бюл. № 24. — 3 с.
11. Арш Э. И., Твердоступ Н. И., Хандецкий В. С. Особенности построения автогенераторных измерителей на лямбда-диодах // Измерительная техника. — 1981. — № 1. — С. 53–55.
12. Алексеев А. П., Сайманин А. Е., Шатерников В. Е. Вопросы автоматического проектирования вихретоковых автогенераторных дефектоскопов, построенных на лямбда-диодах // Дефектоскопия. — 1989. — № 12. — С. 51–55.
13. А. с. № 1335862, МКИ G 01N 27/90. Вихретоковый дефектоскоп / А. П. Алексеев, А. Е. Сайманин (СССР). — № 4046225/25-28; Заявлено 04.04.86; Оpubл. 07.09.87, Бюл. № 33. — 2 с.
14. Сайманин А. Е., Алексеев А. П., Николашкин В. А. Вихретоковый дефектоскоп ВДИ-1 // Дефектоскопия. — 1989. — № 9. — С. 94–96.
15. Пат. 39207 України, МПК G 01 N 27/00. Вихрострумвий дефектоскоп / В. М. Учанін, В. В. Черленевський (Україна). — № у 2008 11903; Заявл. 07.10.2008; Оpubл. 10.02.2009, Бюл. № 3. — 4 с.
16. Учанін В. М. Розширення можливостей вихрострумвних дефектоскопів автогенераторного типу // Методи та прилади контролю якості. — 2008. — № 21. — С. 30–35.
17. А. с. № 794468, МКИ G 01N 27/90. Вихретоковый дефектоскоп / Э. И. Арш (СССР). — № 2746126/25-28; Заявлено 04.04.79; Оpubл. 07.01.81, Бюл. № 1. — 3 с.
18. Арш Э. И., Серебрянников С. В., Хандецкий В. С. Анализ измерительных режимов трехточечных автогенераторов

- с различным включением резонансных контуров // Измерит. техника. — 1982. — № 1. — С. 42–44.
19. Серебрянников С. В., Хандецкий В. С. Сопоставительное исследование метрологических характеристик автогенераторных преобразователей с различным включением контуров // Приборостроение. — Киев: Техника, 1983. — Вып. 34. — С. 35–38.
 20. Арш Э. И. Автогенераторные измерения. — М.: Энергия, 1976. — 136 с.
 21. А. с. № 326505 СССР, МКИ G 01 n 27/86. Способ дефектоскопии металлических изделий / А. Л. Дорощев, Ю. Г. Казамапов, Е. И. Карлун (СССР). — № 1230727/25-28; Заявл. 29.03.68; Оpubл. 19.01.72, Бюл. № 4. — 2 с.
 22. А. с. № 676921, МКИ G 01N 27/86. Вихретоковый дефектоскоп / М. В. Брук, В. С. Зельцер, М. Л. Кузьмицкий (СССР). — № 2543906/25-28; Заявл. 10.11.77; Оpubл. 30.07.79, Бюл. № 28. — 2 с.
 23. А. с. № 1429007, МКИ G 01N 27/90. Электромагнитный дефектоскоп / Г. Мок, А. Д. Покровский, А. И. Хвостов, Х. Штекигт (СССР, ГДР). — № 3863299/25-28; Заявл. 26.12.84; Оpubл. 07.10.88, Бюл. № 37. — 2 с.
 24. А. с. № 490004, МКИ G 01N 27/86. Электромагнитный дефектоскоп / В. В. Володарский, В. К. Жуков (СССР). № 1995834/25-28; Заявл. 14.02.74; Оpubл. 30.10.75, Бюл. № 40. — 2 с.
 25. А. с. № 1067420, МКИ G 01N 27/00. Вихретоковый дефектоскоп / В. Е. Шатерников, А. П. Алексеев, В. А. Анохин, В. М. Самарцев (СССР). — № 3455812/25-28; Заявл. 21.06.82; Оpubл. 15.01.84, Бюл. № 2. — 4 с.
 26. А. с. № 1089503, МКИ G 01N 27/90. Электромагнитный дефектоскоп ВДУ-20 / А. В. Далин, Э. А. Новобытов, Е. А. Князев и др. (СССР). — № 3325373/25-28; Заявл. 04.08.81; Оpubл. 30.04.84, Бюл. № 16. — 2 с.
 27. Пат. 2073232 RU, МКИ G 01N 27/80. Вихретоковый дефектоскоп и способ его настройки / В. С. Митюрин (Российская Федерация). — № 93006589/28; Заявл. 03.02.93; Оpubл. 10.02.97. — 9 с.
 28. А. с. № 728074 СССР, МКИ G 01 N 27/86. Электромагнитный дефектоскоп / А. Л. Дорощев, Ю. Г. Казамапов, В. Я. Силкин, С. А. Рубанов (СССР). — № 2666319/25-28; Заявл. 25.09.78; Оpubл. 15.04.80, Бюл. № 14. — 2 с.
 29. Петухов В. М., Топтыгин В. И., Хрулев А. К. Транзисторы полевые. — М.: Сов. радио, 1978. — 65 с.
 30. Учанін В. М., Черленевський В. В. Розробка та дослідження схеми регенерації коливаль автогенераторного дефектоскопа // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. — Вип. 14: Неруйнівний контроль матеріалів і конструкцій. — Львів: Фізико-механічний ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2009. — С. 117–124.
 31. ТУ У 33.2-30162879-001:2008. Дефектоскопи вихрострумвмі ВД 3.01Н, ВД 3.02Н, ВД 3.03Н. Технічні умови. — Уведені 24.07.08. — Львів: Центр «Леотест-Медіум», 2008. — 37 с.
 32. Механіка руйнування і міцність матеріалів. Довідн. посіб. / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О. П. Остап, В. М. Федірко, В. М. Учанін та ін. — Львів: Вид-во «Сполом», 2007. — 1068 с.
 33. Учанін В. Н., Дереча В. Я. Вихретоковый метод выявления поверхностных дефектов узлов авиационной техники в условиях эксплуатации // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2006. — № 4. — С. 20–28.
 34. Учанін В. Н., Александров С. А., Цыганов В. Ю. Опыт применения вихретокового дефектоскопа типа ЛЕО-ТЕСТ ВД 3.03 для контроля авиационных двигателей // Материалы 14-й Межд. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». — Ялта-Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2006. — С. 156–158.



ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ДОСТОВЕРНОСТЬ — ОБЪЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА КОНТРОЛЯ

С. М. МАЕВСКИЙ

Приведена методика определения достоверности контроля и показаны её недостатки для случая контроля (разбраковки) при вероятности ошибки контроля, близкой к вероятности нормы на параметр контроля. Показано, что при таких соотношениях вероятностей ошибки контроля и нормы на параметр контроля параметры, отвечающие норме, в значительной степени заменяются браковочными, в то же время определяемая достоверность сохраняет допустимую вероятность. Предложена новая формула оценки качества выполненного контроля, названная относительной достоверностью контроля, которая не имеет названных выше недостатков.

The paper presents the procedure for determination of testing validity and reveals its disadvantages for the case of control (rejection) at control error probability close to normal probability for control parameter. It is shown that at such relationships of control error and normal probabilities for control parameter, the parameters corresponding to the norm are replaced by reject parameters to a great extent, whereas the determined validity preserves its admissible probability. A new formula is proposed for assessment of the quality of the performed control, which was called relative validity of control, which is devoid of the above drawbacks.

Контроль как метод преобразования информации обязательно предусматривает выполнение двух последовательных действий: измерение значения параметра и по результату измерения — отнесения его к таковому, что отвечает установленной норме на этот параметр или наоборот — не отвечает. Оценкой качества выполнения контроля есть достоверность R , определяемая следующим образом [1, 2]:

$$R = 1 - P_{\text{ош}} \quad (1)$$

где $P_{\text{ош}}$ — оценка ошибки контроля, которая представляется совместной плотностью вероятности зависимых оценок: ошибок первого и второго рода:

$$P_{\text{ош}} = P_1 + P_2. \quad (2)$$

Для определения оценок ошибок контроля необходимо знать закон распределения плотности вероятности параметра контроля, а также погрешности измерения параметра контроля. Последнее определяется путем метрологического анализа тракта измерения системы или прибора, с помощью которого выполняется контроль [3]. При этом погрешности измерения параметра контроля должны быть представлены отдельно систематическими Δ_i и вероятностными σ_j составляющими, для которых суммарные значения представляются следующими выражениями:

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \Delta_{c,i}, \quad \sigma = \sqrt{\sum_{j=1}^m \sigma_j^2}. \quad (3)$$

Согласно этому выражению составляющие систематических погрешностей измерения параметра прибавляются, а суммарное среднеквадратичное отклонение вероятностных погрешностей измерения находим как корень квадратный суммарной дисперсии вероятностных погрешностей. Представляя ряд среднеквадратичных отклонений вероятностных погрешностей как ряд случайных чисел, распределенных по нормальному закону, определяем предельное значение суммарной возможной погрешности $\pm \delta$ по так называемому закону трех сигм для нормального закона распределения [4]:

$$\pm \delta = \pm 3\sigma = \pm 3 \sqrt{\sum_{j=1}^m \sigma_j^2}. \quad (4)$$

Тогда суммарную погрешность измерения представим следующей суммой:

$$\Delta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta_{c,i} \pm 3 \sqrt{\sum_{j=1}^m \sigma_j^2}. \quad (5)$$

Выполняя наиболее распространенный метод контроля, который условно назовем разбраковкой (отбором из ряда одинаковых наименований параметров контроля, соответствующих установленной норме на этот параметр) используем, как правило, нормальный, реже — прямоугольный законы распределения плотности вероятностей отклонений значений параметров контроля от номинального значения параметра (математического ожидания вероятностных отклонений).

В случае нормального закона плотности вероятности отклонений параметра (рис. 1) максимальные значения этих отклонений ограничиваем, как правило, значениями $\pm X_{\text{max}}$ на уровне оста-

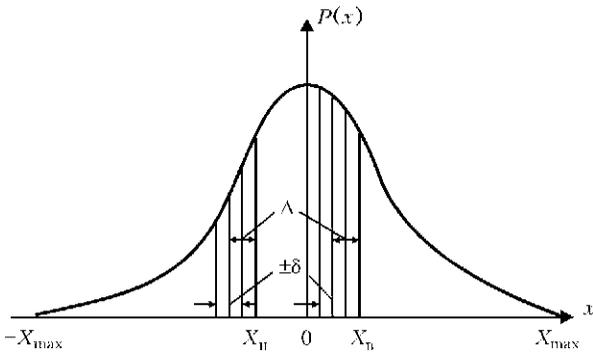


Рис. 1. Определение вероятности ошибок контроля при разбраковке

точной вероятности отклонений, равной 0,997. Тогда среднеквадратичное значение отклонений параметра контроля определяем как $\sigma = X_{\max}/3$. Значения параметров контроля, которые удовлетворяют условию $X_n \leq x \leq X_b$, являются нормой для этого параметра, а $x < X_n$ и $x > X_b$ — бракованные (здесь X_n, X_b — соответственно значение нижнего и верхнего так называемых браковочных уровней).

Ошибки контроля возникают для тех вероятностных значений параметров контроля, которые являются близкими по значениям к границам нормы (принадлежат зоне риска). Только в этом случае возможно ошибочное отнесение к браку параметров, принадлежащих норме (ошибка первого рода), и наоборот — отнесение бракованных значений параметров к норме (ошибка второго рода).

Если знак суммарной систематической погрешности измерения положительный, то ошибке первого рода отвечает вероятность существования параметров контроля в пределах зоны с границами $X_b - \Delta \leq x \leq X_b$. Ошибка второго рода возникает для параметров контроля, которые вероятно принадлежат к значениям $X_n - \Delta \leq x \leq X_n$. Совместная оценка вероятностных величин ошибок контроля за счет систематических составных погрешностей измерений параметра контроля для нормального закона распределения отклонений параметра от его номинального уровня равняется сумме этих вероятностных величин (данные вероятности зависимы, так как вероятностный параметр не может одновременно находиться в двух зонах риска):

$$P_{\text{ош}(\Delta)} = P_{1(\Delta)} + P_{2(\Delta)} = \int_{X_n - \Delta}^{X_n} P(x) dx + \int_{X_b}^{X_b - \Delta} P(x) dx, \quad (6)$$

где $P(x) = \frac{\exp(-x^2/2\sigma_{\text{пар}}^2)}{\sigma_{\text{пар}} \sqrt{2\pi}}$.

При определении ошибок контроля за счет существования суммарной вероятностной погрешности измерения параметров контроля необходимо учитывать совместную вероятность двух независимых вероятностей — знака случайной по-

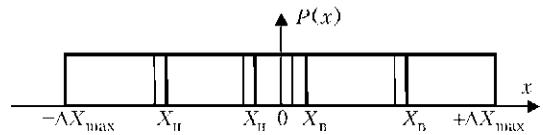


Рис. 2. К объяснению недостатка достоверности как оценки качества контроля $P(x) = 1/2X_{\max}$

решности и вероятность параметров контроля, измерение которых приводит к ошибкам контроля. Совместная вероятность ошибок первого и второго рода за счет существования вероятностных погрешностей измерений составляет:

$$P_{\text{ош}(\pm\delta)} = P_{1(\pm\delta)} + P_{2(\pm\delta)} = \left(\int_{X_n - \Delta}^{X_n - \Delta + \delta} P(x) dx + \int_{X_b - \delta - \Delta}^{X_b - \Delta} P(x) dx \right) + \left(\int_{X_n - \Delta - \delta}^{X_n - \Delta} P(x) dx + \int_{X_b - \delta}^{X_b - \Delta + \delta} P(x) dx \right). \quad (7)$$

Общую ошибку контроля как совместную вероятность ошибок за счет систематической и вероятностной погрешностей измерения параметра контроля представим в виде:

$$P_{\text{ош}} = P_{\text{ош}(\Delta)} + P_{\text{ош}(\delta)}. \quad (8)$$

По определенной вероятностной оценке ошибки контроля находим вероятностную оценку достоверности контроля:

$$R = 1 - P_{\text{ош}(\Delta)} - P_{\text{ош}(\delta)}. \quad (9)$$

Описанное выше является классической методикой определения достоверности контроля [1, 5]. Определенная таким образом достоверность действительно оценивает качество выполнения контроля в случае, если вероятностная ошибка контроля незначительна в сравнении с вероятностью значений параметров контроля, которые отвечают заданной норме. Тем не менее ситуация резко меняется в случае уменьшения диапазона значений параметров контроля, которые отвечают норме, при неизменной погрешности измерения значений параметра контроля. Это можно показать на примере прямоугольного закона распределения плотности вероятности отклонений параметров контроля от его номинального значения.

Рассмотрим реализацию практической задачи контроля (отбраковки). Из большого количества аналогичных изделий с известным номинальным значением определенного параметра $X_{\text{ном}} = 1000$ и прямоугольным симметричным законом плотности вероятности отклонений этого параметра в пределах $\pm \Delta X_{\max} = \pm 500$ отобрать изделия с от-

клонением параметра контроля в пределах ± 20 , ± 10 и ± 5 %. Пусть систематическая погрешность измерения составляет 2, 1 и 0,5 % от номинального значения $X_{\text{ном}}$, которое в единицах отклонения параметров контроля составляет 20, 10 и 5.

Достоверность контроля, определенная по формуле (1), в зависимости от вероятности нормы на контролируемый параметр будет соответственно равна: 0,96, 0,98 и 0,99.

Понятно, что данная формула определения достоверности контроля практически не отображает фактических потерь нормированных значений параметра при различных процентах вероятности нормы на параметр контроля. Для того, чтобы достоверность контроля полностью отображала качество выполненного контроля, автором предложено определять относительную достоверность R_0 по зависимости [5]:

$$R_0 = 1 - \frac{P_{\text{ош}}}{P_{\text{норм}}}, \quad 0 \leq R_0 \leq 1, \quad (10)$$

где $P_{\text{норм}}$ — вероятность нормы на параметр контроля.

На рис. 3 показаны результаты расчетов относительной достоверности контроля для разных значений вероятности нормы на контролируемый параметр, заданных в процентах. Комментируя приведенные данные, можем сделать вывод, что относительная достоверность контроля полностью оценивает качество выполненного контроля, а также потери нормированных значений параметра за счет ошибок первого и второго рода в зависимости от точности измерения параметра контроля.

Ошибка контроля второго рода (пропуск дефекта) несет значительно больший ущерб, чем ошибка первого рода. На основании этого формулу для определения относительной достоверности контроля (10) можем усилить, введя коэффициент $k > 1$ для ошибки контроля второго рода.

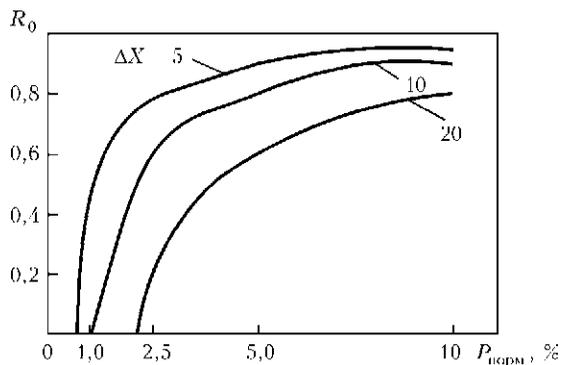


Рис. 3. Зависимость оценки относительной достоверности контроля отклонений параметра относительно границ нормы и погрешности измерения (номинальное значение параметра контроля — 1000, закон распределения плотности вероятности отклонений параметра от номинального значения — прямоугольный, максимальные отклонения параметра ± 500)

Индексация ошибки второго рода приводит к уменьшению относительной достоверности контроля, что является дополнительным сигналом для повышения точности измерения параметров контроля.

Относительная достоверность контроля может с таким же успехом использоваться для оценки качества неразрушающего контроля дефектов внутренней структуры материалов конструкций. Отличие состоит в том, что параметром контроля является размер вероятного дефекта внутренней структуры материалов. Для оценки достоверности контроля параметров дефектов используем закон распределения плотности вероятности модуля нормальной величины (рис. 4).

При реализации контроля качества внутренней структуры материалов элементов конструкций устанавливается один браковочный уровень, который отвечает исходному сигналу дефектоскопа пропорциональному допустимому эквивалентному размеру неоднородности. Определив суммарную систематическую Δ и предельную вероятностную $\pm \delta$ погрешности измерения параметра контроля, рассчитываем оценки ошибок первого и второго родов по описанной выше процедуре для отклонений параметра контроля, приближенных к браковочному уровню $X_{\text{бр}}$:

$$P_{\text{ош}} = P_1 + P_2 = \left(\int_{X_{\text{бр}} - \Delta}^{X_{\text{бр}}} P(x) dx + 0,5 \int_{X_{\text{бр}} - \Delta}^{X_{\text{бр}} - \Delta - \delta} P(x) dx \right) + \int_{X_{\text{бр}} - \Delta}^{X_{\text{бр}} - \Delta + \delta} P(x) dx. \quad (11)$$

Максимальным отклонением параметра контроля в случае контроля состояния внутренней структуры материалов будем считать сигнал, который отвечает максимальному размеру дефекта,

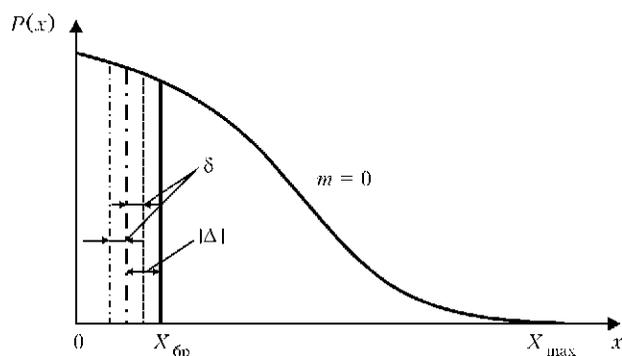


Рис. 4. Определение оценок ошибок неразрушающего контроля $(P(x) = \frac{\exp(-x^2/2\sigma^2)}{\sigma\sqrt{2\pi}})$



измеренного с помощью преобразователя дефектоскопа. Например, величина неоднородности материала приблизительно равна диаметру преобразователя дефектоскопа для случая акустического контроля материала детали конструкции.

Разработчики современных дефектоскопов независимо от метода неразрушающего контроля, реализованного в дефектоскопе, добиваются максимальной разрешающей способности, постоянно снижая таким образом браковочный уровень. В результате высокая достоверность контроля, определенная как $R = 1 - P_{\text{ош}}$, не несет, как было сказано выше, информации о фактическом качестве контроля. Даже небольшое значение оценки ошибки контроля при относительно узкой зоне нормы на параметр контроля приводит к неверному результату контроля, несмотря на высокую достоверность контроля, определенную по формуле (1).

И в этом случае использование предложенной формулы (10) для оценки качества контроля через относительную достоверность контроля дает возможность избежать недостатков традиционного способа определения достоверности и объективно оценить результат контроля.

Вывод

Относительная оценка достоверности контроля является объективной оценкой качества контроля, которая полностью отображает фактические потери контроля за счет ошибок контроля первого и второго рода.

На сегодня отсутствуют четкие стандарты и критерии для оценки качества контрольных операций, которые выполняются как в технических областях, так и в других направлениях деятельности человека.

Относительная достоверность и методика ее определения могли бы составить основу такого стандарта.

1. Орнатский П. П. Теоретические основы информационной техники. — Киев: Выш. шк., 1983. — 455 с.
2. Papadakis E. P. Inspection Based on Cost Averted // Materials Evaluation. — 1992. — 50, № 6. — P. 774–776.
3. Дунаев Б. Б. Точность измерений при контроле качества. — Киев: Техника, 1981. — 152 с.
4. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. — М.: Сов. радио, 1965. — 597 с.
5. Маевский С. М. Анализ достоверности контроля / Методы и приборы контроля качества. — 2005. — Вып. 13. — С. 29–32.

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

Поступила в редакцию
1.07.2009



Российское общество
по неразрушающему контролю
и технической диагностике

EF European Federation for
Non-Destructive Testing
NDT

10-я Европейская конференция по неразрушающему контролю

Москва 2010

7-11 июня

НК — основа безопасности

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

С. Г. САНДОМИРСКИЙ

Для выбора оптимального режима магнитного контроля качества отпуска среднеуглеродистых легированных сталей разработана формула для расчета остаточной намагниченности M_{rH} ферромагнитного материала после намагничивания до технического насыщения и частичного перемагничивания. Результаты расчета сопоставлены с экспериментом. Проведен анализ влияния напряженности перемагничивающего поля на зависимость M_{rH} стали 40X от температуры отпуска.

A formula is elaborated for computing the remanent magnetization of ferromagnetic steels after partial reversal magnetization, based on the intensity of the reversal magnetic field, coercive force, saturation magnetization, and remanent magnetization measured on the saturation hysteresis loop. The legitimacy of the formula use is verified.

Магнитный контроль физико-механических свойств изделий из ферромагнитных материалов получил широкое распространение в промышленности [1, 2]. Многочисленными исследованиями показано, что остаточная намагниченность M_r и коэрцитивная сила H_c являются магнитными параметрами, чувствительными к структуре многих конструкционных ферромагнитных материалов — сталей и чугунов [1–4]. Однако для среднеуглеродистых сталей зависимости M_r и H_c от температуры отпуска $T_{отп}$ после закалки имеют неоднозначный характер [1, 2, 4]. Для контроля качества средне- и высокотемпературного отпуска таких материалов предложено после намагничивания их до технического насыщения подвергнуть воздействию магнитного поля $H < 0$ и измерять остаточную намагниченность M_{rH} материала после выключения этого поля (рис. 1) [1, 5]. Методика опробована на многих марках сталей (30ХГСА, 30ХН2МФА, 34ХН3М, 35ХГСА, 40Х, 45, 50, 50РА, 60С2А, У9А и др.) и широко применяется в промышленности [1]. Однако выбор оптимальной напряженности перемагничивающего поля H проводят, как правило, эмпирически путем трудоемких экспериментальных исследований.

Целью работы является получение формулы для расчета остаточной намагниченности M_{rH} ферромагнитного материала после намагничивания до насыщения и частичного перемагничивания по основным магнитным параметрам предельной петли гистерезиса (коэрцитивной силе H_c , намагниченности насыщения M_s и остаточной намагниченности M_r и напряженности H перемагничивающего поля).

Анализ известных формул для расчета M_{rH} . В работе [6] получена формула (19) для зависимости M_{rH} от напряженности H перемагничивающего по-

ля (материал намагничен до насыщения M_s , затем перемагничен полем $H < 0$, после чего поле изменилось от H до 0). Во введенных обозначениях эта формула может быть записана в виде:

$$M_{rH} = \frac{M_r}{\pi K_{\Pi}} \left\{ F + 2 \left[1 - \frac{1}{\pi} F \right] \operatorname{arctg} \frac{H_c + H}{H_0} \right\}, \quad (1)$$

где $F = \operatorname{arctg} \frac{H_c - H}{H_0} - \operatorname{arctg} \frac{H_c}{H_0}$; $H_0 = \frac{H_c}{\operatorname{tg}(\frac{\pi}{2} K_{\Pi})}$;

$K_{\Pi} = \frac{M_r}{M_s} \neq 0$ — коэффициент прямоугольности гистерезиса.

В формуле (1) для расчета M_{rH} использованы только основные магнитные параметры материала: H_c , M_s и M_r , приведенные в справочной литературе для большинства известных сталей [1–4]. В работе [6] дано следующее методическое обос-

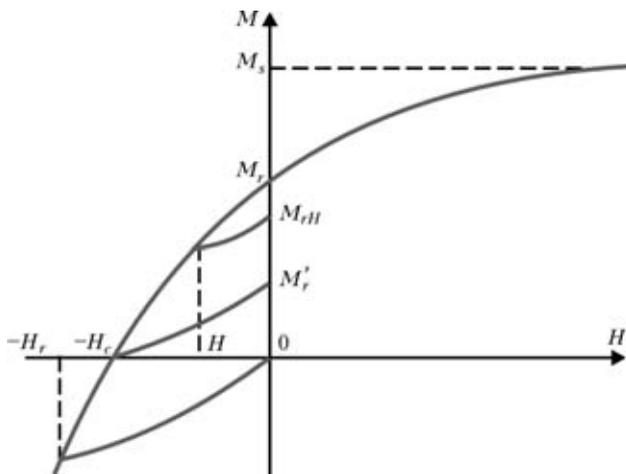


Рис. 1. Схема перемагничивания ферромагнитного материала после намагничивания до насыщения и введенные обозначения магнитных параметров



нование правомерности использования этой формулы (с использованием обозначений настоящей статьи): «...формула для расчета остаточной намагниченности на кривой возврата как функции напряженности размагничивающего поля правильно передает ход соответствующей экспериментальной зависимости: $M_{rH} = M_r$ при $H = 0$; $M_{rH} = 0$ при $H \rightarrow H_r > H_c$; $M_{rH} = -M_r$ при $H = -\infty$ ». Но анализ зависимости (1) показывает, что при $H/H_c < -8$ величина $M_{rH}/M_r < -1$ и при $H \rightarrow -\infty$ значение $M_{rH} \rightarrow -M_r$ «снизу», что физически неверно. Эта методическая погрешность формулы (1), не позволившая использовать ее в работе [7] для анализа влияния магнитной предыстории изделий на их остаточную намагниченность, не столь существенна для цели настоящей работы. Правомерность использования формулы (1) для расчета M_{rH} обоснована в работе [6] экспериментально только для закаленной стали ШХ15. Причем анализ результатов (рис. 3 в [6]) сопоставления расчета по (1) с экспериментом показал, что их удовлетворительное совпадение наблюдается только при значениях перемагничивающего поля H , близких к $-H_c$. При $H \approx -0,5H_c$, например, расчет по (1) приводит к результатам, заниженным по сравнению с экспериментом на 50 % и более. Для настоящей работы это неприемлемо.

В работе [8] на основе аппроксимации уравнением Больцмана результатов измерения зависимости $M_{rH} = M_{rH}(H)$ стали 75Г, отпущенной при различных температурах, получено следующее уравнение для расчета M_{rH} :

$$M_{rH} = M_r \left[\frac{2}{1 + e^{(H/H_r - 1)/0,22}} - 1 \right], \quad (2)$$

где H_r — релаксационная коэрцитивная сила (рис. 1).

Эта формула также имеет методическую неточность: при $H = 0$ результат вычисления M_{rH} равен $0,979 M_r$, а не M_r . Но эта методическая неточность формулы (2) несущественна для диапазона изменения перемагничивающих полей, важного для целей настоящей работы.

Обратим внимание на методическое различие трактовки понятия «коэрцитивная сила» в формулах (1) и (2). В (2) релаксационная коэрцитивная сила H_r — отрицательная величина (в соответствии с определением, приведенным в [1]). В (1) коэрцитивная сила H_c — величина положительная (в таком виде, как магнитное свойство материала, она и приведена в справочной литературе [1–4] для различных сталей и чугунов).

Хотя параметр H_r определен в [9] как один из основных магнитных параметров материала, методика его измерения не определена в соответствии с [10, 11] и сведения о его величине для большинства материалов отсутствуют в справочной

литературе [1–4]. Это не позволяет использовать формулу (2) для решения поставленной задачи.

Разработка формулы для расчета M_{rH} . Воспользуемся формулой, разработанной и обоснованной в работе [12] для расчета релаксационной коэрцитивной силы H_r (формула (4) в [12]):

$$H_r = H_c \left[1 + \frac{\pi}{2} \frac{M_r'}{M_s} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi K_n}{2} \right) \right] \quad (3)$$

где M_r' — остаточная намагниченность материала после перемагничивания полем напряженностью $-H_c$ и выключения этого поля (рис. 1).

Из (1) при $H = -H_c$ получим для остаточной намагниченности M_r' материала после перемагничивания полем напряженностью $-H_c$:

$$M_r' = \frac{M_s}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \left(2 \operatorname{tg} \frac{\pi K_n}{2} \right) - \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg} \frac{\pi K_n}{2} \right) \right]. \quad (4)$$

Подставляя (3) и (4) в (2) и производя простейшие преобразования, получаем формулу для расчета остаточной намагниченности M_{rH} ферромагнитного материала после частичного перемагничивания:

$$M_{rH} = M_r \left[\frac{2}{1 + e^{-4,55 \left(\frac{H}{H_c S} + 1 \right)}} - 1 \right], \quad (5)$$

$$\text{где } S = 1 + \frac{\operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg} \frac{\pi K_n}{2} \right) - \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg} \frac{\pi K_n}{2} \right)}{2 \operatorname{tg} \left(\frac{\pi K_n}{2} \right)}.$$

В формуле (5) для расчета M_{rH} использованы только основные магнитные параметры материала: H_c , M_s и M_r , приведенные в справочной литературе для большинства известных сталей [1–4].

Экспериментальное обоснование формулы (5) для расчета M_{rH} . Для обоснования правомерности использования формулы (5) для решения поставленной задачи воспользуемся результатами независимых экспериментов для закаленной стали ШХ15 и стали 75Г, закаленной от 860 °С и отпущенной при температурах 250 и 350 °С. Основные магнитные параметры сталей 75Г и ШХ15, использованные при расчете, приведены в табл. 1 (справочные данные о H_c и M_s стали 75Г из табл. 40.2 в [4], данные о M_r стали 75Г из рис. 6, а в [8], данные о H_c , M_r и M_s закаленной стали ШХ15 из [6]). При сопоставлении расчетов по (5) и эксперимента (рис. 2) использованы данные о результатах измерения M_{rH} сталей 75Г и ШХ15 при различной напряженности H перемагничивающего поля, приведенные на рис. 6, а в работе [8] и рис. 3 в [6]. На рис. 2 представлены также резуль-



Таблица 1. Магнитные параметры сталей ШХ15 и 75Г (кА/м) после закалки от 850 °С и отпуска при различных температурах $T_{отп}$

Марка стали/ $T_{отп}$, °С	H_c	M_s	M_r
ШХ15/без отпуска	4,75	1165	713
75Г/250	2,13	1580	871
75Г/350	1,5	1599	976

Таблица 2. Магнитные параметры стали 40Х (кА/м) после закалки от 860 °С и отпуска при различных температурах $T_{отп}$

$T_{отп}$, °С	H_c	M_s	M_r
150	2,96	1575	842
200	2,65	1585	878
250	1,78	1644	910
300	1,49	1642	886
350	1,44	1651	854
400	1,32	1650	918
450	1,22	1648	1053
500	1,15	1643	1189
550	1,20	1638	1217
600	1,16	1630	1189
650	1,05	1607	1181
700	0,95	1602	1181

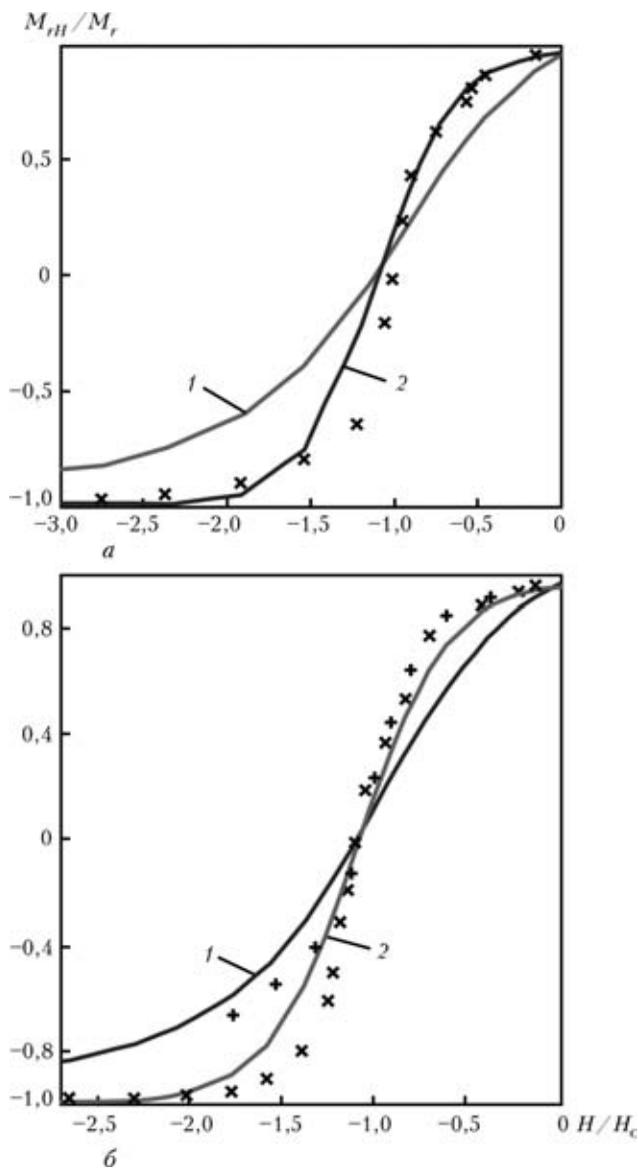


Рис. 2. Зависимость остаточной намагниченности M_{rH} сталей 75Г ($a - T_{отп} = 250$ °С, $b - 350$ °С) и ШХ15 (b) после намагничивания до насыщения от напряженности перемагничивающего поля H (1, 2 — расчет соответственно по формулам (1) и (5) при $K_n = 0,551$ (a) и $0,611$ (b)); экспериментальные точки: + сталь ШХ15, X сталь 75Г)

таты расчета зависимостей $M_{rH} = M_{rH}(H)$ по формуле (1). Замеченное на рис. 6, a в [8] перепутывание обозначений экспериментальных точек для стали 75Г, отпущенной при 20 и 200 °С (H_r закаленной стали 75Г, например, оказалось меньше H_c этой стали по [4]), не позволило использовать эти результаты.

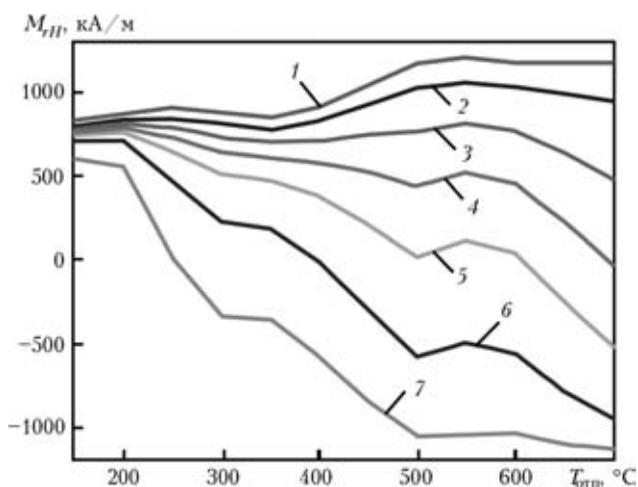


Рис. 3. Зависимости остаточной намагниченности M_{rH} стали 40Х, закаленной от 850 °С, от температуры отпуска $T_{отп}$ после намагничивания до насыщения и перемагничивания полем H различной напряженности (1–7: расчет по (5) при H (кА/м) соответственно равных 0; 0,5; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5 и 2,0)

Представленные на рис. 2 результаты показывают, что полученная формула (5) для использованных в экспериментах материалов обеспечивает вполне приемлемое совпадение расчетных и экспериментальных результатов. Погрешность расчета M_{rH} по известной формуле (1) по мере удаления напряженности перемагничивающего поля H от значения $H \approx -H_c$ возрастает и становится неприемлемой. Учитывая, что диапазон изменения магнитных свойств использованных в экспериментах материалов (табл. 1) достаточно широко охватывает диапазон изменения магнитных параметров конструкционных ферромагнитных материалов (сталей и чугунов), разработанная формула (5) может быть рекомендована для расчета M_{rH} при оптимизации режима перемагничивания материалов в магнитном структурном анализе.



Пример использования формулы (5) для расчета влияния напряженности H перемагничивающего поля на характер зависимости остаточной намагниченности M_{rH} стали 40X от температуры отпуска представлен на рис. 3. Для расчета использованы справочные данные (табл. 26.2 в [4]) о характере изменения основных магнитных параметров предельной петли гистерезиса стали 40X от температуры отпуска $T_{отп}$, приведенные в табл. 2.

Представленные на рис. 3 результаты соответствуют экспериментально установленным особенностям изменения анализируемых зависимостей этой и аналогичных ей по магнитным характеристикам сталей с изменением напряженности H перемагничивающего поля [1]. Видно, что варьируя H , можно обеспечить однозначный характер зависимости $M_{rH} = M_{rH}(T_{отп})$ практически для любого диапазона изменения $T_{отп}$.

Выводы

В результате проведенных исследований разработана и экспериментально обоснована формула (5) для расчета остаточной намагниченности ферромагнитного материала после намагничивания до насыщения и частичного перемагничивания по коэрцитивной силе, намагниченности насыщения и остаточной намагниченности материала на предельной петле гистерезиса и напряженности перемагничивающего поля. Использование полученной формулы позволит избежать трудоемких экспериментальных исследований по выбору оптимальных режимов перемагничивания среднеуглеродистых легированных сталей при магнитном контроле качества их средне- и высокотемпературного отпуска.

Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси,
Минск

1. *Неразрушающий контроль*. Справ.: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. — Т.6. — М.: Машиностроение, 2006. — 848 с.
2. *Сандомирский С. Г.* Современные возможности магнитного контроля структуры изделий (Обзор) // В мире неразруш. контроля. — 2009. — № 1. — С. 40–46.
3. *Морозова В. М., Михеев М.Н.* Магнитные и электрические свойства сталей после различных термических обработок. Магнитные и электрические свойства закаленных и отпущенных сталей // Тр. Ин-та физики металлов УфАН СССР. — Вып. 24. — Свердловск, 1965. — С. 3–35.
4. *Бида Г. В., Ничипурук А. П.* Магнитные свойства термообработанных сталей. — Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — 218 с.
5. *Михеев М. Н., Горкунов Э. С., Дунаев Ф. Н.* Неразрушающий магнитный контроль закаленных и отпущенных изделий из низколегированных конструкционных и простых углеродистых сталей. // Дефектоскопия. — 1977. — № 6. — С. 7–13.
6. *Мельгуй М. А.* Формулы для описания нелинейных и гистерезисных свойств ферромагнетиков // Там же. — 1987. — № 11. — С. 3–10.
7. *Сандомирский С. Г.* Влияние магнитной предыстории изделия на результат контроля его физико-механических свойств магнитным методом при намагничивании в разомкнутой магнитной цепи (ограничения возможностей метода). 2. Аналитическое моделирование // Там же. — 2004. — № 6. — С. 72–79.
8. *Бида Г. В.* О соотношении обратимых и необратимых процессов при намагничивании и перемагничивании ферромагнитных материалов // Там же. — 2009. — № 4. — С. 8–20.
9. *ГОСТ 19693–74.* Материалы магнитные. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1974. — 32 с.
10. *Магнитные измерения* / Е. Т. Чернышев, Е. Н. Чечурина, Н. Г. Чернышева, Н. В. Студенцов. — М.: Изд-во стандартов, 1969. — 248 с.
11. *ГОСТ 8.377–80.* Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 21 с.
12. *Загидулин Р. В., Мужеицкий В. Ф.* Расчет величины релаксационной коэрцитивной силы ферромагнитного материала // Контроль. Диагностика. — 2006. — № 3. — С. 14–16.

Поступила в редакцию
04.09.2009

Восемнадцатая ежегодная международная конференция и выставка

“Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики” 4–8 октября 2010, Ялта



Организаторы

УИЦ «Наука. Техника. Технология», Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики, Российское общество неразрушающего контроля и технической диагностики, Белорусская ассоциация неразрушающего контроля и технической диагностики, Институт электро-сварки им Е.О. Патона НАНУ, Днепрпетровский нац. университет, НПП «Машиностроение»

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

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ПРОШЕДШЕГО ЧЕРЕЗ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ ОБЪЕКТЫ

В. В. ПАВЛЮЧЕНКО, Е. С. ДОРОШЕВИЧ

На основании проведенных экспериментальных исследований установлены правила пространственно-временного распределения нормальной составляющей напряженности магнитного поля H_n в прошедшей через электропроводящие объекты полуволне в зависимости от положения края объекта относительно оси, проходящей через центр датчика магнитного поля и ось линейного токопровода. Установлены положения объекта, соответствующие максимуму H_n и моменты времени, при которых H_n меняет полярность.

Proceeding from the conducted experimental studies, rules were established for space-time distribution of the normal component of magnetic field intensity H_f in the half-waved, which has passed through electrically-conducting objects, depending on the position of the object edge relative to the axis passing through the center of the magnetic field sensor and axis of linear current conduit. Positions of the object corresponding to maximum H_f and moments of time, at which H_f changes its polarity, were established.

Проникновение электромагнитных волн в электропроводящие среды и их отражение от поверхностей этих сред рассмотрено в ряде теоретических работ [1–6], в которых путем решения уравнений Максвелла найдены распределения величины напряженности магнитного поля по координате от поверхности вглубь бесконечного проводящего полупространства при воздействии на поверхность раздела сред плоских электромагнитных волн.

Для образцов конечных размеров и разной формы могут быть получены приближенные решения этих уравнений. Поэтому точные результаты можно получить только экспериментальными методами. При этом для решения задач дефектоскопии и других прикладных задач необходимо знать распределения импульсных магнитных полей локальных источников вблизи электропроводящих объектов с использованием датчиков, работающих в реальном масштабе времени, а также в режиме остаточного намагничивания.

Результаты экспериментальных работ по воздействию импульсным магнитным полем на объекты из электропроводящих материалов представлены в работах [7–9], в которых определены пространственно-временные зависимости величины тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля вблизи электропроводящих объектов.

Целью работы является определение закономерностей изменения нормальной составляющей напряженности магнитного поля при прохождении изменяющегося во времени магнитного поля через электропроводящие объекты, оси симметрии которых параллельны и расположены на

разных расстояниях от оси прямолинейного токопровода первичного источника поля.

Исследования проведены на тиристорной установке с записью импульсов тока линейного источника импульсного магнитного поля на осциллограф с послесвечением. В качестве датчиков магнитного поля использовали магнитные носители и датчики Холла.

Источник импульсного магнитного поля — линейный токопровод, через который пропускали импульсы тока заданных конфигураций.

Величина напряженности импульсного магнитного поля, создаваемого электропроводящим объектом при воздействии на него импульсным магнитным полем первичного источника, зависит от удельной электропроводности материала объекта σ , его магнитной проницаемости μ , а также от толщины объекта и его плоскостных размеров и соотношения этих размеров с расстоянием от источника поля до поверхности объекта.

Методика эксперимента, приведенного на рис. 1, состояла в следующем. Между жестко укрепленными источниками магнитного поля в виде прямолинейного токопровода I с током $I = I(t)$ и датчиком магнитного поля 2 перемещали образец 3 из электропроводящего материала в плоскости PP , перпендикулярной оси FF , проходящей через ось токопровода I и центр симметрии датчика 2 . Перемещение осуществляли с шагом сканирования h и для каждого положения образца относительно датчика, в качестве которого использовали датчик Холла, измеряли зависимость величины снимаемого с него напряжения U от времени t : $U = U(t)$. Отсчет координаты x перемещения края образца a в плоскости PP проводили от оси FF

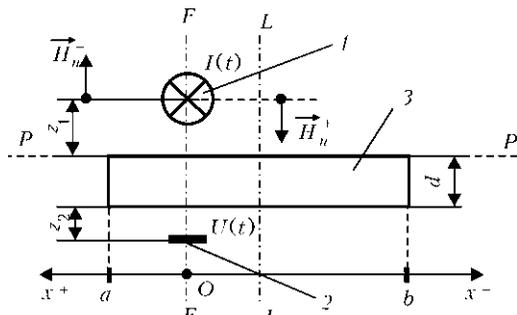


Рис. 1

(точка 0). При этом расстояние x от края образца a до оси FF в случае, если образец не дошел до оси FF , обозначали x^- , а если край образца перешел через ось, то расстояние до края образца обозначали x^+ . Через z_1 и z_2 обозначены расстояния от поверхностей образца 3 соответственно до оси токопровода 1 и центра датчика 2.

Нормальная составляющая напряженности магнитного поля токопровода со стороны образца (или большей части образца) обозначена H_n^+ , а с противоположной стороны H_n^- ; LL — плоскость симметрии образца; b — второй край образца.

Зависимости нормальной составляющей импульсного магнитного поля от времени при разных смещениях образца в виде пластины размерами $0,8 \times 22 \times 60 \cdot 10^{-9}$ м³ могут быть определены на основании данных, представленных на рис. 2 — рис. 5 [9]. На всех представленных ниже рисунках разность значений напряжений U , снимаемых с датчика Холла и содержащих и не содержащих полезный сигнал, прямо пропорциональна величине нормальной составляющей магнитного поля H_n . На рис. 2 показаны зависимости напряжения U , снимаемого с датчика Холла, от времени t при расстоянии от оси датчика до оси токопровода

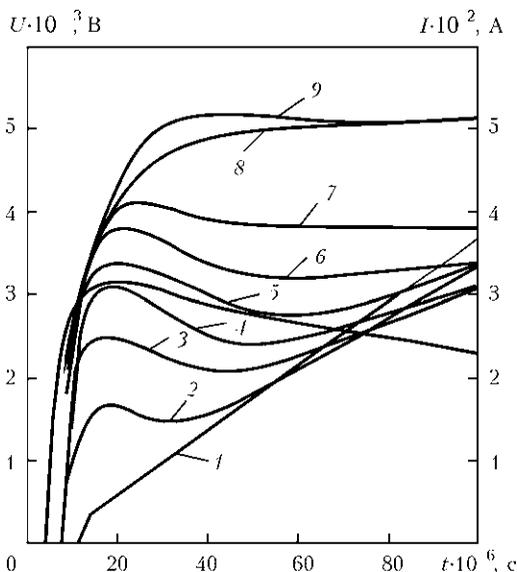


Рис. 2

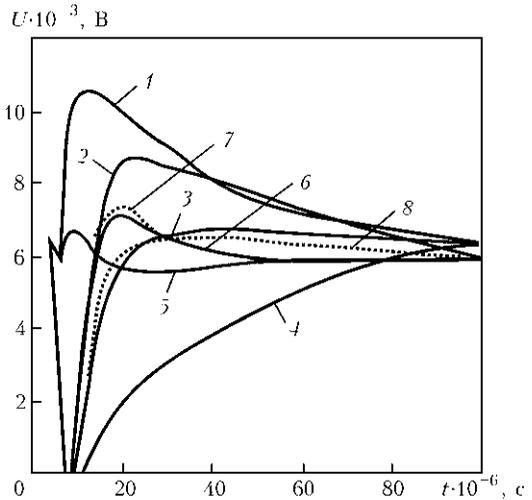


Рис. 3

вода $3,1 \cdot 10^{-3}$ м и до ближней поверхности образца $1,5 \cdot 10^{-3}$ м на расстояниях x^+ от края образца до проекции оси токопровода: 1 — $3,0 \cdot 10^{-3}$; 2 — $4,0 \cdot 10^{-3}$; 3 — $5,0 \cdot 10^{-3}$; 4 — $6,0 \cdot 10^{-3}$; 5 — $7,0 \cdot 10^{-3}$; 6 — $8,0 \cdot 10^{-3}$; 7 — $12,0 \cdot 10^{-3}$ м, а также семейство кривых $U = U(t)$ 8 и 9, не содержащих полезный измеряемый сигнал, и зависимость 10 тока I источника магнитного поля от времени t .

На рис. 3 показана зависимость напряжения U полного сигнала, снимаемого с датчика Холла, от времени t при расстояниях x^+ края образца до проекции оси токопровода: 1 — 0; 2 — $0,5 \cdot 10^{-3}$; 3 — $1,0 \cdot 10^{-3}$; 4 — $2,0 \cdot 10^{-3}$ м, а также соответствующие им зависимости 5–8 значения напряжения $U(t)$, не содержащие полезный измеряемый сигнал. Расстояние от оси датчика до оси токопровода $2,6 \cdot 10^{-3}$ м и до ближней к датчику стороне образца $1,0 \cdot 10^{-3}$ м.

На рис. 4 изображены начальные участки зависимостей напряжения U полного снимаемого с датчика Холла сигнала от времени t 1–3 при смещении x^+ соответственно: 0; $1,0 \cdot 10^{-3}$ и $2,0 \cdot 10^{-3}$ м, а также соответствующие им зависимости 4–6 $U = U(t)$, снимаемого с датчика сигнала, не содержащие полезный измеряемый сигнал. Здесь же показана зависимость 7 тока I источника магнитного поля от времени t . Для удобства изображения зависимостей на одном рисунке нулевые уровни напряжения для них выбраны разные.

На рис. 5 показаны зависимости напряжения U полного снимаемого с датчика сигнала 1–3 соответственно в отсутствие образца и при смещениях x^+ $0,5 \cdot 10^{-3}$ и $4,0 \cdot 10^{-3}$ м и соответствующие им зависимости 4–6 напряжения $U = U(t)$, снимаемого с датчика сигнала, не содержащие полезный измеряемый сигнал.

Анализ данных, представленных на рис. 2–5, позволяет заключить следующее. При $x = 0$, т. е. при совпадении края образца с проекцией оси токопровода, нормальная составляющая H_n в начальный момент времени совпадает по направле-

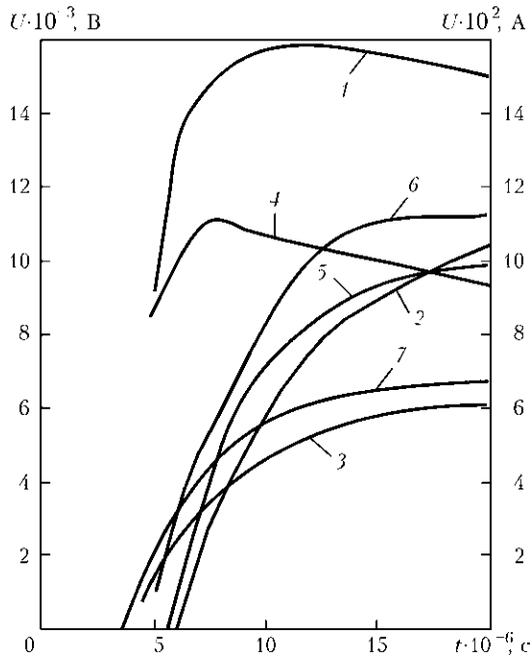


Рис. 4

нию с H_n^+ , а на некотором расстоянии x_p^+ , которое назовем расстоянием изменения полярности, меняет направление на противоположное, быстро достигая максимальной величины, после чего плавно убывает с расстоянием и при совпадении края образца с проекцией оси токопровода становится близкой нулю.

На основании представленных результатов авторами определены пространственно-временные закономерности изменения величины нормальной составляющей напряженности магнитного поля H_n с расстоянием до оси линейного источника магнитного поля.

На рис. 6 представлены зависимости напряжения U , снимаемого с датчика Холла, от времени t при расстояниях x^+ края образца до проекции оси токопровода: 1 — 0; 2 — $1 \cdot 10^{-3}$; 3 — $3 \cdot 10^{-3}$; 4 — $5 \cdot 10^{-3}$ м, а также не содержащий измеряемый сигнал

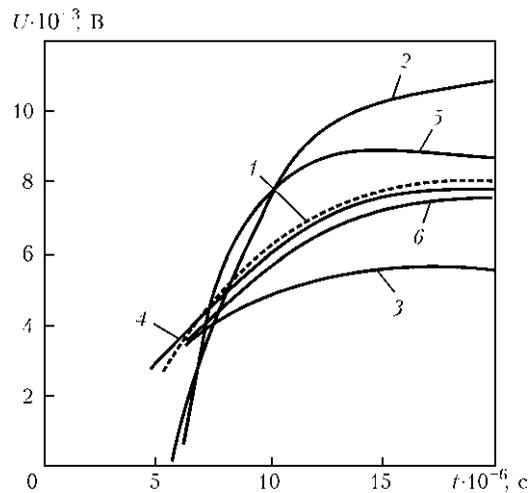


Рис. 5

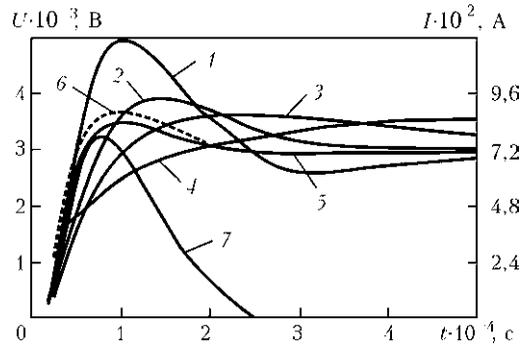


Рис. 6

сигнал зависимости $U = U(t)$ 5 (образец отсутствует) и 6 (при наличии образца) и зависимость 7 силы тока источника первичного поля от времени t .

Расстояние от оси датчика до оси токопровода $7,9 \cdot 10^{-3}$ м и до ближайшей поверхности образца $0,7 \cdot 10^{-3}$ м. Размеры образца из алюминия $3,0 \times 30 \times 50 \cdot 10^{-9}$ м³.

Величина разности напряжений U , содержащих и не содержащих измеряемый сигнал, прямо пропорциональна величине нормальной составляющей напряженности магнитного поля H_n .

На рис. 7 представлены зависимости напряжения U , снимаемого с датчика Холла, от времени t при расстояниях x^- края образца до проекции токопровода: 1 — 0; 2 — $1 \cdot 10^{-3}$; 3 — $2 \cdot 10^{-3}$; 4 — $3 \cdot 10^{-3}$; 5 — $5 \cdot 10^{-3}$; 6 — $8 \cdot 10^{-3}$; 7 — $12 \cdot 10^{-3}$ м, а также не содержащий измеряемый сигнал зависимости $U = U(t)$ 8 (образец отсутствует) и 9 (при наличии образца) и зависимость 10 силы тока источника первичного поля от времени t . Из рис. 6 и 7 следует, что при приближении края образца к проекции оси токопровода в прошедшей волне возникает нормальная составляющая H_n^+ напряженности магнитного поля, совпадающая с направлением H_n токопровода со стороны образца. При этом увеличение максимума H_n^+ происходит

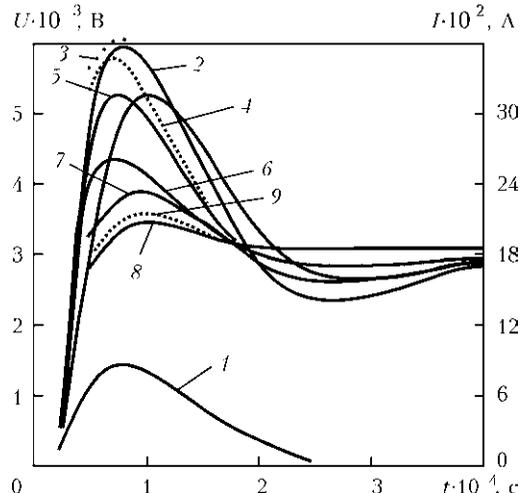


Рис. 7

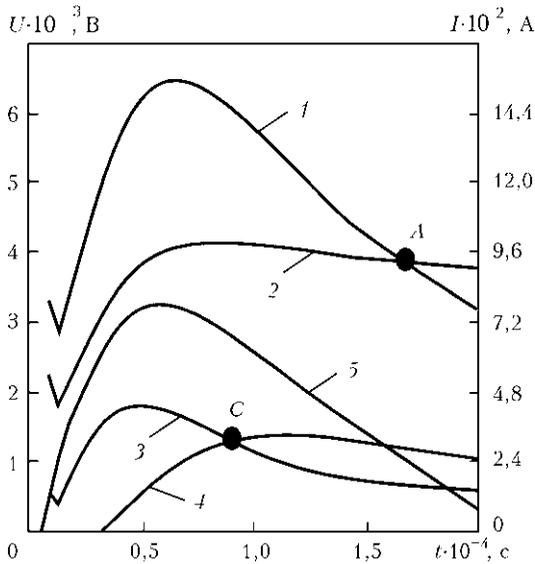


Рис. 8

до расстояния $x_{к}^-$, которое назовем критическим.

На рис. 8 изображены зависимости величины напряжения U , снимаемого с датчика Холла, от времени t для случаев: 1 — толщина образца $d = 3,0 \cdot 10^{-3}$ м, полный сигнал U ; 2 — то же, что и 1 при отсутствии полезного сигнала; 3 — толщина образца $d = 2,3 \cdot 10^{-4}$ м, полный сигнал U ; 4 — то же, что и 3 при отсутствии полезного сигнала; 5 — зависимость силы тока I первичного источника поля от времени t .

Разность напряжений U зависимостей 1 и 2, а также зависимости 3 и 4 прямо пропорциональна величине нормальной составляющей напряженности магнитного поля H_n .

Расстояние от оси датчика до оси токопровода $9,2 \cdot 10^{-3}$ м и до ближайшей поверхности образца $0,7 \cdot 10^{-3}$ м.

Размеры образцов из алюминия в плоскости $30 \times 50 \cdot 10^{-6}$ м².

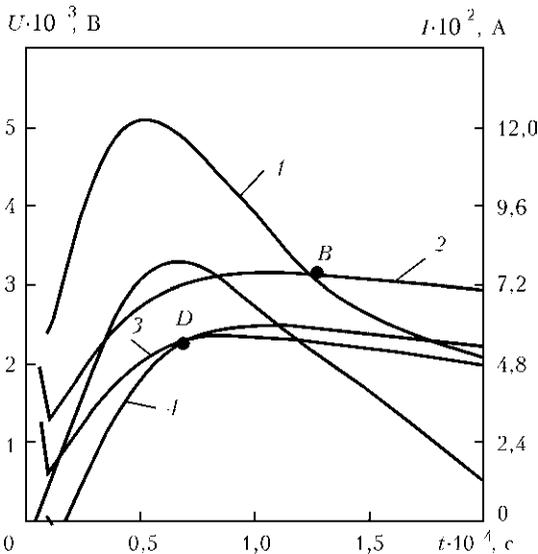


Рис. 9

Край образца находится на расстоянии $x^- = 2 \cdot 10^{-3}$ м от проекции оси токопровода на плоскость перемещения образца, т. е. не доходит до оси.

Буквами A и C обозначены точки, в которых H_m меняют полярность, причем соответствующее им время: $t_A = 1,6 \cdot 10^{-4}$; $t_C = 0,9 \cdot 10^{-4}$ с.

На рис. 9 показаны зависимости напряжения U , снимаемого с датчика Холла, от времени t для случаев: 1 — толщина образца $d = 8,0 \cdot 10^{-4}$ м, полный сигнал U ; 2 — то же, что и 1 при отсутствии полезного сигнала; 3 — толщина образца $d = 7 \cdot 10^{-5}$ м, полный сигнал U ; 4 — то же, что и 3 при отсутствии полезного сигнала; 5 — зависимость силы тока I первичного источника поля от времени t .

Разность напряжений U зависимостей 1 и 2, а также зависимостей 3 и 4 прямо пропорциональна величине нормальной составляющей напряженности магнитного поля H_m .

Расстояние от оси датчика до оси токопровода $9,2 \cdot 10^{-3}$ м и до ближайшей поверхности образца $0,7 \cdot 10^{-3}$ м.

Размеры образцов из алюминия в плоскости $30 \times 50 \cdot 10^{-6}$ м².

Край образца находится на расстоянии $x^- = 2 \cdot 10^{-3}$ м от проекции оси токопровода на плоскость перемещения образца, т. е. не доходит до оси.

Буквами B и D обозначены точки, в которых H_m меняют полярность, причем соответствующее им время: $t_B = 1,2 \cdot 10^{-4}$ с; $t_D = 0,7 \cdot 10^{-4}$ с.

Все зависимости, изображенные на рис. 2–9, получены копированием с экрана запоминающего осциллографа предварительно откалиброванного стандартными сигналами генератора.

На основании данных, представленных на рис. 2–9, найдены закономерности поведения нормальной составляющей напряженности магнитного поля для прошедшей через электропроводящие объекты полуволны, которые могут быть применены для импульсов магнитного поля другой формы, а также любых изменяющихся во времени магнитных полей. Эти закономерности названы нами правилами.

Выводы

Прямолинейный токопровод расположен параллельно плоскости листа из электропроводящего материала. Местоположение листа отсчитывается от проекции оси токопровода на плоскость перемещения листа. По токопроводу пропускают изменяющийся во времени ток. В первый момент времени он создает магнитное поле с нарастающей по абсолютной величине напряженностью. Величину и направление нормальной составляющей напряженности магнитного поля измеряют непосредственно под осью прямолинейного токопрово-



да ниже уровня плоскости перемещения электропроводящего листа. В отсутствие электропроводящих объектов вблизи источника первичного магнитного поля величина нормальной составляющей напряженности магнитного поля под ним равна нулю.

1. При воздействии нарастающим магнитным полем на электропроводящую полуплоскость конечной толщины, край которой не доходит до проекции оси токопровода на плоскость перемещения полуплоскости, в прошедшей волне возникает нормальная составляющая напряженности магнитного поля H_n , направление которой в начальный момент действия поля совпадает с направлением нормальной составляющей напряженности магнитного поля токопровода со стороны электропроводящей полуплоскости.

2. При воздействии нарастающим магнитным полем на электропроводящую полуплоскость конечной толщины, край которой перешел через проекцию оси токопровода на плоскость перемещения полуплоскости, в прошедшей волне возникает нормальная составляющая напряженности магнитного поля H_n , направление которой в начальный момент действия поля противоположно направлению нормальной составляющей напряженности магнитного поля токопровода со стороны электропроводящей полуплоскости.

3. Под бесконечно протяженной плоскостью, а также под осью симметрии электропроводящего листа конечных размеров нормальная составляющая напряженности магнитного поля H_n равна нулю.

4. При переходе импульса магнитного поля из возрастающего в убывающий нормальная составляющая напряженности магнитного поля H_n меняет свою полярность на противоположную.

5. Время t_p , через которое нормальная составляющая напряженности магнитного поля H_n меняет свою полярность на противоположную, исчисляемое от момента максимума напряженности магнитного поля первичного источника, зависит от толщины электропроводящего объекта.

6. Величина напряженности магнитного поля достигает максимума при расстоянии от края полуплоскости до проекции оси токопровода на расстоянии x_k , которое назовем критическим. Вели-

чина x_k зависит от толщины материала.

7. Величина напряженности магнитного поля становится равной нулю при расстоянии от края полуплоскости до проекции оси токопровода на расстоянии x_p^+ , которое назовем расстоянием изменения полярности. Величина x_p^+ пропорциональна толщине материала.

Таким образом, воздействуя на объект одиночными импульсами магнитного поля линейного токопровода с разными временами нарастания и измеряя величину нормальной составляющей магнитного поля H_n в прошедшей полуволне, можно получать информацию о магнитных и электрических свойствах материала объекта, его размерах и наличии в нем дефектов сплошности путем сравнения полученных распределений H_n с эталонными распределениями H_n для известных материалов. В силу того, что полученные распределения H_n несут огромный объем информации, указанные параметры объекта можно определять однозначно и с высокой точностью.

Полученные результаты могут быть использованы в дефектоскопии, при разработке конструкции индукционных нагревательных приборов и в системах управления магнитными полями.

1. Тамм И. Е. Основы теории электричества. — М.: Наука, 1976. — 410 с.
2. Установки индукционного нагрева / Под ред. А. Е. Слухоцкого. — Л.: Энергоиздат, 1981. — 180 с.
3. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. — М.: Мир, 1972. — 260 с.
4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. — М.: Высш. шк., 1967. — 263 с.
5. Нейман Л. Р., Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехники. — М.-Л.: Энергоиздат, 1949. — 420 с.
6. Поливанов К. М. Ферромагнетики. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. — 256 с.
7. Павлюченко В. В., Дорошевич Е. С. Взаимодействие импульсных электромагнитных полей с поверхностями металлических образцов // Вестник БНТУ. — Минск, 2006. — № 4. — С. 89–95.
8. Павлюченко В. В. Законы распределения напряженности импульсного магнитного поля вблизи электропроводящих материалов // Там же. — 2007. — № 3. — С. 66–71.
9. Павлюченко В. В., Дорошевич Е. С. Взаимодействие электропроводящего объекта с локальным источником импульсного магнитного поля // Материалы V междунар. науч.-техн. конф. БНТУ, Минск. — 2007. — Т.2. — С. 434–437.



УДК 621.129.32

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ РАССЕЯННОГО СТРУКТУРОЙ МАТЕРИАЛА СИГНАЛА (Часть 1)

В. В. КОШЕВОЙ, И. М. РОМАНИШИН, Р. И. РОМАНИШИН, Р. В. ШАРАМАГА

Изложен метод ультразвуковой компьютерной томографии на основе регистрации обратно рассеянного структурой материала сигнала, обычно определяемого в ультразвуковой дефектоскопии термином «структурный шум». Приведена теория метода и результаты численного моделирования.

It has been stated the method of ultrasonic computerized tomography on the basis of registration of the backscattered by a material structure signal, generally determined in ultrasonic defectoscopy by a term «structural noise». The theory of method and results of numerical simulation is resulted.

Зарождение и развитие дефектов в металле является пространственно-временным процессом и сопровождается усилением неоднородности пространственного распределения (ПР) его физико-механических и структурных характеристик, а также параметров напряженно-деформированного состояния. Одним из самых достоверных подходов, позволяющих оценивать преддефектное состояние металла и прогнозировать локализацию областей возможного возникновения дефектов, является экспериментальное определение ПР этих характеристик. Для конструкционных металлов преддефектным можно считать такое состояние, когда дефекты металла, т. е. нарушение его сплошности, еще не сформированы, но уже состоялись локальные изменения его микроструктуры, повышающие вероятность появления дефектов [1–3].

В качестве примера можно привести актуальную в настоящее время в ультразвуковой (УЗ) дефектоскопии задачу оценки изменения степени эксплуатационной деградации металла вдоль стенки трубопровода с агрессивным носителем. На рис. 1 приведены фрагменты микроструктуры металла, зафиксированные в различных слоях вдоль толщины стенки трубопровода после азотирования. Учитывая, что агрессивный носитель в большей степени влияет на деградацию механических свойств металла внутренних слоев трубопровода, с большой степенью вероятности мож-

но предположить, что структурные характеристики металла непосредственно коррелируют со степенью его деградации.

Одним из наиболее информативных и помехоустойчивых неразрушающих методов экспериментального исследования неоднородной структуры металлов на мезоуровне (~ 1 мм для сталей) в преддефектном состоянии является метод ультразвуковой компьютерной томографии (УЗКТ), который основывается на регистрации обратно рассеянного структурой металла УЗ сигнала, параметры которого являются наиболее чувствительными к структурным изменениям. Томографическую реконструкцию ПР рассеивающих свойств структуры металла можно проводить на основе регистрации трансмиссионного или рассеянного сигналов [4–6]. В случае регистрации трансмиссионного сигнала увеличение коэффициента рассеивания приводит к уменьшению интенсивности этого сигнала, при регистрации рассеянного сигнала — к его увеличению.

Настоящая работа посвящена разработке метода УЗКТ на основе регистрации обратно рассеянного структурой металла УЗ сигнала. Рассеянный УЗ сигнал формируется за счет взаимодействия зондирующей УЗ волны со структурной неоднородностью металла — кристаллитами или их совокупностью — и может быть представлен как сумма большого количества элементарных эхо-



Рис. 1. Микроструктура металла вдоль толщины стенки трубопровода после азотирования: а, в — соответственно внешняя и внутренняя поверхность; б — срединный слой

© В. В. Кошевой, И. М. Романишин, Р. И. Романишин, Р. В. Шарамага, 2010



сигналов той же формы и длительности, что и зондирующий сигнал. В результате случайного характера акустических свойств элементарных рассеивателей амплитуды элементарных эхо-сигналов и время их прихода на приемник являются также случайными величинами. Таким образом, рассеянный структурой металла УЗ сигнал можно представить как ограниченную временную реализацию случайного процесса, который формируется при распространении совокупности эхо-сигналов от элементарных структурных элементов металла в направлении приемника (рис. 2).

В такой постановке проблема УЗКТ в неразрушающем контроле практически не исследовалась, поскольку в этом случае информационным и исходным для последующей реконструкции является слабый шумовой сигнал, так называемый структурный шум, формируемый в результате взаимодействия зондирующего УЗ сигнала при его распространении со структурой металла и регистрируемый в режиме А-scan. Типичный пример такого сигнала приведен на рис. 2.

Томографическая реконструкция на основе сферических проекций (теория). Рассмотрим особенности процедуры томографической реконструкции на основе использования сферических проекций. В задачах УЗ дефектоскопии ближай-

шей диагностической технологией является метод SAFT [7].

Рассмотрим толстолистовое изделие и выберем систему координат, совместив плоскость XOY с поверхностью изделия (рис. 3, а). Ось OZ направим перпендикулярно плоскости изделия. Пусть $f(x, y, z)$ — функция, описывающая ПР неоднородности структуры металла.

Сбор данных осуществляется путем сканирования по поверхности изделия прямым совмещенным УЗ преобразователем (УЗП), УЗ зондирования соответствующего объема изделия и регистрации обратно рассеянного структурой металла УЗ сигнала (рис. 3, б).

Возьмем на поверхности изделия точку (x_0, y_0) и вычислим усредненные значения функции $f(x, y, z)$ по частям полусфер с центром в точке (x_0, y_0) и с разным радиусом R :

$$p(x_0, y_0, R) = \frac{1}{\Delta V} \int \int \int_{(V)} F(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) \delta \times \times \left(\sqrt{(\tilde{x} - x_0)^2 + (\tilde{y} - y_0)^2 + \tilde{z}^2} - R \right) d\tilde{x} d\tilde{y} d\tilde{z}. \quad (1)$$

Множитель $1/\Delta V$ введен для согласования размерности. При практической реализации усреднения путем дискретизации множитель $1/\Delta V$ учитывает количество значений, по которым прово-

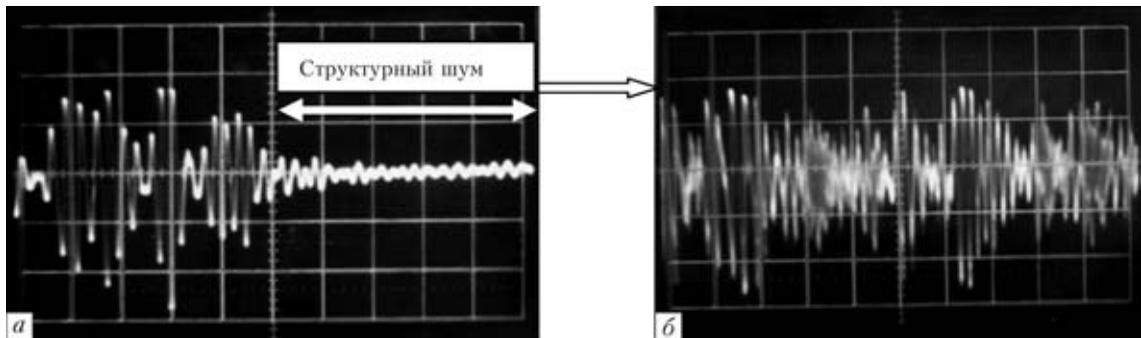


Рис. 2. Временная реализация принятого УЗ сигнала в режиме А-scan (а); «структурный шум» — исходная реализация для формирования проекционных данных (б)

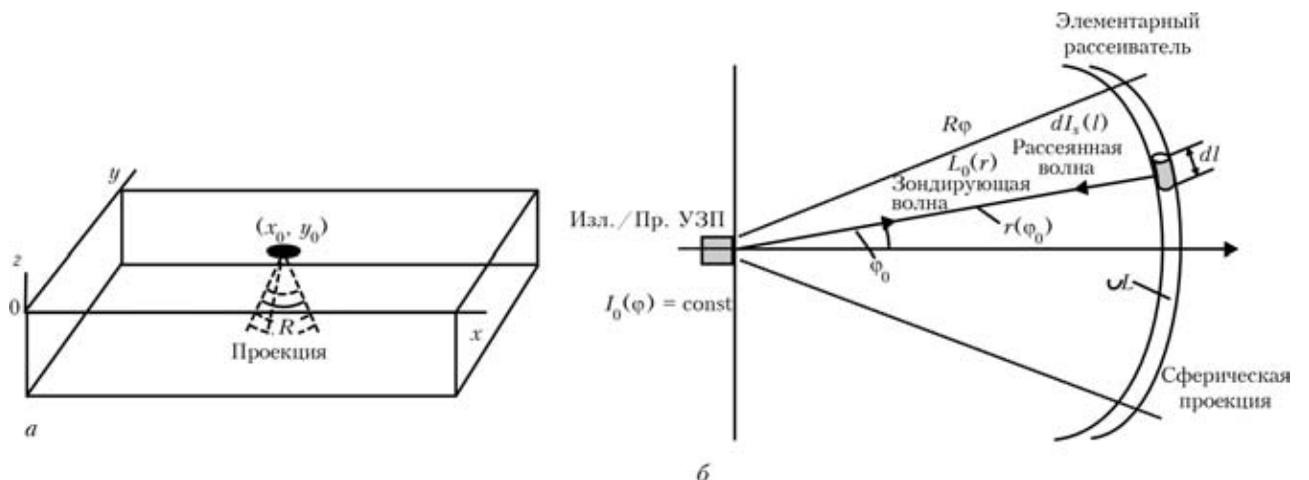


Рис. 3. Схема сбора данных по сферическим проекциям



дится усреднение. Диапазон изменения радиуса R составляет от 0 до h (толщина изделия), т. е. функция $p(x_0, y_0, R)$ определена на плоскости (x_0, y_0) , соответствующей поверхности изделия, а также при $0 \leq R \leq h$. В результате сбора данных получаем набор проекций в виде зависимости (1).

Томографическая реконструкция осуществляется путем обратного проецирования по частям полусфер:

$$g(x, y, z) = \frac{1}{\Delta S} \int \int_{(S)} p(x_0, y_0) \times \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2} dx_0 dy_0 \quad (2)$$

Здесь интегрирование проводится по поверхности изделия, в результате чего определяются значения функции в объеме изделия на основе множества проекций, которые определены с помощью выражения (1). Вклад в точку (x, y, z) вносят только отдельные проекции $p(x_0, y_0, R)$, для которых выполняется условие:

$$\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2} \leq h. \quad (3)$$

Другими словами, для каждой точки (x, y, z) интегрирование проводится по площади, для точек которой удовлетворяется условие (3). Множитель $1/\Delta S$ введен также для согласования размерности. При практической реализации операции «обратного проецирования» (2) путем дискретизации множитель $1/\Delta S$ учитывает количество значений, которые «вносят вклад» в рассматриваемую точку (x, y, z) .

Подставив выражение для сферической проекции (1) в (2), получим интегральное соотношение между искомым и реконструированным распределением:

$$g(x, y, z) = \frac{1}{\Delta S \Delta V} \int \int \int \int_{(S) (V)} f(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) \delta \times \times (\sqrt{(\tilde{x} - x_0)^2 + (\tilde{y} - y_0)^2 + \tilde{z}^2} - \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2}) dx_0 dy_0 d\tilde{x} d\tilde{y} d\tilde{z}. \quad (4)$$

Следует отметить, что соотношение между искомым и реконструированным пространственным распределением (4) представляет собой два последовательных усреднения: по частям полусфер (1) и по площади (2) с учетом условия (3).

Аналитический анализ возможностей рассматриваемого метода томографической реконструкции на основе сферических проекций с помощью интегрального соотношения между построенным и искомым распределением является достаточно сложным и сводится к сферическому преобразованию Радона [8]. Для оценки возможностей ап-

паратурной реализации алгоритмов реконструкции проведено численное моделирование процессов сбора данных и томографической реконструкции для некоего модельного пространственного распределения.

Бессеточный подход к построению алгоритмов томографической реконструкции. При реализации методов томографической реконструкции на основе измеренных проекционных данных путем построения суммарного изображения (СИ) в процессе обратного проецирования сталкиваются с необходимостью разбиения объекта исследования на элементарные пиксели (воксели) с последующим расчетом весовых коэффициентов каждого пикселя в каждом луче (традиционный подход) [9]. Для объектов с криволинейными границами или при восстановлении по криволинейным проекциям практическая реализация такой процедуры затруднена. Поэтому предложен новый бессеточный подход к томографической реконструкции, который, в отличие от существующих, не нуждается в предварительном разбиении объекта контроля на элементарные пиксели и сводится к следующим операциям [10]:

- измерение проекционных данных;
- обратное проецирование по всем измеренным проекциям и формирование файла данных со значениями восстанавливаемого параметра в точках, которые принадлежат измеренным проекциям (в отличие от традиционного построения СИ в процессе обратного проецирования);
- построение изображения путем усреднения полученных в результате обратного проецирования данных по элементарным объемам (пикселям или вокселям), форму и размер которых (шаблон) задает исследователь в зависимости от геометрии образца и требуемой точности восстановления.

В отличие от традиционного, бессеточный подход к томографической реконструкции имеет ряд существенных для практической реализации преимуществ (таблица).

Численное моделирование процесса реконструкции по сферическим проекциям. Для исследования возможностей применения рассматриваемого подхода для реконструкции неоднородностей по сферическим проекциям в изделии со сварным соединением в объеме $160 \times 160 \times 32$ задавалась модельная неоднородность в виде суперпозиции гауссоид (рис. 4, а):

$$f(x, y, z) = 10e^{-\left(\frac{x-80}{10}\right)^2} - 3e^{-\left(\frac{x-60}{10}\right)^2} - 3e^{-\left(\frac{x-100}{10}\right)^2} + 2e^{-\left(\frac{x-40}{10}\right)^2} + 2e^{-\left(\frac{x-120}{10}\right)^2}. \quad (5)$$

Следует отметить, что неоднородность (3) является функцией только переменной x и не изме-

Сравнение традиционного и бессеточного подходов

Традиционный подход	Бессеточный подход
Построение СИ в процессе обратного проецирования путем суммирования вклада каждой проекции (луча) в каждый пиксель на основе величины проекции и геометрии пересечения пикселя	1. Обратное проецирование для всех проекций и формирование файла результатов обратного проецирования по полю контроля. 2. Построение СИ путем усреднения результатов обратного проецирования в пределах выбранного шаблона.
Предварительное разбиение исследуемого объекта контроля на элементарные ячейки	Не нужно
Расчет координат входа–выхода каждой проекции для каждой ячейки	—"
Расчет весовых коэффициентов каждой проекции в каждой ячейке	—"
—	Возможно многократное построение изображения с разными шаблонами на основе файла данных с результатами обратного проецирования (без повторных измерений), что позволяет проводить пространственную фильтрацию и другую дополнительную обработку изображения.

няется при изменении y и z . Если сбор данных проводить по плоскостям, параллельным поверхности изделия, для разных расстояний от поверхности, что отвечает $3D$ -преобразованию Радона, то из-за отсутствия изменений функции $f(x, y, z)$ (3) по толщине изделия все проекции Радона будут одинаковыми и такую функцию нельзя восстановить на основе $3D$ -преобразования Радона при описанной схеме сбора данных в одном направлении, перпендикулярном плоскости изделия. В то же время при описанной схеме сбора данных реконструкция на основе сферических проекций возможна, что подтверждается результатами численного моделирования.

Перечислим факторы, от которых зависит качество восстановления на основе сферических проекций:

- параметры схемы сбора данных;
- шаг сканирования по поверхности изделия;
- шаг дискретизации по R ;
- шаг дискретизации по углам интегрирования (при усреднении по частям сфер);
- угол раскрыва диаграммы направленности УЗП;
- параметры реконструкции (как правило, включают параметры сбора данных), а также:
- ограничение применяемого метода (например, обратного проецирования);

– параметры (методы) предварительной обработки зарегистрированного сигнала;

– форма и размер «шаблона» и возможные процедуры при усреднении с помощью «шаблона», которые в сверточной модели описываются опеределенным ядром;

– параметры реконструируемых распределений (если априори известны).

Приведем основные закономерности процесса томографической реконструкции на основе сферических проекций, полученные путем численного моделирования.

На рис. 4, б – г приведены результаты численного моделирования процессов сбора данных и томографической реконструкции для разных углов раскрыва диаграммы направленности УЗП и разных шагов сканирования по поверхности изделия.

Следует отметить, что с уменьшением угла раскрыва диаграммы направленности УЗП, с одной стороны, уменьшается количество проекций в единице объема, что, как правило, ухудшает качество реконструкции, в то же время каждая проекция отвечает меньшей площади, что улучшает качество реконструкции.

Результаты численного моделирования подтвердили, что существует оптимальный угол раскрыва диаграммы направленности УЗП, при ко-

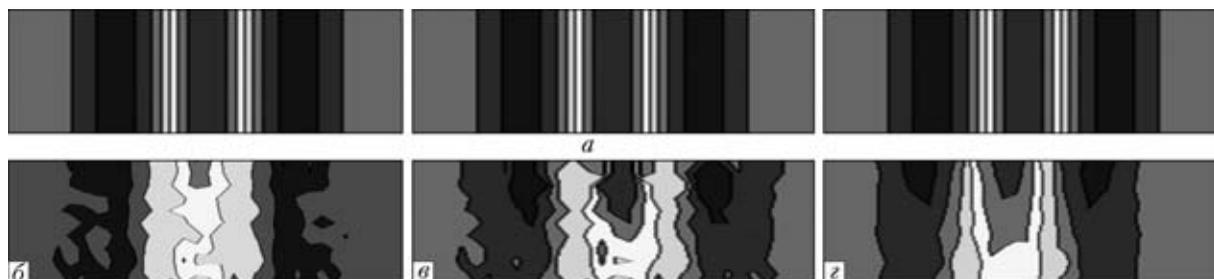


Рис. 4. Результаты численного моделирования процессов сбора данных и томографической реконструкции: а — модельная неоднородность в виде 1D-гауссоиды; б — реконструированные изображения модельной неоднородности при различных углах раскрыва диаграммы направленности УЗП и значениях шага сканирования (б — 90°, шаг 10 мм; в — 30°, шаг 10 мм; з — 30°, шаг 5 мм)



тором качество реконструкции наилучшее. Установлено, что для больших углов раскрыва (полусфера) качество реконструкции ухудшается из-за увеличения площади поверхности, которая соответствует рассматриваемой проекции (по которой (площади) осуществляется интегрирование), а для малых углов раскрыва качество реконструкции ухудшается из-за уменьшения количества проекций в единице объема.

Кроме того, такая особенность конфигурации схемы сбора данных как конечный шаг сканирования при угле раскрыва диаграммы направленности УЗП, меньшем 90° , приводит к формированию «мертвой зоны» по толщине изделия, в которой отсутствуют проекции, в пирамидально- (конусо-) подобных областях с углом при вершине пирамиды, равном углу раскрыва и длиной стороны пирамиды, равной шагу сканирования, что обуславливает методическую погрешность предложенного метода.

При визуализации важную роль играет размер шаблона, с помощью которого проводится построение томографического изображения путем усреднения (по пространству в пределах шаблона) результатов обратного проецирования, и который зависит от многих факторов (параметров сбора данных, обратного проецирования, исследуемых распределений). С увеличением размеров шаблона разрешающая способность томографической реконструкции уменьшается. Выбор шаблона следует согласовывать, в первую очередь, с пространственной частотой исследуемого распределения. Важно отметить, что построение изображений на основе данных файла обратного проецирования может проводиться многократно с использованием разных шаблонов.

Метод томографической реконструкции на основе рассеянного сигнала (предварительные замечания). Установление аналитической связи между рассеивающими свойствами материала и параметрами обратно рассеянного УЗ сигнала на основе дедуктивного подхода затруднено из-за сложности и многофакторности задачи.

При распространении зондирующей УЗ волны в структурно неоднородном материале происходит модуляция ее параметров структурой материала. Информация о свойствах материала отображается в параметрах регистрируемого сигнала аналогично тому, как в модулированном сигнале отображается информация о модулирующем действии. Таким образом, отбор информации о пространственной структуре материала можно представить как получение модулирующего действия из модулированного сигнала.

Характерные размеры рассеивающей неоднородности, которую можно выделить на основе регистрации обратно рассеянного сигнала, определяются длиной зондирующей волны. Так, для алю-

миниевых сплавов ($c \sim 6 \cdot 10^3$ м/с) при частоте зондирующей УЗ волны 5 МГц ее длина $\lambda \sim 1,2$ мм. Следовательно, на основе регистрации обратно рассеянного УЗ сигнала можно получить информацию о рассеивающих свойствах материала, линейные размеры неоднородности которых превышают миллиметры. Оценка линейных размеров восстанавливаемых неоднородностей позволяет выбирать модельные распределения, параметры сбора данных и томографической реконструкции при моделировании и отладке алгоритмов реконструкции, а также при экспериментальных исследованиях.

При рассеянии ультразвука структурой материала с увеличением сечения рассеяния амплитуда обратно рассеянной составляющей возрастает [11]. Поэтому в качестве информативного параметра о рассеивающих свойствах материала выбрана амплитуда обратно рассеянного сигнала.

Проанализируем основные эффекты, которые сопровождают распространение ультразвука в материале и которые следует учитывать при использовании амплитуды обратно рассеянного сигнала в качестве информативного параметра о рассеивающих свойствах материала.

Во-первых, при распространении ультразвука в материале происходит его затухание из-за рассеяния и поглощения. Этот факт необходимо учитывать при использовании амплитуды обратно рассеянного сигнала в качестве информативного параметра о рассеивающих свойствах материала. Следует заметить, что детальный анализ относительной оценки поглощения/затухания сложен и проведен только для частных упрощенных случаев при определенных гипотезах (например, при допущении пропорциональности коэффициента поглощения и коэффициента затухания как функций трех пространственных координат, одной функции — плотности материала; при возможности отделить во времени «баллистическую» составляющую от рассеянной для трансмиссионного случая [12]). Поэтому на практике при использовании амплитуды обратно рассеянного сигнала в качестве информативного параметра о рассеивающих свойствах материала возможно учитывать этот факт на основе феноменологических моделей.

Кроме того, при распространении ультразвука в материале в виде сферической волны наблюдается уменьшение амплитуды зондирующего сигнала, обусловленное геометрическим расхождением. Для сферической волны такое расхождение пропорционально $1/r$.

В работе [13] приведена теоретическая оценка влияния затухания и геометрического расхождения на результаты томографической реконструкции, которая свидетельствует о возможности пренебречь геометрическим расхождением при томографической реконструкции и погрешность при этом будет составлять порядка 10 %.



Следует отметить, что амплитуда обратно рассеянного сигнала существенно зависит от диаграммы направленности зондирующих преобразователей.

Метод УЗКТ на основе регистрации обратно рассеянного УЗ сигнала включает следующие процедуры:

регистрации временных реализаций обратно рассеянного УЗ сигнала вида A-scan [14];

предварительной обработки реализаций A-scan для получения проекционных данных в виде сферических проекций с учетом эффектов распространения зондирующего сигнала и затухания;

томографической реконструкции рассеянной составляющей на основе изложенного выше бессеточного подхода с учетом угла раскрытия диаграммы направленности УЗП.

С математической точки зрения описанный метод опирается на сферическое затухающее преобразование Радона, формулы инверсии для которого приведены в работе [8], а упрощенный анализ в [12]. Совместный аналитический анализ сферического затухающего преобразования Радона затруднен. Поэтому дальнейшее исследование будет проведено путем экспериментальной реализации процесса сбора данных, т.е. путем регистрации обратно рассеянного УЗ сигнала в физическом эксперименте и реконструкции томографических изображений рассеянной составляющей.

Вывод

Для получения информации об объемной однородности структуры материала изделия разработан метод УЗ компьютерной томографии на основе регистрации рассеянного структурой металла УЗ сигнала. Метод основывается на регистрации временных реализаций ультразвукового сигнала типа A-scan, на основе которых формируется набор проекционных данных в виде сферических поверхностей, учитывает модели и эффекты распространения УЗ волны в материале и позволяет реконструировать объемное распределение структурных характеристик материала, которые являются важными для оценивания деградационных процессов в материале. Результаты математического и численного моделирования подтвердили возможность получения 2D- и 3D-изображений пространственного распределения рассеивающих свойств материала, а предложенный бессеточный подход к построению алгоритмов томографической реконструкции позволяет значительно сократить объем вычислительных процедур и практи-

чески реализовать эти алгоритмы в УЗ контроле структурных свойств материала, в том числе в объектах с криволинейными границами (трубопроводы). Численное моделирование процессов сбора данных и томографической реконструкции позволило установить степень влияния параметров сбора данных (угол раскрытия диаграммы направленности ультразвукового преобразователя, шаг сканирования) и основных эффектов, сопровождающих распространение ультразвука в материале (затухание и геометрическое расхождение), на качество реконструкции при использовании амплитуды обратно рассеянного сигнала в качестве информативного параметра о рассеивающих свойствах среды.

1. Панин В. Е. Современные проблемы пластичности и прочности твердых тел // Изв. высш. уч. заведений. Физика. — 1998. — № 1. — С. 7–34.
2. Koshovy V. V., Nazarchuk Z. T. Estimating the Predefective State of a Material Using Methods of Ultrasonic Computerized Tomography // Materials Sci. — 2001. — 37, № 2. — P. 279–293.
3. Ultrasonic tomography technologies for NDT and monitoring of material degradation / Z. T. Nazarchuk, V. V. Koshovy, E. V. Krivin, I. M. Romanyshyn // Proc. of the Joint EC-IAEA Specialists Meeting, 10–12 March 1999, Petten, Netherlands / Ed. U. von Estorff, L. M. Davies, P. Trampus, Luxembourg, 1999. — P. 79–89.
4. Горшков В. А., Кренинг М. Сравнительный анализ томографии на трансмиссионном и рассеянном рентгеновском излучении // Дефектоскопия. — 2006. — № 4. — С. 83–95.
5. Томография на рассеянном излучении (обобщающая статья) / В. А. Горшков, М. Кренинг, В. М. Юмашев и др. // Завод. лаб. — 2006. — 72, № 1. — С. 24–32.
6. Розробка ультразвукових методів визначення структурної неоднорідності матеріалів на основі реєстрації розсіяного сигналу / Звіт про НДР. № держреєстрації 0105u004307. — Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України. — 2007. — 153 с.
7. Осипов А. В. Акустическая томография // Зарубеж. радиоэлектроника. — 1991. — № 5. — С. 3–29.
8. Ambartsoumian G., Patch S.K. Thermoacoustic Tomography — Implementation of Exact Backprojection Formulas (arXiv:math.NA/0510638v1).
9. Kak A. C., Slaney M. Principles of computerized tomographic imaging. — IEEE Press, 1988. — 322 p.
10. Романишин Р. И. Бессеточный подход к томографическому восстановлению неоднородностей в объектах с криволинейными границами / Мат. 4-й Междунар. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». — Ялта, 10–20 окт. 2006. — С. 69–71.
11. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. — М.: Мир, 1972. — 308 с.
12. Селіщев С. В., Терещенко С. А. Нестационарная двухпоточковая модель переноса излучения для томографии рассеивающих сред // ЖТФ. — 1997. — 67, № 5. — С. 61–65.
13. Терещенко С. А. Методы вычислительной томографии. — М.: Физматлит, 2004. — 320 с.
14. Акустические методы контроля / Под ред. Сухорукова В. В. — М.: Высш. шк., 1991. — 283 с.



УДК 621.643:620.191.4

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПРИ БЕСКОНТАКТНОМ КОНТРОЛЕ ИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Б. В. КОСТИВ, И. С. КИСИЛЬ

Разработана усовершенствованная методика профилирования, которая может применяться при бесконтактном контроле изоляционного покрытия подземных трубопроводов и позволяющая повысить производительность процесса контроля. Использование методики возможно как для одного, так и для нескольких параллельных трубопроводов. Выполнено математическое моделирование методики. Рассмотрены способы повышения точности получения данных при профилировании.

Developed improved method of profiling for control coating of underground pipelines, which can increase the productivity of the control process. Using techniques as possible for one or multiple pipelines. Done modeling work methods. Consider ways to improve the accuracy of obtaining data for profiling.

Большинство бесконтактных методов контроля изоляционного покрытия подземных металлических трубопроводов, которые основываются на измерении напряженности магнитного поля, требуют точного нахождения оси подземного трубопровода. В таком случае при измерении тратится определенное время, а также возникают погрешности, в которых присутствует и человеческий фактор. Также в подавляющем большинстве случаев без методики профилирования невозможно определить значение токов в стенках нескольких параллельных трубопроводов.

С целью получения более точных результатов определения значения тока в стенке трубопроводов предлагается выполнять профилирование в плоскости, перпендикулярной осям трубопроводов. Полученные данные можно обрабатывать разнообразными численными методами (например, градиентным методом, методом Бокса и др.), которые позволяют определять значение токов в стенках подземных трубопроводов [1]. Для получения этих значений в трубопроводах можно также применять искусственные нейронные сети и методику с использованием условно нормальных уравнений [2, 3].

Значительное количество выходных данных также позволит повысить точность, поскольку будут уменьшены случайные погрешности.

Следует отметить, что определение профиля горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля использовал А. Яворский [4]. Это было реализовано в информационно-измерительной системе БКИТ-2. На практике использование такого метода является достаточно проблематичным, поскольку для реализации необходима

специальная линейка, которая устанавливается над трассой. При размещении такой линейки необходимо придерживаться перпендикулярности к оси трубопроводов, предотвращать ее провисание. При контроле двух и более трубопроводов линейка должна иметь значительную длину. При диагностировании длинной трассы процесс переноса и размещения такой габаритной конструкции занимает много времени.

Предложен метод определения профиля напряженности магнитного поля, который можно использовать для диагностирования изоляционного покрытия как для одного, так и для нескольких параллельных трубопроводов.

Для этого используется система из нескольких горизонтально размещенных магнитных антенн (МА) (рис. 1). Расстояние между антеннами должно быть постоянным и одинаковым. Профилирование с использованием предложенной системы магнитных антенн происходит путем перемещения этой системы параллельно поверхности земли и в плоскости, перпендикулярной оси трубопроводов. В процессе такого перемещения происходит одновременная циклическая запись значений напряжения из трех антенн, по которым опреде-

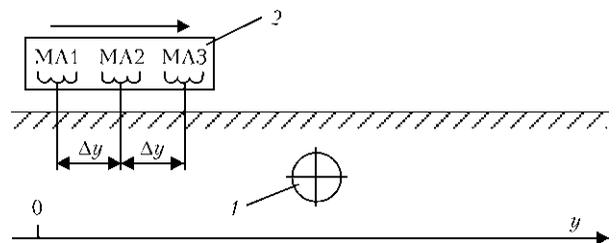


Рис. 1. Метод определения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля над трубопроводом 1 с использованием системы из нескольких горизонтально расположенных антенн 2

© Б. В. Костив, И. С. Кисиль, 2010

ляются горизонтальные составляющие напряженности магнитного поля в точках размещения этих антенн.

Определенной проблемой при таком профилировании является привязка полученных данных к расстоянию, т. е. необходима такая реализация, которая бы позволила записывать кроме значений напряженности еще и расстояние между точками, где происходило измерение.

Для измерения расстояния описанным способом необходимо перемещать систему магнитных антенн МА1—МА3 через оси одного или нескольких параллельных трубопроводов с одновременной записью значений напряжений и их дальнейшего преобразования в значения напряженностей магнитного поля. После выполнения перемещения системы получаем три массива значений напряженности магнитного поля. Значение элементов каждого массива с одинаковым индексом будут отвечать горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля в трех точках, удаленных на расстояние Δy друг от друга в определенный момент времени. Проводя обработку данных и сравнивая полученные массивы, можно получить профиль напряженности магнитного поля над контролируемыми подземными трубопроводами.

На рис. 2 изображен процесс дискретизации профиля напряженности магнитного поля с использованием трех антенн A , B и C , где H_a , H_b , H_c — соответствующие массивы значений горизонтальной составляющей напряженности маг-

нитного поля, полученные оператором при перемещении системы антенн через ось трубопровода.

Алгоритм дискретизации заключается в сравнении полученных массивов данных и нахождения равных значений. Первое измерение будет содержать три значения напряженности, которые и будут первыми тремя точками профиля: $H_1 = H_{a_1}$, $H_2 = H_{b_1}$, $H_3 = H_{c_1}$. Далее в массивах A и B последовательно находят элементы, которые соответственно равны элементам H_{b_1} и H_{c_1} : $H_{b_1} = H_{a_i}$ и $H_{c_1} = H_{b_j}$. Элемент H_{c_i} будет содержать значение следующей точки дискретизованного профиля, т. е. $H_4 = H_{c_i}$. Далее операция поиска повторяется и находятся следующие пары значений $H_{b_i} = H_{a_k}$, $H_{c_i} = H_{b_k}$ и определяется точка $H_5 = H_{c_k}$. Процедура повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто достаточное количество измеренных данных до и после осей одного или нескольких параллельных трубопроводов.

В результате поиска точек по описанному алгоритму получают ряд значений $H_1, H_2, H_3, H_4, \dots$. Они будут соответствовать профилю горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля, которая измерена с шагом Δy .

Минимальное количество антенн для использования описанной методики — две. Применение в нашем случае трех антенн позволяет повысить точность вычислений, поскольку при этом уменьшится влияние на метод помех измеренных значений напряженностей. Использование еще большего количества антенн в алгоритме позволит получить больше исходных массивов, повысить точность, но практическая реализация такой системы усложняется.

Предложенный алгоритм достаточно легко реализуется при наличии значений, измеренных с высокой частотой (более 10 изм./с) и при отсутствии значительных помех. На практике в измеренном сигнале присутствуют помехи и не всегда можно достичь высокой скорости измерений. Пример экспериментально измеренных значений горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля при перемещении предложенной системы магнитных антенн через модель трубопровода приведен на рис. 3.

Обработку полученных таким образом данных можно проводить, выполняя сглаживание и последующую аппроксимацию с целью получения функциональных зависимостей для каждой магнитной антенны.

Проведенные исследования показали, что для данного случая целесообразно использовать сглаживающую сплайновую интерполяцию, поскольку сглаживающий сплайн отличается от интерполяционного тем, что требование прохождения графика сплайна через заданные точки заменяется компромиссом между двумя требованиями:

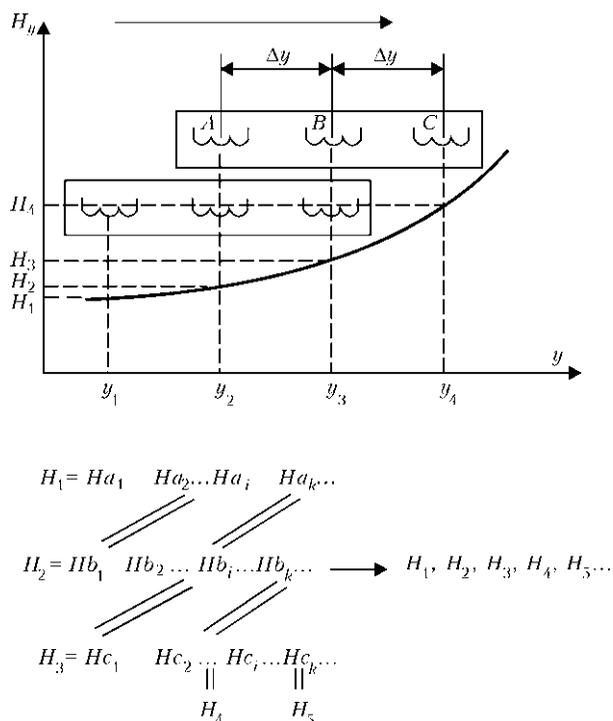


Рис. 2. Проведение измерений и обработка полученных результатов

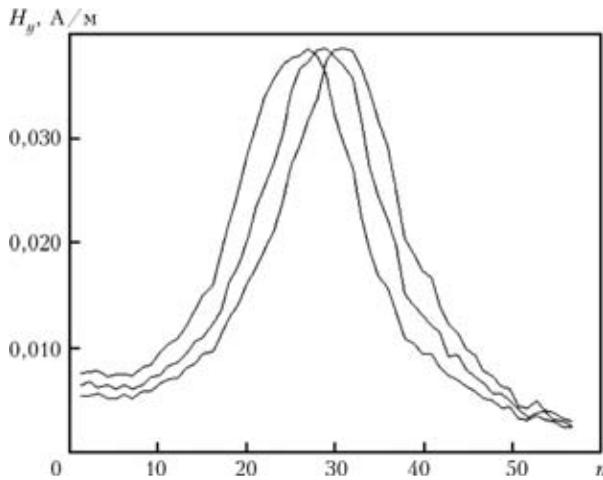


Рис. 3. Напряженность магнитного поля при прохождении через ось трубопровода системы из трех магнитных антенн

график сплайна должен проходить как можно ближе к заданным точкам;

гладкость полученной кривой должна быть как можно большей.

Пусть сглаживающий сплайн записан как $f(x)$, а (x_k, y_k) , $k = 1, 2, \dots, n$ — начальные данные. В качестве меры гладкости сплайна $f(x)$ выбирается интегральная характеристика $F(D^m f)$ [5]:

$$F(D^m f) = \int_{x_1}^{x_n} \lambda(x) |D^m f(x)|^2 dx, \quad (1)$$

где $\lambda(x)$ — положительная весовая функция, обычно константа и равная 1; $D^m f(x)$ — производная m -го порядка от функции $f(x)$; m — число, при котором $2m$ — порядок сплайна.

В качестве сглаживающего сплайна был выбран кубический. Для такого сплайна мерой гладкости является выражение:

$$F(D^2 f) = \int_{x_1}^{x_n} \left(\frac{d^2 f}{dx^2} \right)^2 dx. \quad (2)$$

В качестве меры близости выбирают взвешенное суммарное отклонение сплайна $E(f)$ от начальных данных:

$$E(f) = \sum_{k=1}^n w_k (y_k - f(x_k))^2, \quad (3)$$

где w_k — весовые коэффициенты, которые для равноудаленных точек определяются из зависимостей:

$$w_1 = w_n = h/2, w_k = h, k = 2, 3, \dots, n-1.$$

Дальше можно задаться некоторым параметром ρ , где $0 < \rho < \infty$, и искать такой сглаживающий сплайн, который минимизирует выражение

$$\rho E(f) + F(D^2 f). \quad (4)$$

Другой вариант построения сглаживающего сплайна заключается в выборе параметра ρ и поиска сплайна $f(x)$, который минимизирует такое выражение:

$$\rho E(f) + (1-\rho)F(D^2 f). \quad (5)$$

Здесь параметр ρ изменяется от 0 до 1, причем $\rho = 1$ отвечает обычному кубическому сплайну, а $\rho = 0$ — аппроксимации данных линейной функцией.

В зависимости от количества данных интерполяцию целесообразно проводить с параметром ρ , который находится в пределах $0,0001 \dots 0,1$.

Использование сглаживания интерполяции сплайнами позволяет также находить промежуточные значения между двумя измеренными точками. Это особенно актуально для повышения точности получения профиля напряженности магнитного поля при небольшом количестве измеренных данных.

При выполнении сплайновой интерполяции на концах полученного графика реальные и интерполированные данные часто расходятся. Для исключения этого явления рекомендуется 10...20 % начальных и конечных интерполированных данных не учитывать.

Алгоритм измерения и дискретизации приведен на рис. 4. Он состоит из трех основных частей. Первая отвечает за измерение и запись значений горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля, вторая — за проведение сглаживающей сплайновой интерполяции, третья — за обработку полученных данных и получение конечного массива результатов профилирования.

Первые три точки дискретизованного профиля определяются в начале интервала поиска в точке ind_s и соответственно равны значениям напряженности, полученным с помощью каждой из трех антенн (рис. 4, поз. 3).

Поскольку измеренные данные содержат погрешности, то и при интерполяции практически невозможно получить три идентичных набора данных для трех антенн. Поэтому поиск значений профиля выполняют, не сравнивая пары значений, а ища диапазоны, в которых выполняется условие вхождения данных в разрешенный диапазон. Например, для поиска значения H_4 профиля напряженности (рис. 5) сначала находят нижний индекс i_l , где начинают выполняться условия $Ha_{i_l} > H_2 - \frac{\alpha}{2}H_2$ и $Hb_{i_l} > H_3 - \frac{\alpha}{2}H_3$, а затем определяют верхний индекс i_h , где еще выполняются условия $Ha_{i_h} < H_2 + \frac{\alpha}{2}H_2$ и $Hb_{i_h} < H_3 + \frac{\alpha}{2}H_3$.

Из полученных индексов получают индекс $i = (i_h + i_l)/2$. Последующий поиск происходит аналогично. Таким образом, $H_4 = Hc_i$. Такая ме-

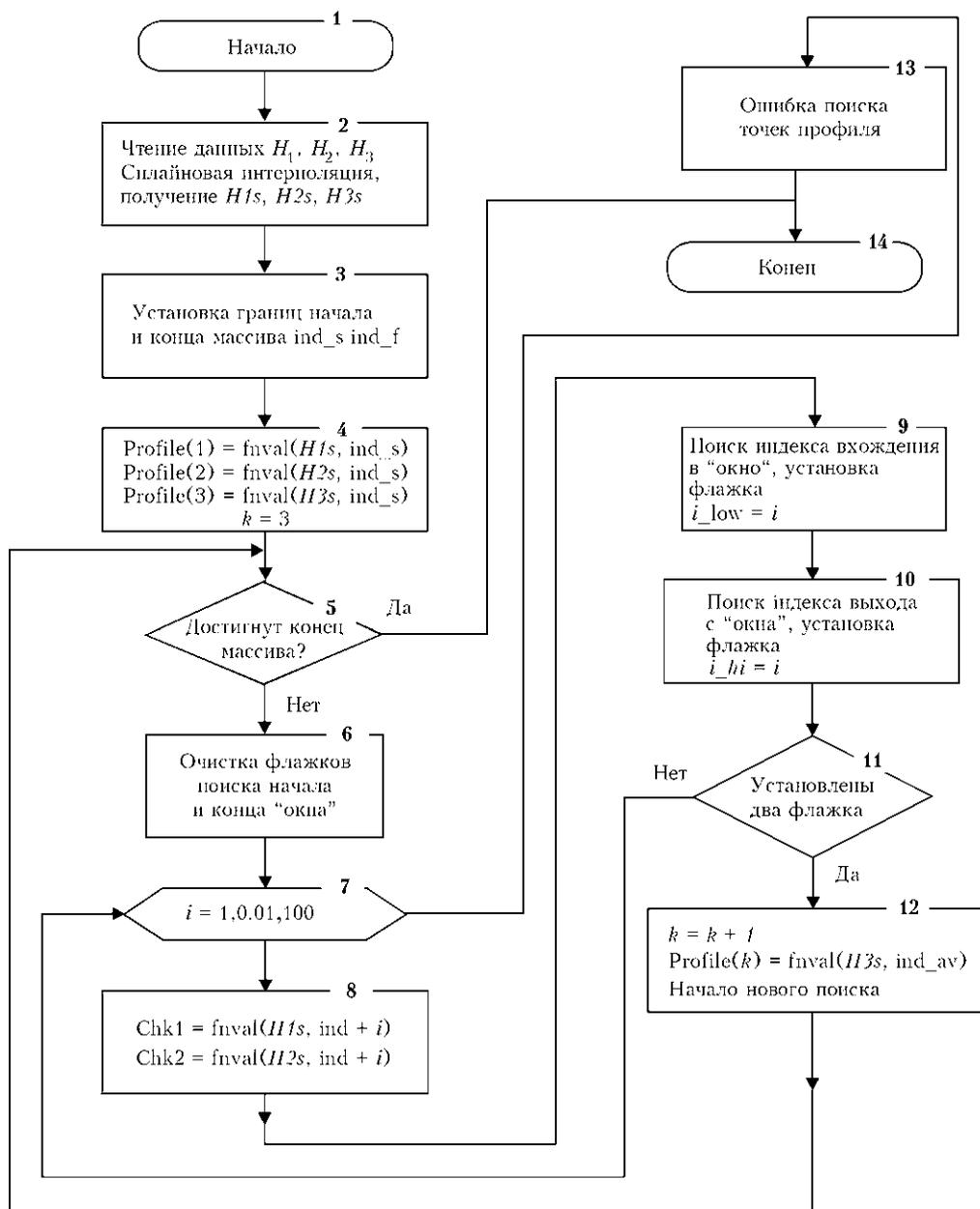


Рис. 4. Алгоритм определения дискретизированного профиля горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля

тодика позволяет точнее находить точки профиля. В алгоритме он изображен на позициях 5–12 (рис. 4).

Использование сглаживающей сплайновой интерполяции позволяет определять промежуточные значения между измеренными данными. В предложенном алгоритме дополнительно вычисляется 100 промежуточных точек между имеющимися измеренными данными (рис. 4, поз. 7, 8).

Алгоритм заканчивает работу по достижению конца имеющихся данных в массиве данных. После этого в массиве *profile* будут содержаться данные, которые отвечают дискретизации профиля горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля с шагом Δy .

Проверка работы предложенного способа фиксации точек, соответствующих приростам Δy , при

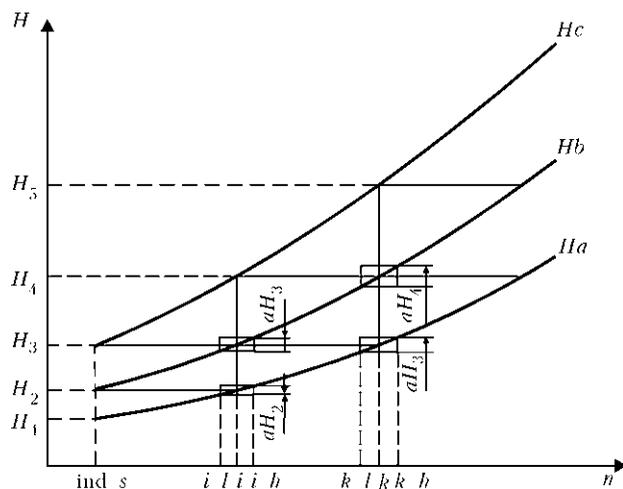


Рис. 5. Определение точек профиля горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля

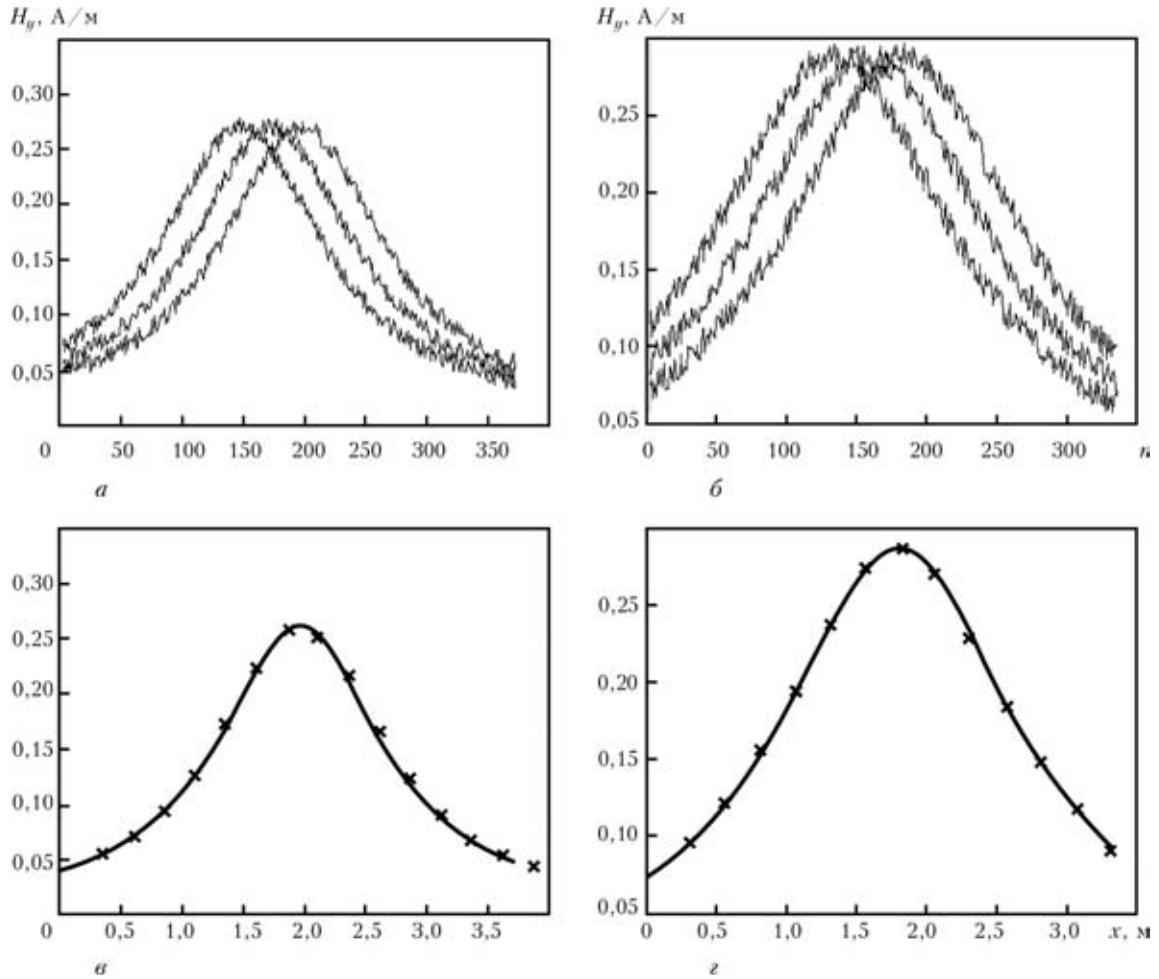


Рис. 6. Примеры работы методики определения профиля напряженности магнитного поля над подземным трубопроводом

наличии помех происходила методами численного моделирования. Для этого задавались случайным образом данные для моделирования (ток в стенке трубопровода, шаг, глубина залегания трубопровода z , расстояние до условного начала координат, уровень помех). Помехи выбирались аддитивные, их уровень составлял до 7 % максимального значения полезного сигнала.

Тип помех выбирали на основе проведенных опытов. При определении напряженности магнитного поля сначала измеряли средний уровень помех, который принимали равным нулю. При измерениях напряженности этот уровень вычитался от измеренного полезного сигнала.

Предложенная методика реализована в среде MATLAB. По результатам численного моделирования установлено, что максимальная относительная погрешность определения напряженности магнитного поля составляет не больше 1,5 %.

Иллюстрация работы методики приведена на рис. 6. Сгенерированные помехой профили (рис. 6, а, б) интерполируют сглаживающим сплайном и получают точки профиля горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля (рис. 6, в, г).

Работа методики была проверена и на реальных данных. На рис. 7 приведен результат расчета профиля по данным, приведенным на рис. 3.

Для предотвращения возникновения погрешностей при использовании предложенной методики необходимо выполнять перемещение блока магнитных антенн в плоскости, перпендикулярной оси трубопроводов. На практике такую ори-

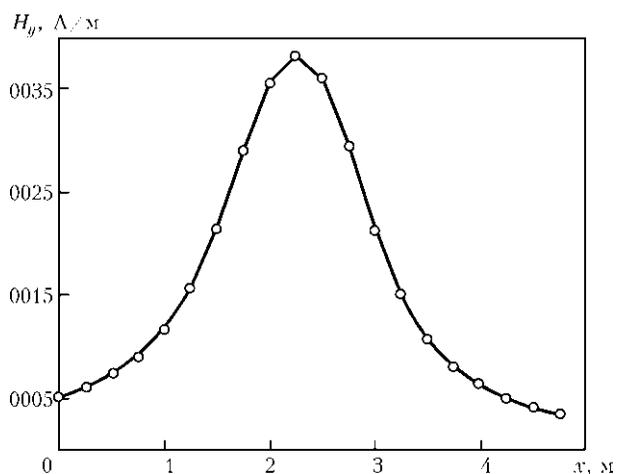


Рис. 7. Пример получения профиля напряженности по реальным данным



ентацию выполняют по минимальным значениям продольной составляющей магнитного поля трубопроводов.

Еще одним источником погрешностей может быть наклон и вертикальное перемещение блока антенн. Для предотвращения возникновения таких погрешностей используется инклинометр и акселерометр. Например, совмещенный инклинометр и акселерометр ADIS16209 позволяет определять угол наклона системы с точностью $0,1^\circ$ и ускорение с точностью $2,4 \times 10^{-3} \text{ м/с}^2$. Благодаря этому указанный инклинометр/акселерометр позволяет реализовывать сигнализацию отклонения системы и вернуть ее в нужное положение.

1. *Яворський А. В.* Розробка методу та системи для безконтактного контролю стану ізоляції промислових нафтогазопроводів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Івано-

Франківськ: Ів.-Франк. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2005. — 22 с.

2. *Костів Б. В., Кісіль І. С., Боднар Р. Т.* Оцінка стану ізоляційного покриття підземних нафтогазопроводів на основі аналізу профілю напруженості магнітного поля над ними // Методи та прилади контролю якості. — 2007. — № 18. — С. 17–21.
3. *Кісіль І. С., Костів Б. В.* Методика обробки результатів багатократних спостережень напруженості магнітного поля при безконтактному визначенні параметрів підземних нафтогазопроводів // Вісник Нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут» / Зб. наук. пр. Тематичний випуск: Прилади та методи неруйнівного контролю. — Харків: НТУ «ХПІ». — 2009. — № 14. — С. 11–19.
4. *Яворський А. В., Кісіль І. С.* Інформаційно-вимірвальна система БКІТ-2 для безконтактного контролю ізоляції підземних гальванічно з'єднаних паралельних нафтогазопроводів // Нафтова і газова пром-сть. — 2005. — № 2. — С. 42–43.
5. *Pollock D. S. G.* Smoothing with cubic spline. — http://web-space.qmul.ac.uk/dsgpollock/public_html/PAPERS/SPLIN ES.PDF, 2010.

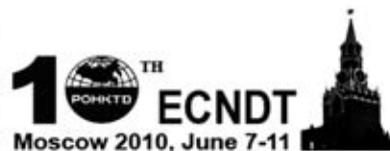
Ів.-Франк. нац. ун-т нафти і газу

Поступила в редакцію
23.02.2010



Новости УО НКТД

+ 7–11 июня 2010 г. в Москве проводится 10-я Европейская конференция по неразрушающему контролю (подробная информация на сайте: www.ecndt2010.ru). Этот форум несомненно будет интересен и полезен для всех специалистов по неразрушающему контролю. Украинскому обществу НКТД для размещения экспозиции выделен выставочный стенд. Приглашаем принять участие в оформлении этого стенда всех заинтересованных лиц. Это хорошая возможность заявить о себе и продемонстрировать свои разработки в теории и практике НК. По традиции УО НКТД организует поездку делегации Украины для участия в работе конференции и приглашает желающих принять в ней участие (тел.: (044) 271-22-49).



+ На заседании бюро правления УО НКТД было принято решение предложить Британскому институту сварки TWI провести общий научно-технический семинар по современным технологиям НК (TOFD, LRUT, UTPA) в рамках 18-й Международной конференции "Современные методы и средства НК и ТД" в Ялте 4–8 октября.

+ На сайте УО НКТД (www.usndt.com.ua, Новости) размещена информация об издании справочника "Неразрушающий контроль в Украине", который будет содержать сведения о ведущих организациях Украины, занимающихся разработкой, применением средств НК и ТД; поставкой соответствующего оборудования; об основных направлениях их работы. УО НКТД приглашает организации Украины, деятельность которых связана с НК, представить свои информационные материалы для публикации в справочнике.

+ Каждый член Общества может предложить для размещения на сайте УО НКТД свою информацию, если она представляет интерес для широкого круга специалистов, занимающихся проблемами НК.



ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СТАРЕЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

А. А. ДУБОВ

Выявлены общие проблемы при оценке остаточного ресурса стареющего оборудования, обусловленные недостаточной эффективностью традиционных методов и средств неразрушающего контроля и несовершенством поверочных расчетов на прочность. Показано, что надежность и ресурс оборудования и конструкций определяют зоны концентрации напряжений — основные источники развития повреждений. Рекомендовано применение методов акустической эмиссии и магнитной памяти металла для своевременного выявления этих зон в соответствии с новым национальным стандартом ГОСТ Р 53006–2008.

Common problems in assessment of residual life of ageing equipment are revealed, which are due to insufficient efficiency of the traditional NDT methods and means and imperfection of verifying strength analysis. It is shown that the reliability and life of equipment and structures are determined by the zones of stress concentration as the main sources of damage development. It is recommended to apply the methods of acoustic emission and magnetic memory of the metal for timely detection of these zones in keeping with the new national standard GOST 53006-2008.

Проблема обеспечения надежности работы оборудования, сосудов, газонефтепроводов и различных конструкций с каждым годом становится все более актуальной, так как старение оборудования во многих отраслях промышленности значительно опережает темпы технического перевооружения. Например, в энергетике по состоянию на сентябрь 2002 г. около 90 % оборудования тепловых электростанций исчерпало парковый ресурс и значительная его часть достигла физического износа. Указанная проблема усугубляется отсутствием научно обоснованной концепции технической диагностики и определения ресурса и недостаточной эффективностью традиционных методов и средств неразрушающего контроля (НК) металла.

На основе анализа существующих подходов к оценке остаточного ресурса стареющего оборудования, сложившихся в различных отраслях промышленности, можно выделить следующие общие тенденции:

— многие специалисты в области надежности оборудования переходят от вероятностных методов оценки ресурса, основанных на статистике отказов, к оценке индивидуального ресурса стареющего оборудования на основе комплексного подхода, сочетающего результаты разрушающего и НК с поверочными расчетами на прочность;

— при оценке ресурса заметна тенденция перехода от дефектоскопии к методам технической диагностики, основанным на сочетании механики разрушений, металловедения и НК. На первый план выходят методы НК напряженно-деформированного состояния (НДС) оборудования и конструкций;

— осознана необходимость 100%-го обследования стареющего оборудования с целью определения потенциально опасных зон.

Вместе с тем, следует отметить следующие недостатки и недоработки, существующие при реализации этих подходов. При комплексном применении различных методов и средств неразрушающего и разрушающего контроля нет строго определенного порядка и последовательности в их применении для конкретного объекта контроля (ОК).

Порядок, объем и периодичность контроля оборудования, как известно, определяется, с одной стороны, парковым (расчетным) ресурсом, повреждаемостью, межремонтным периодом, а с другой — наличием средств и методов контроля и их возможностями.

Только в отдельных, наиболее ответственных отраслях промышленности (например, атомная и тепловая энергетика), имеются специальные инструкции о порядке и периодичности контроля и продлению срока службы оборудования [1–3]. И даже в этих передовых отраслях (с точки зрения организации контроля за состоянием металла оборудования) существует проблема определения предельного состояния металла и оценки индивидуального ресурса оборудования [4].

Предлагаемые методики поверочного расчета на прочность можно условно разделить на четыре группы:

- по скорости коррозии металла;
- трещиностойкости металла;
- узлов расчета на усталость металла;
- узлов оборудования, работающего в условиях ползучести.

При этом главная недоработка известных методик заключается в том, что они предлагают низкий уровень допустимых напряжений $[\sigma]$. Как правило, уровень $[\sigma] \leq \sigma_{0,2}/2$, где $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести металла. Для ответственных конс-



трукций имеется требование в расчетах об уровне $[\sigma] < 0,3\sigma_{0,2}$. Эти требования, как известно, обусловлены работой металла оборудования в условиях скольжения и сдвиговой деформации. Как показывает практика, эти условия работы металла являются определяющими для надежности конструкции. Однако расчетными методами невозможно заранее прогнозировать на оборудовании зону возникновения площадок скольжения металла.

Кроме того, имеющиеся методики расчета на прочность, как правило, предполагают независимое протекание процессов коррозии, усталости и ползучести, хотя на практике эти процессы протекают одновременно в различном сочетании.

Существующие традиционные методы и средства НК (ультразвуковой (УК), магнитопорошковая дефектоскопия (МПД), радиографический контроль (РК), и др.) направлены, как известно, на поиск и нахождение конкретного дефекта. При этом определение размеров дефектов (глубина залегания, протяженность), расположенных в объеме основного металла или в металле сварного соединения, является сложной практической задачей. Однако если размеры дефекта определены (современные дефектоскопы решают эту задачу), необходимо оценить степень опасности этого дефекта и ответить на вопрос: «Развивается дефект или нет?». Для этого необходимо сделать поверочный расчет на прочность данного узла с учетом размеров дефекта. Очевидно, что в широкой практике такие расчеты не выполняются. Поэтому существующие нормы по допустимости дефектов (выявляемых УК и РК), например, в сварных соединениях, основаны преимущественно на статистике и в большинстве инструкций носят условный характер. Научно обоснованных норм по допустимости размеров дефектов с точки зрения механики разрушений и прочности оборудования в широкой практике нет.

Если рассматривать, например, возможности МПД и вихретокового методов контроля, направленных на определение поверхностных трещин, следует отметить следующее. Несмотря на то, что современная аппаратура и технология контроля с использованием указанных методов в настоящее время получила значительное развитие, до сих пор во многих отраслях промышленности для оборудования, находящегося в эксплуатации, нет норм на допустимость размеров поверхностных дефектов.

Существующие нормы и образцы, используемые, например, в МПД, были разработаны для новых изделий машиностроения. Для оборудования, находящегося в эксплуатации, эти нормы непригодны по следующим причинам: во-первых, окалина, коррозия наружного слоя металла не позволяют без зачистки и снятия этого слоя применять указанные нормы и методы контроля, а во-

вторых, эти нормы с позиций механики разрушений требуют специального обоснования практически для каждого ОК. Поэтому для ответственного оборудования, находящегося в эксплуатации (например, на тепловых электростанциях), выявленные поверхностные трещины на большинстве контролируемых узлов не допускаются и подлежат удалению [1]. Таким образом, образцы и нормы, установленные в инструкциях по МПД и вихретоковому методу контроля, используются в широкой практике как мера чувствительности используемых приборов.

Сложными и до сих пор нерешенными традиционной дефектоскопией на практике являются задачи контроля внутренних дефектов в угловых, тройниковых, тавровых сварных соединениях и определение язвин коррозии на внутренних поверхностях трубопроводов.

Следует отметить также низкую эффективность традиционных методов НК к определению дефектов на раннем этапе их развития. Все большее количество специалистов начинают понимать, что более опасным во многих случаях (особенно на стареющем оборудовании) является «преддефектное» состояние металла, когда на уровне структуры произошли необратимые изменения и повреждение из-за усталости может произойти внезапно и, как правило, в тех зонах, где оно не ожидается. Уровень чувствительности традиционных методов НК не позволяет выявить «преддефектное» состояние металла.

При оценке ресурса оборудования в настоящее время широко используются методы и средства НК структурно-механических свойств металла (измерение твердости, коэрцитивной силы и других магнитных характеристик металла, взятие «реплик» с целью определения структурных изменений и др.). Разработаны и применяются на практике комплексные методы НК физико-механических свойств металла, например, установки по совместному использованию магнитографического метода и метода кинетического индентирования [3], приборы и методы МЭИ для испытаний материалов вдавливанием или царапанием с целью экспресс-оценки механических свойств [5] и др.

В настоящее время в России имеется около 20 стандартов неразрушающего и частично разрушающего методов отбора проб. Все имеющиеся стандарты определяют механизм взятия проб, т. е. отвечают на вопрос: «Как сделать отбор пробы?». В 2003 г. принят первый ГОСТ, который регламентирует места отбора проб металла в зонах концентрации напряжений (КН) [6]. При взятии проб на оборудовании после длительной эксплуатации с целью оценки деградации металла специалисты дают заключение о состоянии металла только в месте взятия пробы. Распространить результаты



этого заключения на весь металл ОК (и даже отдельного элемента, например,гиба паропроводной трубы) не представляется возможным. Как правило, пробы металла берут в зонах наиболее вероятного развития повреждений по расчетным данным (или в зонах, где уже были повреждения металла).

Ранее было отмечено, что основными источниками повреждений оборудования являются зоны концентрации напряжений (ЗКН)¹, возникающие в зонах устойчивых полос скольжения дислокаций и обусловленные действием рабочих нагрузок. Как показывает опыт контроля, эти зоны на поверхности металла оборудования проявляются в виде линий с размером по ширине и глубине в начале своего развития не более нескольких микрон. Вероятность попасть в эти зоны при отборе проб металла очень низкая. Очевидно, что такую задачу можно решить только при 100%-ом обследовании металла всей поверхности ОК высокочувствительными методами, позволяющими решать эту задачу.

Необходимость 100%-го обследования оборудования при оценке ресурса хоть и осознана, однако для реализации этой задачи на практике требуются большие затраты времени и материально-финансовые средства. С использованием традиционных методов НК (УК, РК, МПД) эта задача на практике не реализуется. Например, на современном паровом котле производительностью 1000 т/ч протяженность труб поверхностей нагрева составляет более 500 км. Поэтому обстучать, зачистить и измерить методом УК такое количество труб практически невозможно и эту работу ни одна электростанция не выполняет.

Аналогичные проблемы имеют место при контроле газонефтепроводов, протяженность которых в России достигает сотни тысяч километров, в нефтяной и химической отраслях промышленности — при контроле большого парка сосудов и трубопроводов, а также в других отраслях промышленности — при контроле стареющего оборудования и конструкций.

В этой связи следует отметить, что если нет возможности определить ЗКН и сделать отбор представительных проб металла, то, соответственно, теряется смысл выполнять поверочный расчет на прочность с целью оценки остаточного ресурса. Только в исключительных случаях, когда, например, металл подвержен коррозии с утонением стенки трубы (или обечайки сосуда) на большой площади, имеет смысл делать расчет на прочность с учетом уменьшения толщины стенки и скорости коррозии.

Таким образом, приведенный краткий анализ существующих методов НК повреждений и деградации металла показывает их низкую эффективность при оценке ресурса промышленного оборудования. Становится понятной и закономерной тенденция перехода от традиционной дефектоскопии к технической диагностике с использованием принципиально других методов контроля и подходов. Более сложные задачи, возникающие при оценке ресурса оборудования (по сравнению с обычной дефектоскопией при нормальной эксплуатации) требуют применения средств и методов более сложных в освоении, но более эффективных при контроле изменяющихся свойств металла. К таким методам следует отнести, прежде всего, методы и средства, позволяющие контролировать на практике НДС оборудования.

Проблемой измерений механических напряжений в работающих конструкциях с целью оценки их состояния в настоящее время занимаются все ведущие диагностические центры мира. Однако до сих пор эффективных методов контроля напряжений, пригодных для практики, не было предложено.

Анализ возможностей известных методов контроля и измерений напряжений и деформаций в основном металле изделий и сварных соединениях оборудования и конструкций позволяет назвать их существенные недостатки, основными из которых являются:

- невозможность использования большинства методов в области пластической деформации;
- локальность контроля, их непригодность для контроля протяженных конструкций;
- не учитывается изменение структуры металла;
- контроль выполняется только на поверхности изделий, невозможность оценки глубинных слоев металла и металла сварных соединений;
- требуется построение градуированных графиков на предварительно изготовленных образцах;
- требуется подготовка контролируемой поверхности и ОК (зачистка, активное намагничивание, клейка датчиков и пр.);
- сложность определения положения датчиков контроля по отношению к направлению действия максимальных напряжений и деформаций, определяющих надежность конструкции.

Большинство методов контроля напряжений основано на тарировке образцов при их растяжении. При этом не учитываются масштабный фактор и цикличность нагрузки, формирующие фактические напряжения (рабочие и остаточные) на реальном оборудовании.

¹ Следует отличать традиционное понятие «концентратор напряжений», отражающее особенности конструкции изделия, от материаловедческого понятия «концентрация напряжений», относящегося к зонам устойчивых полос скольжения дислокаций, обусловленных действием рабочих нагрузок.



Одни специалисты считают, что только объемные напряжения определяют надежность и только их значения необходимо измерять и учитывать при расчете оборудования и конструкций на прочность. Другие специалисты, наоборот, считают, что только поверхностные и локальные напряжения являются определяющими, ссылаясь на то, что повреждения развиваются в локальных ЗКН и с поверхностного слоя металла.

Кроме того, традиционные методы и средства НК напряжений, которые основаны на активном взаимодействии сигнала прибора с металлом конструкции, получают косвенную информацию о напряженном состоянии ОК, т. е. имеют недостаточную информативность физических полей, используемых при контроле.

Действительно, вводимое в исследуемый материал поле, взаимодействуя с собственными полями материала, меняет его свойства и характеристики НДС ОК. При этом характер, величина и время жизни изменений определяются динамическим соотношением энергий взаимодействующих полей. На практике при проведении диагностики такие изменения просто не учитывают.

Ранее было отмечено, что основными источниками развития повреждений являются ЗКН. Именно в них необходимо исследовать в первую очередь структурно-механические свойства металла. Существующие традиционные методы НК напряжений (рентген, ультразвуковой метод, шумы Баргаузена и др.) не позволяют решить эту сложную задачу — определение на оборудовании ЗКН, обусловленных действием рабочих нагрузок.

Например, в работе [7] отмечается, что на современном этапе ни одно из испытанных средств определения напряжений (было испытано около 10 различных приборов контроля напряжений) в реальных условиях эксплуатации газопроводов не может обеспечить достоверных сведений об НДС.

Таким образом, перечисленные выше недостатки известных методов контроля НДС обусловлены не только метрологическими особенностями, но в определенной степени физической сущностью этих методов, т. е. являются закономерными. Отсутствие метрологической базы для сертификации и поверки средств измерений характеристик НДС материалов (до сих пор в России и за рубежом нет единых эталонов и образцов) приводят к неоднозначности требований и ошибочности методического подхода к разрабатываемым средствам контроля.

В настоящее время имеется ряд теоретических и экспериментальных работ [8–10], в которых показано, что в основе прогнозирования надежности и оценки ресурса оборудования должна быть оценка энергетического состояния с определением запаса энергии до достижения предельной деформации. В указанных работах показано, что ме-

ханизм разрушения металла сопровождается проявлением различных физических эффектов (механических, тепловых, ультразвуковых, магнитных, электрических, электромагнитных, оптических), отображающих энергию деформации.

Отсюда следует, что, используя один или одновременно несколько параметров контроля, отображающих перечисленные эффекты, представляется возможность наиболее объективно оценивать НДС ОК.

Очевидно, что только «пассивные» методы диагностики НДС могут ответить на поставленные вопросы и являются наиболее пригодными для практики.

К «пассивным» методам НК, использующим энергию излучения конструкций, прежде всего, следует отнести:

- метод акустической эмиссии (АЭ);
- метод магнитной памяти металла (МПМ).

Эти два метода получили в настоящее время наибольшее распространение на практике для ранней диагностики повреждений оборудования и конструкций.

В работе [10] на основе практики применения метода МПМ разработана методология оценки энергетического состояния и ресурса сопротивляемости конструкционных материалов деталей и узлов объектов ответственного назначения. Эта методология получила название **энергодиагностика**.

Как показала практика, метод МПМ дополнительно дает информацию о фактическом НДС ОК, что позволяет более объективно определить причину образования ЗКН — источника развития повреждения.

Кроме того, с использованием метода МПМ предоставляется возможность выполнения 100%-го обследования оборудования с выявлением ЗКН и дефектов на раннем этапе их развития. Имея полную информацию о выявленных дефектах и возможном влиянии каждого из них на остаточный ресурс оборудования, можно без особых затруднений решить задачу определения объема восстановительных работ, необходимого для доведения ресурса работоспособности узлов до требуемого уровня.

Способ определения предельного состояния металла и ресурса оборудования с использованием параметров МПМ представлен в работе [11]. Этот способ оценки ресурса соответствует рекомендациям нового национального стандарта.

В ноябре 2008 г. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии РФ от 13.11.2008 г. № 309-ст. утвержден и введен в действие новый стандарт ГОСТ Р 53006-2008 «Техническая диагностика. Оценка ресурса потенциально-опасных объектов на основе экспресс-методов. Общие требования».



На рисунке представлена структурная схема определения остаточного ресурса оборудования с использованием экспресс-методов НК.

К экспресс-методам отнесены «пассивные» методы НК, использующие внутреннюю энергию металла конструкций:

- метод АЭ;
- метод МПМ;
- тепловой контроль.

Принципиальным отличием такого подхода к оценке ресурса является выполнение 100%-го обследования с выявлением всех потенциально опасных ЗКН — источников возникновения повреждений при дальнейшей эксплуатации оборудования.

В новом национальном стандарте ГОСТ Р 53006–2008 отражены также следующие основные положения:

— в качестве основных критериев предельного состояния металла предлагается использовать фактические энергетические характеристики, которые можно определить методами МПМ, АЭ и тепловым методом;

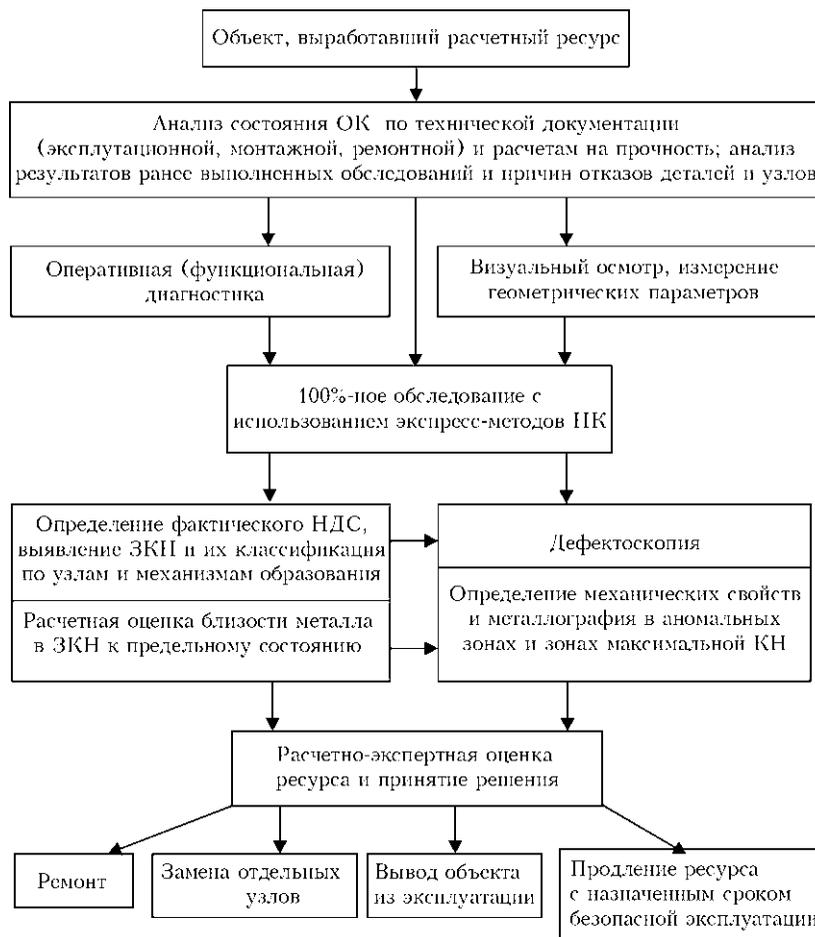
— учтены новые требования Ростехнадзора к экспертному обследованию оборудования и Федерального закона «О техническом регулировании»;

— учтены рекомендации ГОСТ Р 52330–2005 «Контроль неразрушающий. Контроль напряженно-деформированного состояния объектов промышленности и транспорта. Общие требования»;

— скорректирована структурная схема определения остаточного ресурса с акцентом на современные экспресс-методы технической диагностики;

— поверочные расчеты на прочность с оценкой остаточного ресурса предлагается выполнять для ЗКН, остающихся в эксплуатации, с учетом фактических структурно-механических свойств металла, выявленных при обследовании.

При реализации предлагаемого стандарта представляется возможным в большинстве случаев без выполнения сложных поверочных расчетов на прочность делать экспертную оценку ресурса на основе комплексного обследования оборудования и назначать срок безопасной эксплуатации. Для конкретного оборудования возможна разработка более конкретной методики оценки ресурса с учетом специфических особен-



Структурная схема определения остаточного ресурса потенциально опасных объектов, подконтрольных Ростехнадзору



ностей и требований, существующих в данной отрасли промышленности.

1. РД 10-577-03. Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций. — М.: СПО ОРГРЭС, 2003.
2. РД ЭО 0186-00. Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса сосудов энергоблоков АЭС. — М.: Концерн «Росэнергоатом», 1999. — 75 с.
3. РД ЭО 0185-00. Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса трубопроводов энергоблоков АЭС. — М.: Концерн «Росэнергоатом», 1999. — 63 с.
4. Концепция технического перевооружения энергообъектов электростанций РАО «ЕЭС России» в период до 2015 г. Документ РАО «ЕЭС России». — Москва, ноябрь, 2001.
5. Матюнин В. М. Методы и средства безобразцовой экспресс-оценки механических свойств конструкционных материалов. — М.: Изд-во МЭИ, 2001.
6. ГОСТ Р 52005-2003. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Общие требования. — М.: Изд-во стандартов, 2003.
7. Контроль напряженно-деформированного состояния газопроводов / А. А. Дубов, Е. А. Демин, А. И. Милаев, О. И. Стеклов // Газовая пром-сть. — 2002. — №2. — С. 58-61.
8. Комаровский А. А. Диагностика напряженно-деформированного состояния // Контроль. Диагностика. — 2000. — №2. — С. 22-27.
9. Скуднов В. А. Предельные пластические деформации металлов. — М.: Металлургия, 1989. — 176 с.
10. Власов В. Т., Дубов А. А. Физическая теория процесса «деформация-разрушение». — М.: ЗАО «Тиссо», 2007.
11. Дубов А. А. Способ определения предельного состояния металла и ресурса оборудования с использованием параметров магнитной памяти металла / Матер. XVI Рос. науч.-техн. конф. «Неразрушающий контроль и диагностика». — С.-Пб, сентябрь 2002.

ООО «Энергодиагностика»,
Москва

Поступила в редакцию
15.01.2010

Уважаемые коллеги!

Техническая диагностика и неразрушающий контроль развиваются интенсивными темпами, становясь все более эффективными средствами повышения качества и надежности выпускаемой и эксплуатирующейся продукции. С целью улучшения качества материалов, публикуемых в журнале, редколлегия считает необходимым установить более тесный контакт с читателями, мнения и пожелания которых будут учтены при формировании тематики журнала. Вашему вниманию представляется анкета. Для тех, кто желает высказать свои пожелания предлагаем заполнить анкету и выслать ее по адресу:

03680, Украина, г. Киев, ул. Боженко, 11,
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ;
тел.: (044)271-23-90; факс: (044)528-34-84;
E-mail: journal@paton.kiev.ua

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА
И
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

АНКЕТА

Наименование Вашего предприятия, почтовый адрес с индексом:

Является ли Ваше предприятие подписчиком журнала ТДиНК?

Дефицит какой информации по ТДиНК Вы ощущаете?

Предложите тему номера или статьи

Ваши рекомендации журналу ТДиНК

Сведения о лице, заполнившем анкету
Фамилия, имя, отчество

Должность

Телефон, факс

E-mail



МЕТОДИКА ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КАРДАННЫХ ВАЛОВ НА СТЕНДЕ «ВИК-4000»

К. Ф. БОРЯК, Э. А. ЗОРИЧ, В. А. КАЛАШНИК, В. И. СИЛКИН

Предложена методика проведения вибрационных испытаний на прочность карданных валов и оценки их технического состояния на стенде «ВИК-4000», основанная на анализе амплитудных спектров вибрационных процессов.

Procedure of vibration strength testing of cardan shafts and assessment of their technical condition in VIK-4000 testing facility, based on analysis of amplitude spectra of vibration processes, are evaluated.

В транспортной технике наименьшую долговечность имеют узлы механических трансмиссий. Одной из наиболее проблемных составляющих трансмиссии является карданная передача, долговечность которой в 1,5...2 раза меньше основных агрегатов [1]. Карданная передача вместе с соединяемыми агрегатами является сложной динамической системой. Анализ возникающих вибрационных процессов в этой механической системе показывает, что возмущающим воздействием в ней являются центробежные силы, возникающие в результате разбалансировки карданного вала вследствие его эксплуатационного износа. Установлено, что износу наиболее подвержены соединения «шип крестовины–игольчатый подшипник» и шлицевое соединение [2]. Проблема возникновения вибрационных процессов в первую очередь обусловлена детерминированными и случайными вибрационными динамическими нагрузками, постоянно действующими при эксплуатации, поэтому необходимо периодически проводить контроль прочности и наличия эксплуатационного износа деталей данных узлов.

В реальных условиях эксплуатации транспортных машин различного назначения (автомобилей, вертолетов, локомотивов, вагонов, морских судов) агрегаты механических трансмиссий подвергаются вибрационным динамическим нагрузкам. Следовательно, режим испытаний механических узлов на технологическом оборудовании целесообразно выбирать таким, чтобы он соответствовал реальным условиям эксплуатации. В автомобиле карданный вал, например, передает момент вращения от двигателя через коробку передач на задний мост, у вертолета — на лопасти основного пропеллера, а в железнодорожном вагоне соединяет между собой выходной вал редуктора и выходной вал подвагонного генератора через муфту сцепления. Каждый из перечисленных узлов трансмиссии в реальных условиях имеет

свою амплитуду и частоту вибраций, т. е. карданные валы находятся под воздействием переменных по амплитуде и частоте вибрационных нагрузок. Анализ статистики отказов показал, что обрывы карданных валов происходят в основном из-за резкого увеличения амплитуды действующих на них динамических нагрузок. Одной из причин разрушения карданных валов является возникновение резонанса. Анализ научно-технической литературы [3] показывает, что переменную по амплитуде динамическую нагрузку в режиме испытаний можно получить при возникновении явления резонанса. Так, например, автомобильная компания «Форд» (США) проводит форсированные испытания своих новых автомобилей на стендах с электродинамическими вибраторами направленного действия, используя резонансные режимы. Частота прикладываемых динамических воздействий составляет 10...40 Гц. Одним из результатов таких испытаний может быть появление усталостных трещин в конструкциях автомобиля. По ним определяют усталостную прочность деталей, а также ряд динамических характеристик: частоту собственных колебаний отдельных агрегатов, узлов и деталей, конструкции в сборе, а также форму и количество резонансных частот в рабочем диапазоне. Кроме того, известно, что применение резонансных режимов уменьшает энергетические затраты и значительно сокращает время проведения испытаний на прочность механических изделий.

Идея использования явления резонанса при испытаниях механических узлов на прочность нашла свое применение в конструкции стенда «ВИК-4000», разработанного фирмой «КОМПРО» (г. Одесса, Украина). При испытаниях реализовано циклическое прохождение заданного диапазона частот 0...66 Гц ($\approx 4000 \text{ мин}^{-1}$), в пределах которого находятся все возможные резонансные частоты карданного вала. Общий вид стенда показан на рис. 1.

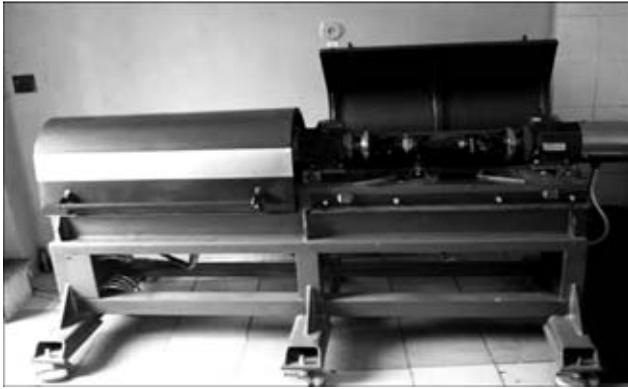


Рис. 1. Общий вид стенда «ВИК-4000»

В конструкции стенда «ВИК-4000» предусмотрены два режима испытаний — режим фиксированной и режим качающейся частоты. *Режим фиксированной частоты* позволяет выявить наличие резонансных частот, механические дефекты и ухудшение заданных характеристик изделия. В этом режиме возбуждаются механические колебания определенной частоты и амплитуды, которые постоянно воздействуют на испытуемое изделие. При этом частоту и амплитуду колебаний можно регулировать вручную. В *режиме качающейся частоты* проводится плавное изменение частоты возмущающего воздействия в заданном диапазоне частот, что позволяет автоматизировать процедуру испытаний. В этом режиме осуществляется циклическое прохождение заданного диапазона частоты вибраций путем изменения рабочих оборотов ($0 \dots 4000 \text{ мин}^{-1}$) от нижнего значения до верхнего предела и обратно [4]. При этом параметр, определяющий амплитуду вибраций во времени, остается постоянным. В качестве постоянного фактора, вызывающего вибрацию изде-

лия, служит его остаточный дисбаланс, величина которого, как известно, с изменением частоты оборотов остается постоянной. Особенностью стенда «ВИК-4000» является то, что оба режима виброиспытаний реализованы на одной конструктивной платформе. Испытания выполняются в два этапа: первоначально выявляются резонансы изделия при работе стенда в режиме фиксированной частоты; затем испытания продолжаются в режиме качающейся частоты.

Перед началом и в конце испытаний проверяют основные параметры изделия. В процессе испытаний регистрируются механические резонансы, определяются их параметры (частота и амплитуда), оценивается стабильность технических характеристик изделия. Таким образом, с использованием стенда имеется возможность искусственного создания самых невыгодных (критических) условий работы карданных валов, которые могут возникнуть при эксплуатации. Благодаря этому обеспечивается качественная и полная проверка вибропрочности валов.

В статье рассматривается предложенная авторами методика проведения неразрушающих вибрационных испытаний на прочность карданных валов на стенде «ВИК-4000» и оценки их технического состояния. Для оценки технического состояния механических узлов карданной передачи исследуемый вал на стенде должен вращаться без нагрузки. Наличие резонансных частот проверяется в процессе испытаний по резкому скачку (в несколько раз) амплитуды вибрации карданного вала в процессе прохождения диапазона рабочих частот, а также по появлению характерного шумового эффекта.

До начала испытаний проводится диагностика карданного вала на соответствие требованиям технических норм по ремонту и определению КПД шарнирной передачи. Из литературы [5] известно, что значение КПД для карданной передачи сильно зависит от угла излома шарниров. Поэтому для определения КПД шарнирной передачи осуществляется прокрутка карданного вала на стенде в двух его положениях: без излома оси шарниров и с изломом в 5° в соответствии с рекомендациями [5] их установки на транспортном средстве. По разнице в потреблении электроэнергии на прокрутку вала в двух разных положениях (0 и 5°) определяется соответствующее значение КПД шарнирной передачи для испытуемого вала. Результаты измерений выводятся на экран монитора ПК (рис. 2) и автоматически записываются в базу данных (БД) в файл, соответствующий конкретному номеру вала, чтобы затем их можно было сравнить с показаниями предыдущих измерений. Полученные значения остаточного дисбаланса вала сравниваются с допустимыми, и если они не превышают установленных норм, то переход ко

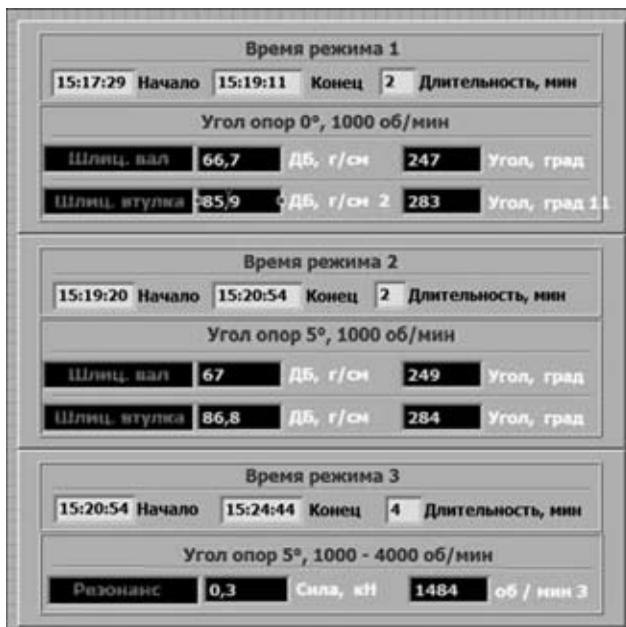


Рис. 2. Вид экрана ПК в режиме испытаний на этапе диагностики



второму режиму испытаний происходит автоматически.

Методика оценки технического состояния карданного вала заключается в следующем. В режиме качающейся частоты скорость вращения карданного вала циклически изменяется в пределах $0...4000 \text{ мин}^{-1}$. При этом постоянно измеряются в двух плоскостях значения центробежной силы, действующей на опорные шпиндели стенда. Длительность испытаний принята, исходя из расчета скорости изменения частоты 1 октава/мин с последующим округлением до целого, и заданного количества циклов качания. Обязательным условием проведения испытаний по методу качающейся частоты является соблюдение равенства времени разгона и торможения карданного вала при испытаниях (изменения частоты вибраций), которое обеспечивается программно. Согласно рекомендациям [6] количество циклов качания частоты для установленного рабочего диапазона ($700...4000 \text{ мин}^{-1}$) рекомендуется принять не менее 5, но при этом общая продолжительность самих испытаний должна равняться 25 мин. За один цикл качания (5 мин) карданный вал должен разогнаться от минимальной скорости 700 мин^{-1} до максимальной 4000 мин^{-1} и «тормозиться» в обратном порядке, проходя два раза за один цикл через диапазон возможных значений резонансных частот. В процессе испытаний карданного вала на вибропрочность в течение 25 мин измеряются и сравниваются с допустимыми значениями следующие параметры:

- эксплуатационный дисбаланс с учетом технологических допусков для присоединительных фланцев (г·см);
- динамическая нагрузка от карданного вала на подшипники качения выходного вала редуктора и вала подвагонного генератора (Н);
- амплитуда вибрации (радиальное биение) вала (мм);
- скорости вращения (частоты), на которых проявляются резонансные гармоники (мин^{-1});
- КПД карданной передачи при углах излома крестовин 0 и 5° (%).

Все испытания проходят в автоматическом режиме по заданному алгоритму, что позволяет исключить влияние работающего персонала на результаты испытаний. Возможность изменения углового положения крестовин относительно оси вращения позволяет имитировать его рабочее положение на транспортном средстве. Карданный вал считается выдержавшим испытания, если после воздействия вибрации он сохраняет значения своих характеристик (остаточного дисбаланса) в пределах, установленных техническими нормами по ремонту. Полученные результаты испытаний выводятся на экран монитора (рис. 3), заносятся в БД. Отчет о результатах испытаний также вы-

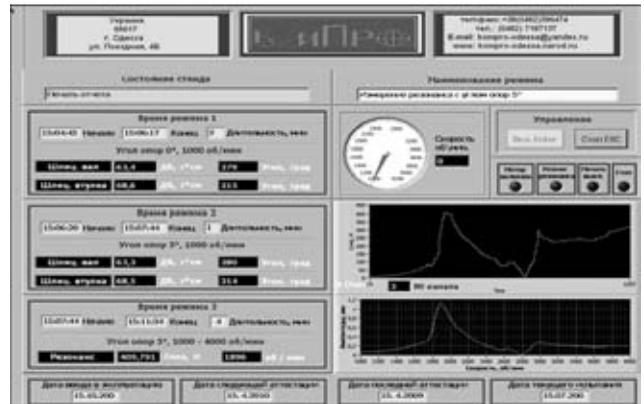


Рис. 3. Вид экрана монитора ПК

водится на принтер в форме технологического паспорта.

На экране монитора отображаются графики (спектры) зависимости амплитуды вибрации и величины динамической нагрузки на опорные шпиндели от числа оборотов вала. Возникновение резонанса проявляется в виде пиков на графиках, которые могут быть остроконечными либо растянутыми в зависимости от эффективности демпфирования вибраций шарнирной конструкции вала по отношению к возбуждающей резонанс центробежной силе. Благодаря этому по форме спектров можно судить о техническом состоянии шарниров и шлицевого соединения карданного вала.

Вибрация карданного вала — это фактически отклик механической системы на воздействие синусоидальной центробежной силы, вызванной дисбалансом вала при вращении, а величина амплитуды вибрации пропорциональна величине воздействующей силы. В идеале предполагается, что структура механической системы линейна. Для большинства вращающихся механических систем с малой величиной остаточного дисбаланса, и у которых отсутствуют гибкие соединения его частей, такое предположение представляется разумным. Например, если на испытательный стенд «ВИК-4000» установить «эталонный» карданный вал в положение без излома оси шарниров 0° (т. е. намеренно исключить шарниры из работы при вращении), то в измеренном спектре вибрации будет только одна гармоника (рис. 4). Но карданные валы в подавляющем большинстве случаев имеют гибкие соединения (шарниры Гукера) с несоосностью, именно поэтому их вибрационные характеристики, как правило, содержат несколько гармоник оборотной частоты в спектре вибрации.

Сильный износ шлицевого соединения увеличивает несоосность соединения частей вала («разболтанность»), в результате характер измеряемой вибрации еще больше будет отклоняться от синусоидального характера возбуждающей центро-

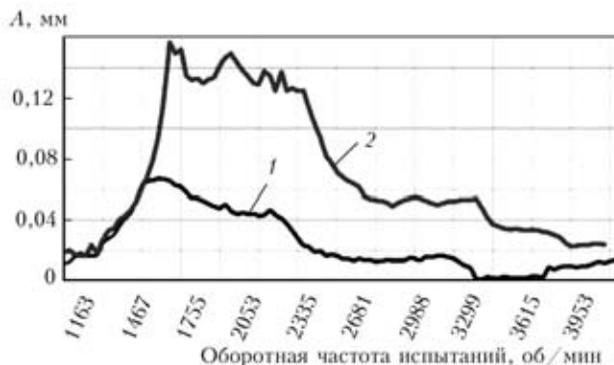


Рис. 4. Спектры вибрации вала при различном угле излома карданных шарниров 0 (1) и 5° (2) (A – амплитуда перемещения трубы вала)

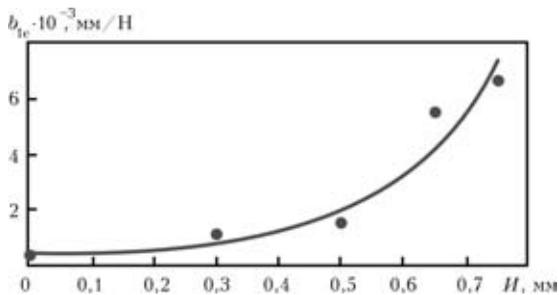


Рис. 5. Зависимость податливости шлицевого соединения b_{1c} от величины износа H

бежной силы. Структура самой механической системы будет приобретать нелинейный характер.

В работе [7] приведена зависимость изменения изгибной жесткости (податливости) шлицевого соединения карданных валов от степени их износа, полученная экспериментальным путем (рис. 5).

Из графика видно, что с увеличением износа податливость изгибу увеличивается нелинейно. В соответствии с этой зависимостью при увеличении износа от 0,3 до 0,75 мм (в 2,5 раза) податливость изгибу шлицевого соединения возрастает в 5 раз (с $1,02 \cdot 10^3$ до $4,86 \cdot 10^3$ мм/Н). Увеличение податливости изгибу шлицевого соединения приводит к изменению несоосности между осью вращения и геометрической осью карданного вала. Это, в свою очередь, приводит к резкому возрастанию остаточного дисбаланса у карданного вала и к появлению гармоник оборотной частоты в спектре вибрации.

На рис. 6 показаны спектры вертикальной составляющей виброскорости опоры вала карданной передачи и корпуса подшипника промежуточного карданного вала у автогрейдера ДЗ-98В3-2, полученные в работе [7] соответственно расчетным и экспериментальным путем.

Анализ спектров показывает, что для реальных карданных передач наряду с теоретическими (расчетными) пиками в спектре вибраций появляется множество боковых гармоник (пиков). Это является следствием наличия множественных разбалансировок элементов системы, наличия зазоров, появляющихся вследствие износа игольчатых

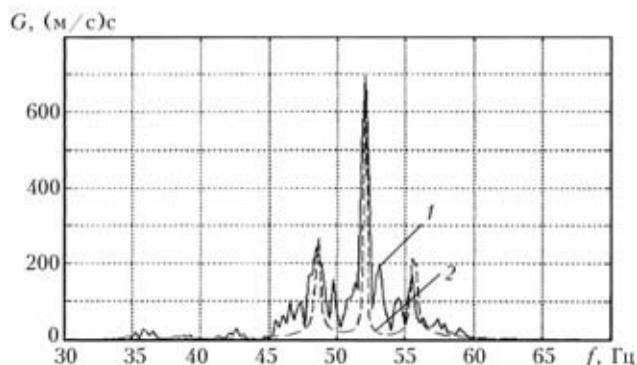


Рис. 6. Спектры вертикальной составляющей виброскорости опоры вала карданной передачи автогрейдера ДЗ-98В3-2 (при частоте вращения вала $\omega = 3120 \text{ мин}^{-1}$): 1 — экспериментальные данные; 2 — теоретические

подшипников, крестовин, шлицевого соединения. Поэтому, по-видимому, можно говорить о широкополосном вибрационном процессе, который возникает как в условиях реальной эксплуатации вала, так и при его испытаниях на стенде. Очевидно, чем меньше (в среднем) амплитуда спектра, тем более качественным является техническое состояние вала. Появление ярко выраженных пиков в спектре является признаком разбалансировки в элементах вала, существования зазоров в сочленениях и подшипниках. Поэтому в качестве определяющего параметра технического состояния карданной передачи целесообразно принять амплитуду и форму спектра вибрационных процессов. Если в спектре имеются ярко выраженные пики на тех или иных частотах, то по их величине и положению можно судить о разбалансировке и степени износа отдельных элементов карданной передачи.

На стенде «ВИК-4000» нами были проведены испытания карданных валов двух типов: трех валов МАБ-2 с различным остаточным дисбалансом и трех валов ТРКП с примерно одинаковым остаточным дисбалансом. В качестве определяющего параметра измерялась величина центробежной силы и соответствующая ей амплитуда вибрации опоры карданного вала. Полученные при испытаниях амплитудные спектры вибраций приведены на рис. 7 и 8.

Из приведенных графиков на рис. 7 видно, что для карданных валов с большим остаточным дисбалансом (кривые 2 — $D = 153$ и 3 — $D = 98$ г·см) возникают три гармоники — резонансных пика. Первый пик (на частоте 1080 мин^{-1}) характеризует состояние жесткости карданных шарниров, второй (центральный) пик (на частоте 1490 мин^{-1}) характеризует техническое состояние шлицевого соединения, третий (на частоте 2200 мин^{-1}) характеризует допущенные при сборке нарушения соосности карданных шарниров и свидетельствует о наличии излома в шлицевом соединении (при сильном износе) вала.

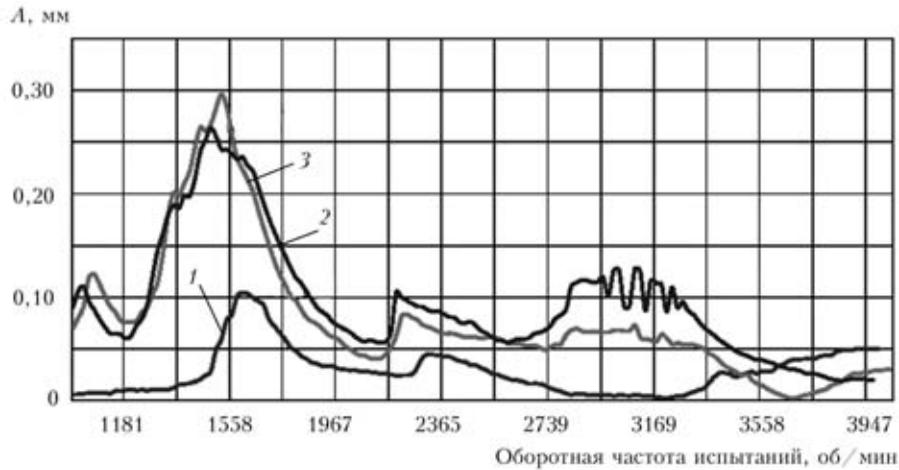


Рис. 7. Результаты испытаний валов марки МАБ-2 с различным остаточным дисбалансом: 1 — $D = 29$; 2 — 153; 3 — 98 г·см

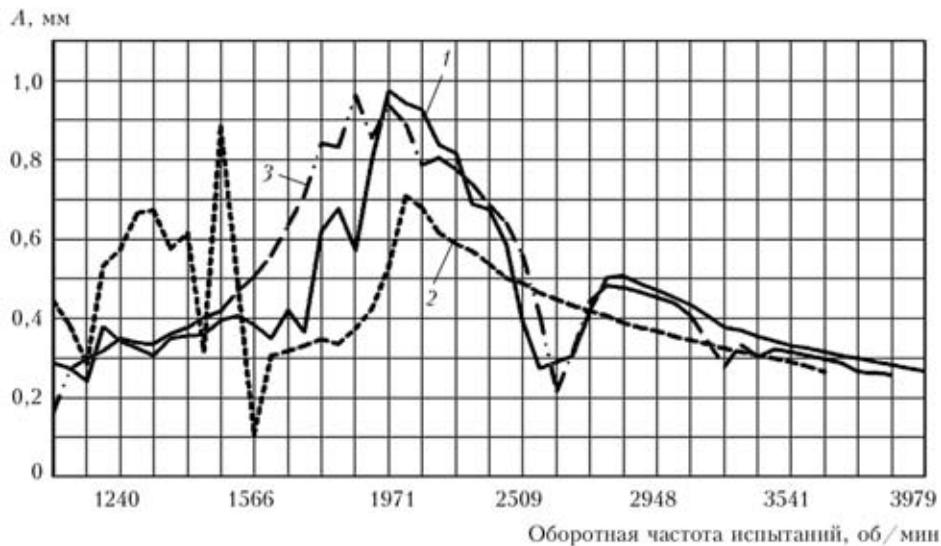


Рис. 8. Результаты испытаний валов ТРКП с одинаковым остаточным дисбалансом ($D = 22 \dots 25$ г·см): 1 — ТРКП1; 2 — ТРКП2; 3 — ТРКП3

Износ крестовин и подшипников существенно влияет на величину остаточного дисбаланса карданного вала, но значительно в меньшей степени по сравнению с износом шлицевого соединения. Основным видом износа крестовины и подшипника является образование вмятин на ведущих поверхностях шипов и корпуса подшипника, повреждения уплотнений и системы смазки (рис. 9) [2].

Таким видам износа крестовин и подшипников соответствуют первые пики в спектрах на рис. 6 и 7. Этому есть физическое объяснение. Эксплуатационный износ подшипников, крестовин и уплотнений уменьшает жесткость шарнирного соединения, что приводит к понижению пороговой величины центробежной силы, способной сдвинуть крестовины в шарнирах при вращении карданного вала. С уменьшением трения (демпфирования) в системе, которое противостоит воздействию центробежной силы, происходит снижение резонансной частоты при постоянстве мас-

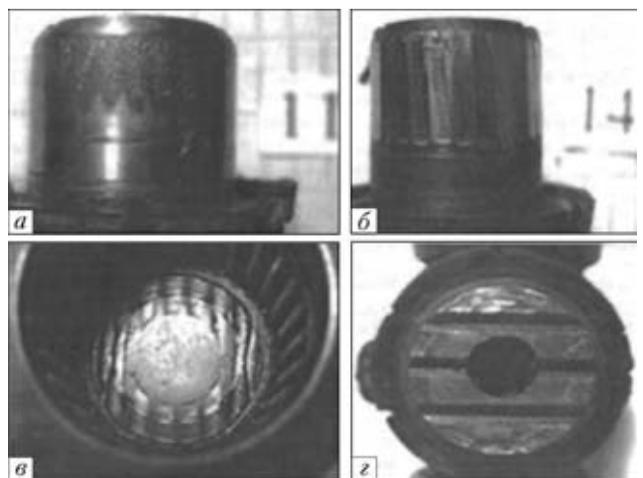


Рис. 9. Характерные повреждения элементов карданного шарнира: а — усталостное повреждение поверхности шипа; б — сколы и вмятины на шипах; в — задиры на дне корпуса подшипника, трещины; з — торцевые задиры на шипах



сы. На приведенном выше графике (рис. 7) с увеличением остаточного дисбаланса резонансные пики смещаются в сторону понижения оборотной частоты. Например, у карданного вала с большим остаточным дисбалансом ($D = 153$ г·см) центральный резонансный пик расположен на частоте 1520 мин^{-1} , а у карданного вала с малым остаточным дисбалансом ($D = 29$ г·см) соответствующий пик появляется на частоте 1610 мин^{-1} . При этом форма пика для валов с $D = 153$ г·см и с $D = 98$ г·см ближе к остроконечной, по сравнению с соответствующим пиком для вала с дисбалансом $D = 29$ г·см. В реальных условиях эксплуатации явление резонанса для карданного вала в диапазоне рабочих частот оборотов может возникать только в случае его неисправности. В исправном состоянии его собственная частота всегда лежит выше рабочего диапазона. Для карданного вала типа МАБ-2 собственная частота равна 138 Гц (или 8280 мин^{-1}), а для вала типа ТРКП она выше и равна 192 Гц (или 11520 мин^{-1}).

У новых карданных валов с нормированными установочными зазорами в шлицах и подшипниках крестовин с малым остаточным дисбалансом третий резонансный пик в их спектрах отсутствует (на рис. 7 это вал МАБ-2 с $D = 29$ г·см и на рис. 8 это валы ТРКП 1 и 3 с $D = 22 \dots 25$ г·см). Это свидетельствует о высокой степени жесткости карданных шарниров и шлицевого соединения у этих валов. Однако у карданных валов с большим износом подшипников и крестовин (на рис. 8 вал ТРКП 2) несмотря на малую величину остаточного дисбаланса ($D = 22$ г·см) имеется явно выраженный третий резонансный пик, что свидетельствует о низкой степени жесткости карданных шарниров.

Причем в диапазоне частот оборотов $1400 \dots 1600 \text{ мин}^{-1}$ наблюдается резкое скачкообразное и знакопеременное изменение амплитуды, которое вызвано большими перемещениями крестовин в подшипниках. Поэтому, несмотря на малую величину остаточного дисбаланса, для такого вала необходимо выполнить переборку карданных шарниров и устранить превышающие норму люфты.

Вывод

Использование современного вибрационного испытательного оборудования «ВИК-4000» открывает новые возможности проведения технической диагностики карданных валов, что можно считать еще одним шагом в развитии технологий безразборных методов оценки их технического состояния.

1. Пастухов А. Г. Повышение надежности карданных передач трансмиссий сельскохозяйственной техники: Автореф. дис. ... д-ра. тех. наук — М.: ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный ун-т им. В. П. Горячкина», 2008. — 34 с.
2. Пастухов А. Г., Литвишко А. В. Анализ проявлений отказа агрегатов механических трансмиссий СХТ // Вісник аграрної науки Причорномор'я. Спец. випуск. — 2007. — № 2. — С. 165–168.
3. Левит М. Е., Рыженков В. М. Балансировка деталей и узлов. — М.: Машиностроение, 1986. — 248 с.
4. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара. Справ. / Под ред. В. В. Клюева. — Т. 2. — М.: Машиностроение, 1978. — 139 с.
5. ГОСТ Р 52430–2005. Передачи карданные автомобилей с шарнирами неравных угловых скоростей. Общие технические условия. — 8 с.
6. ГОСТ 12997–84. Изделия ГСП. Общие технические условия.
7. Циенко А. Н. Метод оценки технического состояния карданных передач автогрейдеров: Автореф. дис... канд. техн. наук. — Воронеж. гос. архит.-строит. ун-т, 2008. — 17 с.

Гос. пред-тие «Науч. центр точного машиностроения»
Нац. косм. агентства Украины, Киев
Част. мал. пред-тие «КОМПРО», Одесса

Поступила в редакцию
20.04.2010



9-я Международная выставка и конференция «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ – NDT RUSSIA»

Международная специализированная выставка и конференция NDT RUSSIA — «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ», следуя традиции, состоялась в марте на территории СК «Олимпийский» в Москве.

Организаторы: Примэкспо, ООО (Россия), ITE Group plc (Великобритания)

Официальную поддержку выставке оказали: Департамент науки и промышленной политики Правительства Москвы, Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД), Национальная Ассоциация контроля и сварки.

Основные тематические разделы выставки:

- Техногенная диагностика
- Экологическая диагностика
- Антитеррористическая диагностика
- Лабораторный контроль

Участие в мероприятии «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ» в 2010 году приняли 88 компаний из России, Франции, Украины, Республики Молдова, среди них: Компания Пергам, ООО «Химинст», АО «Интроскоп», VIA Turnkey Test Systems, МНПО Спектр, ООО «ППМ-Системс», ПА Мега Инжиниринг, Группа Юнитест, НПЦ Кропус и др.

Помимо интересной экспозиции, одной из центральных составляющих успеха проекта и дополнительной причиной для его посещения является насыщенная и разнообразная ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА, в рамках которой состоялись:

- **круглые столы:** «Антенные решетки в неразрушающем контроле», «Вибродиагностика в энергетической промышленности» и «Пенетранты. Состояние и перспективы развития», организатор – Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД);
- **семинары:** «Метрологическое обеспечение методов НК» и «Применение методов НК в технологическом регулировании» (организатор – Управление по техническому регулированию и метрологии), «Современные приборы и технологии неразрушающего контроля» (организатор – Промышленная Ассоциация «Мега» в области технической диагностики), «Многofункциональ-



ный комплекс – Робоскоп ВТ3000» (организатор – компания «Вотум»), «Вибрационная диагностика как средство обслуживания машин по фактическому состоянию» (организатор – ООО «Ассоциация ВАСТ»);

- **презентации:** «Перспективные приборы производства» (ЗАО «Константа»), «Применение SDT170 для контроля и диагностики оборудования», «G4400 BLACKBOX – Современный анализ качества электроэнергии», «Тепловизоры в НК и диагностике» (ЗАО «Текно»), «Автоматизация процесса калибровки АЭ каналов комплекса A-Line 32 D» (компания «ИНТЕРЮНИС»), «Цифровая радиография. Сканеры Duerg» (ЗАО «Юнитест-Рентген»);

- **подведение итогов конкурса новейших достижений и разработок в области неразрушающего контроля «Инновация НДТ».**

Победителями стали:

I место: ЗАО ДНТЦ «Дефектоскопия», НПЦ «Кропус» (Магнитопорошковый дефектоскоп МД-М);

II место: МНПО Спектр (Акустик Аий);

III место: ООО ИНТЕРЮНИС (Тензометрический измеритель деформаций (ТИД)).

Специальными дипломами были отмечены: НПП Машпроект (Магнитно-вихретоковый дефектоскоп ВИД-345), Группа Юнитест (Автоматизированный стенд вихретокового контроля колец подшипников «ВИСТКОН»), НПП Интерприбор (ВИП-1 – вакуумный измеритель проницаемости), Ассоциация ВАСТ (Стационарные комплексы непрерывного виброконтроля и защиты от опасной вибрации КВК-21М).



Проект NDT RUSSIA проводился на одной площадке с Международной выставкой «Измерительные Приборы и Промышленная Автоматизация» – MERATEK, демонстрирующей новейшее контрольно-измерительное оборудование, которое традиционно используется при технической диагностике.

В 2010 году выставка «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ» также была нацелена помочь реализации программы федерального уровня, рассчитанной на массовое вовлечение в инновационную деятельность российской молодежи.

В рамках экспозиции молодые специалисты продемонстрировали инновационную разработку – «Системы мониторинга строительных конструкций (без датчиков)».

Организаторы благодарят всех экспонентов и посетителей выставки NDT RUSSIA 2010 и приглашают принять участие в Юбилейной Международной выставке и конференции «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ - NDT RUSSIA», которая состоится 22-24 марта 2011 года в СК «Олимпийский» в Москве.

Информация предоставлена организаторами выставки: www.ndt-russia.ru



ОТРАСЛЕВОЕ СОВЕЩАНИЕ ГК «УКРТРАНСГАЗ» «ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ»

2–5 марта 2010 г. в Яремче Ивано-Франковской обл. состоялось научно-техническое совещание ГК «Укртрансгаз» НАК «Нефтегаз Украины» на тему «**Повышение надежности и эффективности работы линейной части магистральных газопроводов газотранспортной системы ГК «Укртрансгаз».** В его работе участвовали руководители ГК «Укртрансгаз» — главный инженер М. В. Беккер, начальник департамента эксплуатации магистральных газопроводов И. В. Лохман, директор УМГ «Прикарпаттрансгаз» В. П. Рудко и более 70 ведущих специалистов ГК «Укртрансгаз». Заслушано более 50 докладов. Присутствовали гости из России, Молдовы и Беларуси. От Украины в совещании приняли участие ученые Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины — доктора техн. наук С. Г. Поляков и И. В. Орынjak.

Магистральные газопроводы как составные части нефтегазового комплекса Украины играют важную роль в ее экономике и интеграции в Европейское Сообщество. С каждым годом газотранспортная система Украины стареет, накапливаются проблемы в области надежности и эффективности ее эксплуатации. Специфические условия эксплуатации — циклические изменения давления, колебания температуры, действие на напряженный металл коррозионно-агрессивных сред — ускоряют процесс деградации трубопроводов,

который и приводит к формированию дефектов. Снижение сопротивления хрупкому разрушению в процессе продолжительной эксплуатации металла, в первую очередь, распространению трещины, делает образованные дефекты более опасными, учитывая возможное катастрофическое разрушение трубопровода.

На совещании рассматривались такие актуальные научно-технические проблемы, как стресс-коррозионное растрескивание магистральных газопроводов, повышение надежности труб большого диаметра, ремонт магистральных газопроводов под давлением, контроль технического состояния металла трубы, особенно диагностика коррозионных дефектов в процессе продолжительной эксплуатации, разработка методов обоснования работоспособности эксплуатируемого материала.

Уделено внимание и вопросам старения магистральных газопроводов, использования разных методов повышения их надежности и долговечности, особенно противокоррозионной защиты, в частности, электрохимической защиты, нанесение высокоэффективных современных защитных покрытий. Они предназначены защищать металл не только от общей коррозии, но и от локальных коррозионных поражений типа язв и трещин коррозионно-механического разрушения.

*С. Г. Поляков, докт. техн. наук,
Ин-т ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, Киев*



ПОЗДРАВЛЯЕМ ЮБИЛЯРА!

Анатолий Константинович Гурвич родился 27 марта 1925 г. в Баку (Азербайджан). Он – доктор технических наук, профессор, член-корр. Академии транспорта России, лауреат премий Совета Министров СССР, Правительства Российской Федерации и премии «W.K. Rontgen – С.Я. Соколов», Заслуженный работник транспорта России.

Гурвич А.К. окончил Авиационный техникум, а затем (по направлению техникума) – радиотехнический факультет Ленинградского института авиационного приборостроения (1951). После окончания – младший научный сотрудник, старший научный сотрудник, руководитель отдела ультразвуковой дефектоскопии на железнодорожном транспорте НИИ мостов ЛИИЖТа (1953–1993), главный научный сотрудник этого же отдела (с 1993). Параллельно заведующий созданной им кафедры «Методы и приборы неразрушающего контроля» ПГУПС со дня ее основания в 1977 по 1996 гг., профессор ис 2009 г. – Почетный профессор этой кафедры.

Анатолий Константинович – президент первого Национального аттестационного комитета СССР по неразрушающему контролю (1990–1997), Вице-президент Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике, главный редактор журнала «В мире неразрушающего контроля» со дня его основания (1998), член редколлегий журналов «Дефектоскопия» РАН (с 1965) и «Ultrasound» (с 2000), член Научного совета РАН по автоматизированным системам диагностики и испытаний (с 2007), почетный член Международной Академии неразрушающего контроля (с 2008).

Гурвич А.К. – ведущий специалист в области дефектоскопического приборостроения и систем неразрушающего контроля, сформулировал и развил основы общей теории НК, принципы стандартизации и эталонирования основных параметров ультразвуковой дефектоскопии, объективизации результатов ультразвукового контроля при «ручном» и автоматизированном сканировании, функциональные решения аппаратуры ультразвукового контроля сварных соединений и рельсов. В 1954 г. создает первый в мировой практике ультразвуковой дефектоскоп с электронным глубиномером, электронной лупой, звуковым и световым индикаторами обнаружения дефекта, структурная схема которого является «скелетом» практически всех современных ультразвуковых дефектоскопов. Позднее обосновывает принцип построения ультразвуковых дефектоскопов для сплошного контроля рельсов эхо- и зеркально-теневым методами. ВНИИНК и ПО «ВОЛНА» (г. Кишинев, Молдова) выпущено более 25 тыс. дефектоскопических приборов 19 типов.

С 1954 г. активно сотрудничает со специалистами ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины – работает в Координационном совете по сварке под председательством академика Бориса Евгеньевича Патона. Это сотрудничество в значительной степени способствовало укреплению вновь созданного в те годы подразделения ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ по физическим методам неразрушающего контроля.

Необходимо отметить важную роль и большой личный вклад А.К. Гурвича в организацию и проведение всесоюзных конференций по проблеме «Ультразвуковая дефектоскопия сварных металлоконструкций». Как правило, решения конференций ложились в основу координационных 5-летних и 12-летнего планов по развитию методов и средств неразрушающего контроля сварных соединений, которые разрабатывались Координационным советом по сварке при ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ.

Анатолием Константиновичем опубликовано 299 работ, в том числе 53 авторских свидетельств и патентов на изобретения, 17 монографий, учебников, справочников. Три первые книги, в которых сформулированы методология ультразвукового контроля сварных соединений и принципы построения специализированных средств ультразвуковой дефектоскопии при содействии академика Б.Е. Патона подготовлены и изданы коллективом издательства «Техніка» в Кисеве.

От всего сердца поздравляем уважаемого Анатолия Константиновича с юбилеем! Желаем здоровья, деловой и творческой активности, успехов в его сложной и многогранной работе!

*Дирекция и сотрудники ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины
Правление Украинского общества НКД
Редколлегия и редакция журнала "ТДиНК"*

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

Стоимость подписки через редакцию*	Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
	160 грн.	320 грн.	700 руб.	1400 руб.	26 дол. США	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) 271-26-23; 529-26-23; факс: (38044) 528-34-84, 529-26-23.

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

ПОДПИСНОЙ КУПОН

Адрес для доставки журнала _____

Срок подписки с _____ 201 г. по _____ 201 г. включительно

Ф. И. О. _____

Компания _____

Должность _____

Тел., факс, e-mail _____



РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Обложка наружная, полноцветная

Первая страница обложки (190×190мм) — 700\$

Вторая страница обложки (200×290мм) — 550\$

Третья страница обложки (200×290мм) — 500\$

Четвертая страница обложки (200×290мм) — 600\$

Обложка внутренняя, полноцветная

Первая страница обложки (200×290мм) — 400\$

Вторая страница обложки (200×290мм) — 400\$

Третья страница обложки (200×290мм) — 400\$

Четвертая страница обложки (200×290мм) — 400\$

Внутренняя вставка

Полноцветная (разворот А3)

(400×290мм) — 570\$

Полноцветная (200×290мм) — 340\$

Полноцветная (200×142мм) — 170\$

Реклама в разделе информации

Полноцветная (165×245мм) — 300\$

Полноцветная (165×120мм) — 170\$

Полноцветная (82×120мм) — 80\$

• Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу

• Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу

• Статья на правах рекламы — страница А4 (170×240мм) — 170\$

• 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 12.05.2010. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 9,2. Усл.-отт. 9,6. Уч.-изд. л. 9,2+2 цв. вклейки.

Цена договорная. Печать ООО «Фирма «Эссе».

03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.